



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo
del software per progettazione illuminotecnica
mirata all'efficienza energetica

Maurizio Rossi, Fulvio Musante



TITOLO: CONTRIBUTO ALLA DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE DI SVILUPPO DEL SOFTWARE
PER PROGETTAZIONE ILLUMINOTECNICA MIRATA ALL'EFFICIENZA ENERGETICA
Autori: Maurizio Rossi, Fulvio Musante (Dip. INDACO Politecnico di Milano)

Febbraio 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi finali

Tema: Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica

Responsabile Tema: Simonetta Fumagalli, ENEA



Accordo di collaborazione tra ENEA e Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO per una attività di ricerca dal titolo: “Lighting Design negli Esterni Urbani”.

Relazione relativa all’attività A: Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo del software per progettazione illuminotecnica mirata all’efficienza energetica.

Indice:

1. Introduzione	2
2. Indice di Efficienza energetica di un impianto	2
3. Riduzione della potenza elettrica nelle lampade a scarica con alimentatori tradizionali	4
4. Riduzione della potenza elettrica nelle lampade a scarica con alimentatori elettronici	7
5. Regolatori di flusso luminoso centralizzati	12
5.1 Considerazioni conclusive sulla durata e mortalità della lampada	17
6. Cicli di riduzione del flusso luminoso	19
7. Apparecchi a led	24
8. Proposta di specifiche per il programma di calcolo	35
8.1 Cicli manutenzione lampade a scarica	35
8.2 Cicli Manutenzione apparecchi a LED	35
8.3 Pulizia apparecchi	35
8.4 Efficienza degli alimentatori per lampade a scarica	36
8.5 Perdite lungo le linee di alimentazione	36
8.6 Durata convenzionale di funzionamento degli impianti	36
8.7 Riduzione del flusso luminoso nelle ore di notte profonda (solo per apparecchi con lampade a scarica nei gas)	39
8.8 Riduzione del flusso luminoso nelle ore di notte profonda (apparecchi a led)	40
8.9 Inserimento dei dati	40
8.10 Calcoli economici	40
8.10.1 Costo manutenzione (ricambio lampade)	44
8.10.2 Costo manutenzione (pulizia)	44
8.10.3 Costi manutenzione (diversi da pulizia e ricambio lampade)	45
8.10.4 Investimenti	45
8.10.5 Valore residuo degli impianti	46
8.10.6 LCC impianto	46
8.10.7 Indici	46
8.10.8 Trattamento dell’incertezza	48
8.11 Rappresentazione delle informazioni in uscita	49

1. Introduzione

La valutazione e la misura dei possibili risparmi nella pubblica illuminazione, deve considerare due diversi aspetti:

- ✓ L'efficienza energetica dell'impianto che si raggiunge attraverso la scelta di apparecchi, lampade, geometrie di impianto e relativi sistemi di controllo adatte all'applicazione e che consentano di soddisfare i requisiti della norma UNI 11248.
- ✓ L'aspetto economico dell'investimento che deve tenere conto di tutte le possibili voci di costo del progetto (LCCA, Life Cycle Cost Analysis). Vengono quindi presi in esame i costi iniziali (investimenti, installazioni, acquisizioni), i costi futuri (manutenzione, spese energetiche, oneri finanziari), fino ad arrivare allo smaltimento e al recupero.

Solo lo studio congiunto di entrambi questi aspetti consente di effettuare una valutazione consapevole e affidabile dei possibili risparmi connessi ad un investimento.

Nei paragrafi successivi verranno analizzati alcuni componenti e tecnologie normalmente impiegate per il conseguimento del risparmio energetico negli impianti di illuminazione pubblica; gli aspetti trattati riguarderanno la riduzione di potenza delle lampade a scarica, l'installazione di regolatori di flusso centralizzati con particolare riguardo agli aspetti di risparmio energetico (funzionamento a regime di potenza ridotto) e di miglioramento della durata delle lampade. Verranno poi analizzati l'impatto dei programmi di riduzione del flusso luminoso nelle ore centrali della notte, in riferimento alla norma UNI 11248 e l'impiego di apparecchi allo stato solido, con particolare attenzione ai risparmi degli oneri di manutenzione che se ne dovrebbero conseguire.

Nella parte finale, si propongono delle linee guida per l'implementazione di un software capace di considerare quanto esposto precedentemente e aiutare il progettista nella valutazione economica delle diverse scelte impiantistiche.

2. Indice di Efficienza energetica di un impianto

In Italia non è ancora stato messo a punto un indice condiviso di efficienza energetica per gli impianti di illuminazione pubblica che consenta la valutazione energetica dell'impianto; pertanto si suggerisce di procedere come segue:

- a) implementazione dell'indice adottato dalla Spagna (Real Decreto 1890/ del 14 Novembre 2008) come applicazione della direttiva Europea no 245/2009 e 244/2009.

I contenuti tecnici attuativi sono indicati nei documenti ITC-EA-01 e ITC-EA-02. L'applicazione dei documenti citati, porta all'identificazione di 7 classi energetiche¹.

- b) Introduzione di un indice che raccoglie alcune delle posizioni presenti nel panorama italiano, peraltro molto simile a quello proposto da Vito nel "Preparatory Study for Eco-design Requirements for EuPs Final Report Lot 9: Public Street lighting Study for the European Commission DGTREN unit D3", nella versione del Gennaio 2007. In questo caso non sarà possibile definire le classi Energetiche degli impianti (contrassegnate da 7 lettere maiuscole), dal momento che non vi è unanime accordo tra tutti i portatori di interessi, sulla formulazione dell'indice e sui limiti che questo dovrebbe assumere nelle diverse applicazioni.

L'implementazione sarà sufficientemente flessibile in modo da consentire di tenere conto o meno di alcuni elementi, come ad esempio il numero delle ore di funzionamento dell'impianto e delle perdite negli ausiliari elettrici.

¹ Questa valutazione dovrebbe essere una funzionalità già presente in questa versione del programma; i risultati di questo calcolo dovrebbero poter essere visualizzati insieme a quelli relativi all'analisi economica dell'investimento.

Il software dovrebbe quindi consentire la simulazione di un certo numero di condizioni impiantistiche in modo da porre dei limiti per questo indice per la definizione delle "classi energetiche".

$$IE = \frac{100 * P}{(E_m * S) \eta * U_F * LMF * LSF * LLMF} = \frac{100}{\eta * U_F * LMF * LSF * LLMF}$$

dove

η : efficienza intesa come rapporto tra il flusso luminoso emesso dalla sorgente e la potenza assorbita P, espressa in watt.

P: potenza elettrica attiva degli apparecchi (W) che insistono sulla zona di studio (occorre fornire la possibilità di tenere conto o meno delle perdite negli alimentatori i cui rendimenti minimi sono riportati alla Tabella 7).

S superficie, in metri quadri, della zona di studio (coincide con le superfici per cui sono stati definiti dei punti di calcolo delle grandezze fotometriche).

E_m illuminamento medio mantenuto della zona di studio, espresso in lux.

U_F : frazione del flusso luminoso complessivamente emesso dagli apparecchi che raggiunge la zona di studio.

LMF : luminaire maintenance factor.

LSF : lamp survival factor.

LLMF : lamp lumen maintenance factor.

I valori di LMF, LSF e LLMF sono desunti dalle seguenti tabelle:²

Tabella 1 Fattore di mantenimento del flusso luminoso della lampada (LLMF) in funzione della sorgente impiegata.

Lamp Lumen Maintenance Factors (LLMF).

Lamp type	Operating time (thousands of hours)				
	4	6	8	10	12
S	0,98	0,97	0,94	0,91	0,90
M	0,82	0,78	0,76	0,74	0,73
Q	0,87	0,83	0,80	0,78	0,76
L	0,98	0,96	0,93	0,90	0,87
FD* (Tph)	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
(Hph)	0,82	0,78	0,74	0,72	0,71
FS*	0,91	0,88	0,86	0,85	0,84

Note. The lamp abbreviations given in the table relate to the following lamps:

S	High Pressure Sodium	FD	Tubular fluorescent
M	Metal Halide	FS	Compact fluorescent
Q	High Pressure Mercury	L	Low Pressure Sodium
Tph	Triphosphor	Hph	Halophosphate

* Relates to value at an ambient temperature of 25°C, therefore check location.

Tabella 2 Fattore di sopravvivenza di ciascun tipo di lampada (LSF, probabilità che una lampada continui a funzionare per un dato intervallo di tempo) in relazione alle ore di funzionamento.

Lamp Survival Factors (LSF).

Lamp type	Operating time (thousands of hours)				
	4	6	8	10	12
S	0,98	0,96	0,94	0,92	0,89
M	0,98	0,97	0,94	0,92	0,88
Q	0,93	0,91	0,87	0,82	0,76
L	0,92	0,86	0,80	0,74	0,62
FD (Tph)	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96
(Hph)	0,99	0,98	0,93	0,86	0,70
FS	0,98	0,94	0,90	0,78	0,50

Note. The lamp abbreviations given in the table relate to the following lamps:

² CIE 154:2003, "The maintenance of Outdoor Lighting System"

Tabella 3 Fattore di manutenzione dell'apparecchio (LMF) in funzione del suo grado IP.

Luminaire Maintenance Factors (LMF).

Optical compartment IP Rating	Pollution Category	Exposure time (years)				
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
IP2X	High	0,53	0,48	0,45	0,43	0,42
	Medium	0,62	0,58	0,56	0,54	0,53
	Low	0,82	0,80	0,79	0,78	0,78
IP5X	High	0,89	0,87	0,84	0,80	0,76
	Medium	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82
	Low	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88
IP6X	High	0,91	0,90	0,88	0,85	0,83
	Medium	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
	Low	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90

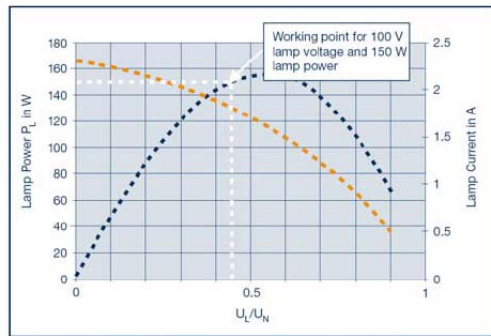
Per quanto riguarda gli apparecchi a led, la determinazione di LSF e LLMF risulta più complicata e si rimanda ai paragrafi successivi per un maggiore dettaglio.

Il programma dovrebbe essere in grado poter svolgere le seguenti funzionalità:

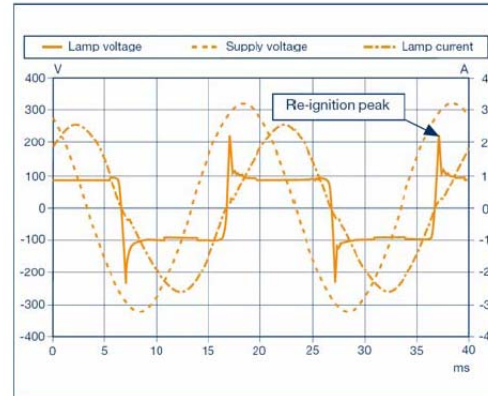
- ✓ Assegnata una geometria di impianto prefissata, per ciascuna fotometria utilizzata nel progetto deve potersi associare una lista di apparecchi sostitutivi che verranno valutati l'uno dopo l'altro al fine di generare i valori degli indici di efficienza luminosa dell'impianto.
- ✓ Per disposizioni regolari di apparecchi (es. stradale o con centri allineati), fissata la fotometria (o più d'una se il progetto richiede l'impiego di apparecchi con distribuzioni fotometriche differenti), il programma deve essere in grado di effettuare automaticamente la valutazione degli indici variando i parametri di installazione (altezza, sporgenza sulla carreggiata, arretramento del palo dal ciglio della strada, interdistanza) all'interno di una serie di range prefissati.

3. Riduzione della potenza elettrica nelle lampade a scarica con alimentatori tradizionali

Quando la lampada a scarica nei gas funziona con il ballast (impedenza) collegato in serie (in modo da limitare la corrente di lampada), la potenza segue l'andamento della curva in blu (a sinistra della Figura 1), mentre la tensione di lampada segue l'andamento della linea arancione (a destra della Figura 1); la tensione ai capi della lampada viene normalmente scelta in prossimità del centro dell'asse orizzontale (rapporto tra la tensione di lampada e quella di alimentazione), laddove la curva della potenza elettrica ha una pendenza meno elevata, in modo tale che variazioni della tensione di lampada (fenomeno naturale con l'invecchiamento della sorgente) produca contenute variazioni della potenza assorbita. La corrente di lampada risulta sfasata rispetto alla tensione a causa dell'impedenza dell'alimentatore e prima di ogni attraversamento dello zero la corrente diminuisce; gli elettrodi e il plasma si raffreddano e si ha ricombinazione di elettroni con gli ioni all'interno del tubo di scarica riducendone la conduttività. La tensione ai capi della lampada inizialmente aumenta, formando il picco di riaccensione, che produce una nuova ionizzazione del gas e quindi un aumento della conducibilità e quindi una riduzione della tensione della lampada. Se il picco di riaccensione supera la tensione di alimentazione in quel punto la lampada si spegne. Si spiega quindi il vantaggio di una alimentazione elettronica, in cui tensione e corrente sono un'onda quadra con un rapido passaggio per lo zero; in questo modo il plasma e gli elettrodi non si raffreddano eccessivamente e si ha una riduzione del valore del picco di riaccensione.



Model of a choke curve, lamp wattage in blue, lamp current in orange



Lamp voltage and current and supply voltage in a metal halide lamp

Figura 1 Andamento di corrente, tensione di lampada e potenza in una lampada a scarica nei gas.

Gli elettrodi delle lampade a scarica sono dimensionati per un prefissato valore della corrente; se la corrente è troppo elevata parte dell'elettrodo si fonde ed evapora; se la corrente è troppo bassa l'elettrodo si trova a funzionare ad una temperatura troppo bassa. Questo cambia il meccanismo con cui gli elettroni sono emessi dall'elettrodo e quindi una maggiore quantità di elettrodo eroso si deposita sulla parete del tubo di scarica.

Deviazioni dal valore della corrente nominale di lampada, nelle due direzioni, possono causare un annerimento della parete del tubo di scarica con una conseguente diminuzione del flusso luminoso emesso, insieme con possibili effetti negativi sia sul colore della luce emessa, sia sulla vita della lampada stessa.

La pressione di vapore dei componenti di riempimento responsabili della produzione di luce, dipende dalla temperatura della parete del tubo di scarica.

Un cambiamento nella temperatura del tubo di scarica, causata da una variazione della potenza, influenza la composizione della miscela di riempimento e quindi le caratteristiche elettriche e fotometriche della lampada stessa.

I metodi per la regolazione del flusso luminoso, che fanno uso di alimentatori elettronici o tradizionali, sono:

- ✓ riduzione della tensione di alimentazione;
- ✓ controllo di fase (leading edge, trailing edge);
- ✓ aumento dell'impedenza dell'avvolgimento dell'alimentatore, per ridurre la corrente di lampada (alimentatori bi-regime);
- ✓ cambiamento della frequenza, negli alimentatori ad alte frequenze.

Una riduzione della tensione di alimentazione, diminuisce anche la potenza di lampada: mentre viene ridotta la potenza di lampada, viene ridotta anche la tensione ai suoi capi e il picco di riaccensione, anche se questo effetto avverrà generalmente in misura minore rispetto alla riduzione della tensione di alimentazione (Figura 2).

Questo riduce l'intervallo tra il picco di riaccensione e la tensione di lampada, rendendo più probabile lo spegnimento della sorgente; questo fenomeno si manifesta in modo particolare per le lampade con molte ore di funzionamento, dove la tensione di lampada e il picco di riaccensione sono naturalmente accresciuti.

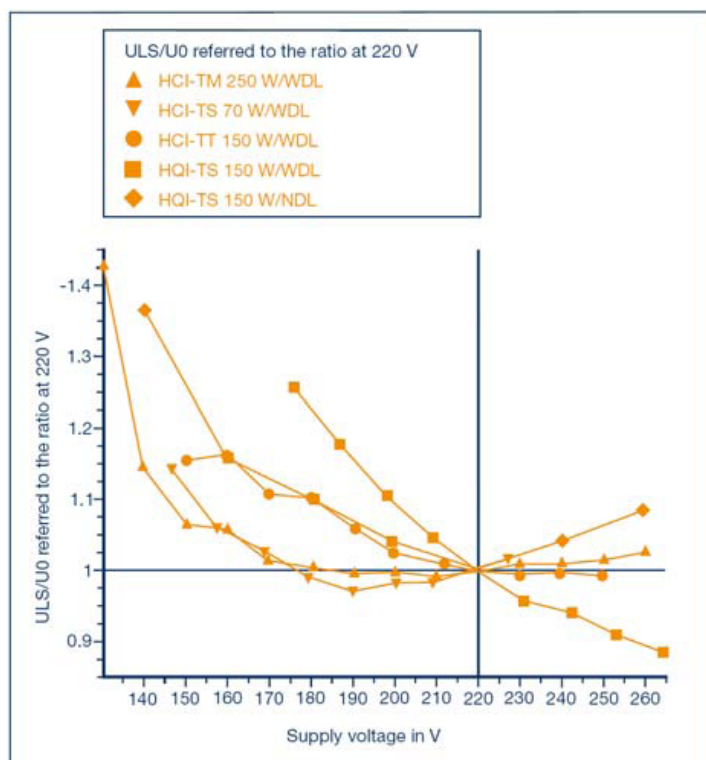


Figura 2 Cambiamento nel rapporto tra picco di riaccensione (ULS) e tensione di alimentazione riferiti al rapporto alla tensione nominale di 220 V³.

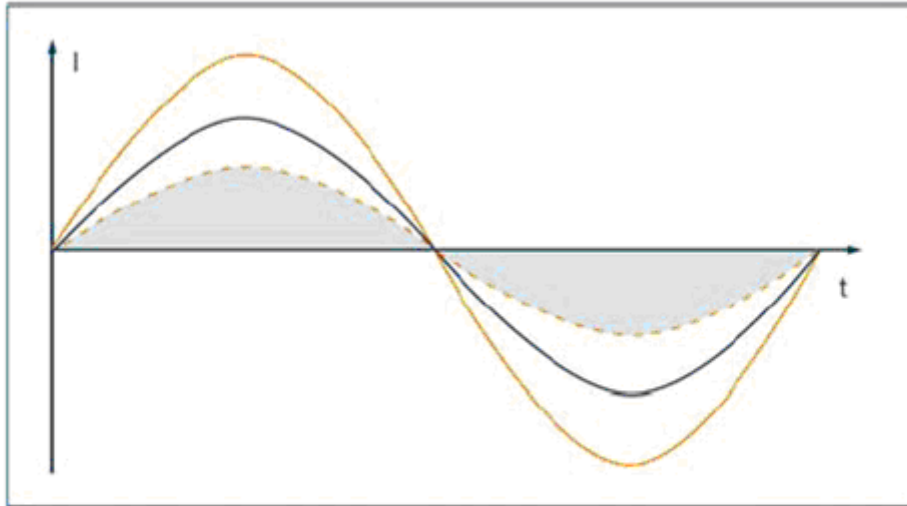
I sistemi che riducono la potenza agendo sulla tensione di alimentazione non sono raccomandati dai costruttori delle sorgenti; in questi sistemi è importante ridurre la tensione di alimentazione in maniera molto lenta per evitare l'innescò di prematuri cicli di accensione e spegnimento, soprattutto per impianti con lampade con molte ore di funzionamento ormai prossime al fine vita. Nella riduzione tra piena potenza e il regime ridotto, il tempo necessario alla transizione non deve essere inferiore a 90 secondi; eventuali riduzioni a gradini tra la massima potenza e il regime ridotto, devono avvenire con una velocità di variazione che non sia inferiore a quella che si avrebbe utilizzando un andamento lineare tra gli estremi in un tempo di 90 secondi⁴.

Le lampade devono essere accese alla massima potenza per almeno 15 minuti, prima di applicare la riduzione della potenza e devono essere fatte funzionare per almeno 100 h (invecchiamento) alla massima potenza (in modo continuo o intermittente) al fine di stabilizzare il flusso luminoso emesso e la cromaticità⁵. La riduzione della potenza mediante l'aumento dell'impedenza in serie (Figura 3), produce una riduzione della corrente di lampada; la tensione di alimentazione non viene alterata e risulta quindi sufficiente a innescare nuovamente la lampada. Il livellamento dell'andamento della corrente in prossimità dell'attraversamento dello zero, potrebbe portare a un maggiore raffreddamento degli elettrodi e del plasma, con un aumento dell'annerimento causato dalla vaporizzazione degli elettrodi a ogni ri-accensione.

³ "High Intensity Discharge lamps Technical Information on reducing the wattage", OSRAM

⁴ "High Intensity Discharge Lamp Dimming", GE Lighting

⁵ "High Intensity Discharge Lamp Dimming", GE Lighting



Amplitude modulation e.g. by choke changeover

Figura 3 Andamento di tensione(blu) e corrente (arancio) in caso di utilizzo di alimentatore bi-regime.

Questo fenomeno può essere minimizzato dall'utilizzo di alimentatori elettronici in cui la corrente è approssimabile ad un'onda quadra; la maggiore rapidità con cui la corrente attraversa lo zero determina un minor picco di riaccensione e quindi una diminuzione della vaporizzazione dell'elettrodo e sua deposizione sul tubo di scarica⁶.

4. Riduzione della potenza elettrica nelle lampade a scarica con alimentatori elettronici

Alcuni esperimenti sono stati compiuti per valutare gli effetti del funzionamento a regimi di potenza ridotta per periodi di tempo prolungati, utilizzando un diversi gruppi di lampade agli ioduri metallici a bruciatore ceramico da 150W⁷ con temperatura correlata di colore di 4000K (Sylvania CMH150/T/UVC/U/942/G12).⁸ Prima di essere fatte funzionare a regime ridotto, le lampade sono state lasciate al 100% della potenza per almeno 15 minuti, per essere certi che la lampada avesse raggiunto una condizione di funzionamento stabile.

La riduzione di potenza viene quindi applicata alla lampada in maniera molto graduale attraverso 7 gradini dalla durata di 2 minuti ciascuno (Figura 4). La medesima procedura è utilizzata dall'alimentatore per riportare la potenza da un regime ridotto a 100%.

⁶ "High Intensity Discharge lamps Technical Information on reducing the wattage", OSRAM

⁷ Queste lampade, producono una luce bianca con un elevato indice di resa cromatica e quindi possono essere considerate una valida alternative ai led nelle applicazioni di illuminazione d'arredo urbano o decorativa. La loro massiccia diffusione è però ostacolata dal prezzo e dalla durata; per ovviare a questi inconvenienti alcuni costruttori hanno proposto sul mercato lampade a ioduri metallici, con minore indice di resa cromatica ma maggior durata (mantenimento del flusso luminoso nel tempo).

Necessitano di un alimentatore elettronico per poter funzionare.

⁸ EC Guest MH Mucklejohn, U Rast, "Effects of dimming 150 W ceramic metal halide lamps on efficacy, reliability and lifetime", Lighting Res. Technol. 2008; 40 333-346

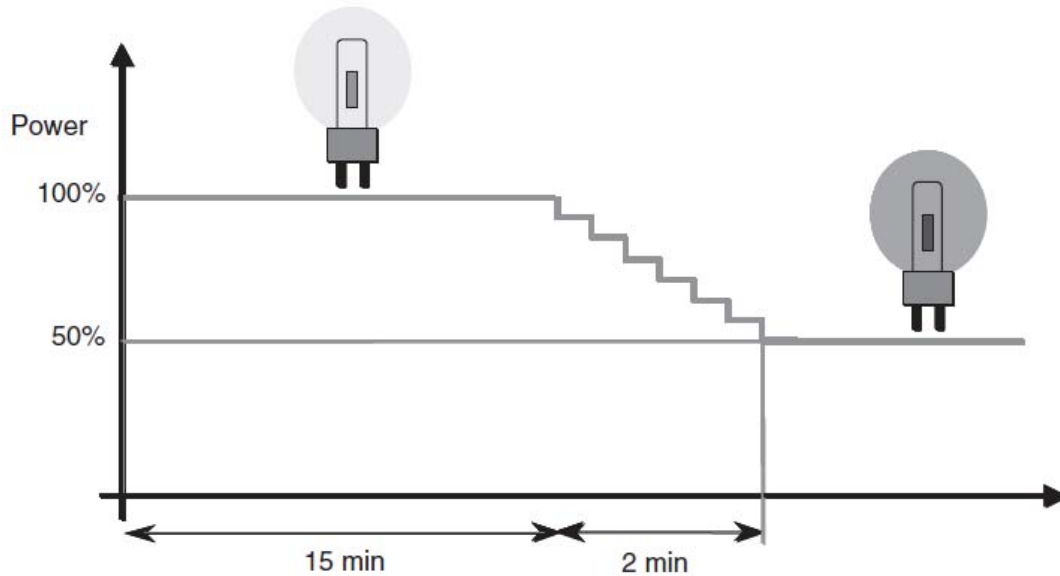


Figura 4 Diagramma con andamento a gradini per la riduzione del flusso luminoso.

La variazione dell'efficienza delle lampade (Figura 5), misurate tra 100 e 1.000 ore di funzionamento, non mostrano significative variazioni (variazioni nell'intervallo 5.5%-6.3%).

La lampada mostra invece una significativa riduzione della propria efficienza luminosa 90 lm/W tra la potenza nominale (150 W) e il massimo regime di riduzione della potenza (70 W) dove l'efficienza si riduce al valore di 65-70 lm/W.

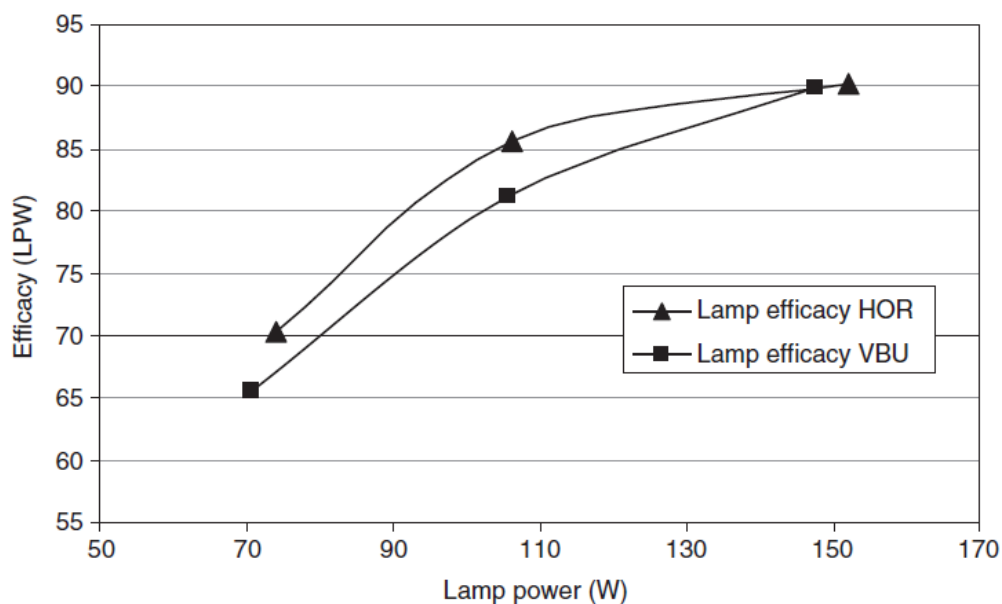


Figura 5 Variazione dell'efficienza luminosa per una lampada a ioduri metallici con bruciatore ceramico 150 W a 4000K in funzione della potenza di lampada. Sono state considerate due posizioni di funzionamento orizzontale e verticale.

Per quanto riguarda invece il mantenimento del valore del flusso luminoso nel tempo per lampade fatte funzionare a diversi regimi di parzializzazione del flusso, si osserva che la riduzione della potenza non compromette le caratteristiche di mantenimento del flusso nel tempo (Figura 6). Tutte le lampade, misurate a 150 W dopo essere state fatte funzionare a diversi regimi di potenza ridotti, mostrano un flusso residuo di circa il 60% di quello iniziale dopo 11.000 ore di funzionamento. Il tasso di sopravvivenza delle lampade è di circa il 65% a 11.000 ore.

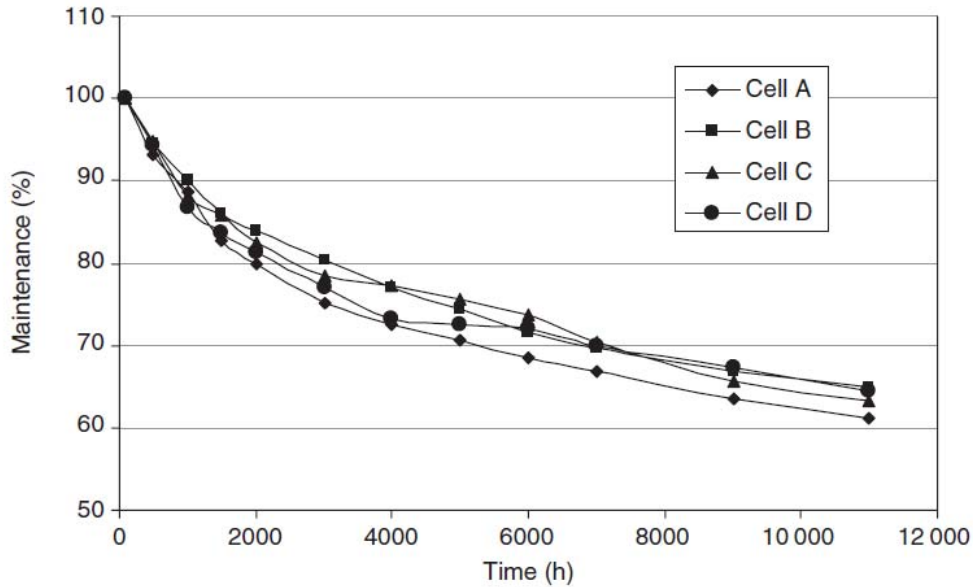


Figura 6 Variazione del mantenimento del flusso luminoso nel tempo per lampade del gruppo A (funzionanti a 150 W), B (funzionanti a 70W), C (dimmerate a 76 W da 150 W per il 50% del tempo), D (riduzione a 100 W da 150 W per il 50% del tempo). Tutte le lampade sono state misurate alla potenza di 150 W.

Per quanto riguarda le variazioni delle CCT in funzione delle potenze tra 100 e 11.000 ore di funzionamento (Figura 7), si osserva una differenza nell'andamento per le lampade fatte funzionare in modo continuo al 50% della potenza.

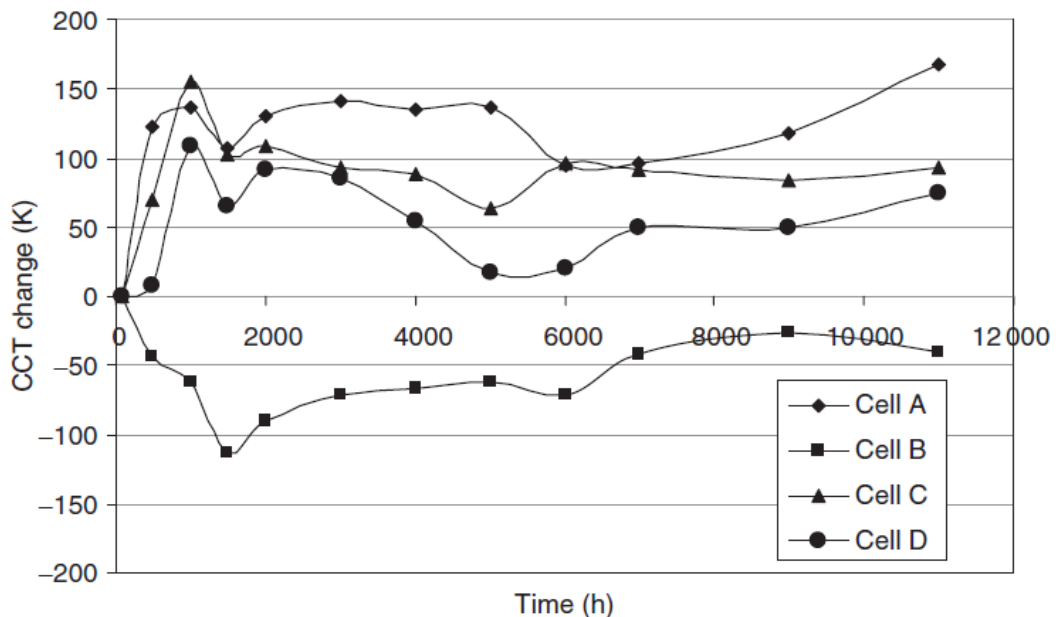


Figura 7 Variazione della CCT in funzione delle ore di funzionamento per il gruppo A (lampade funzionanti a 150 W), B (operanti a 70W), C (dimmerate a 76 W da 150 W per il 50% del tempo) D (riduzione a 100 W da 150 W per il 50% del tempo). Tutte le lampade sono state misurate alla potenza di 150 W.

L'andamento dell'indice di resa cromatica (CRI) in funzione delle ore di funzionamento, non mostra variazioni significative nel tempo, né variazioni dipendenti dal regime di funzionamento delle lampade (Figura 8).

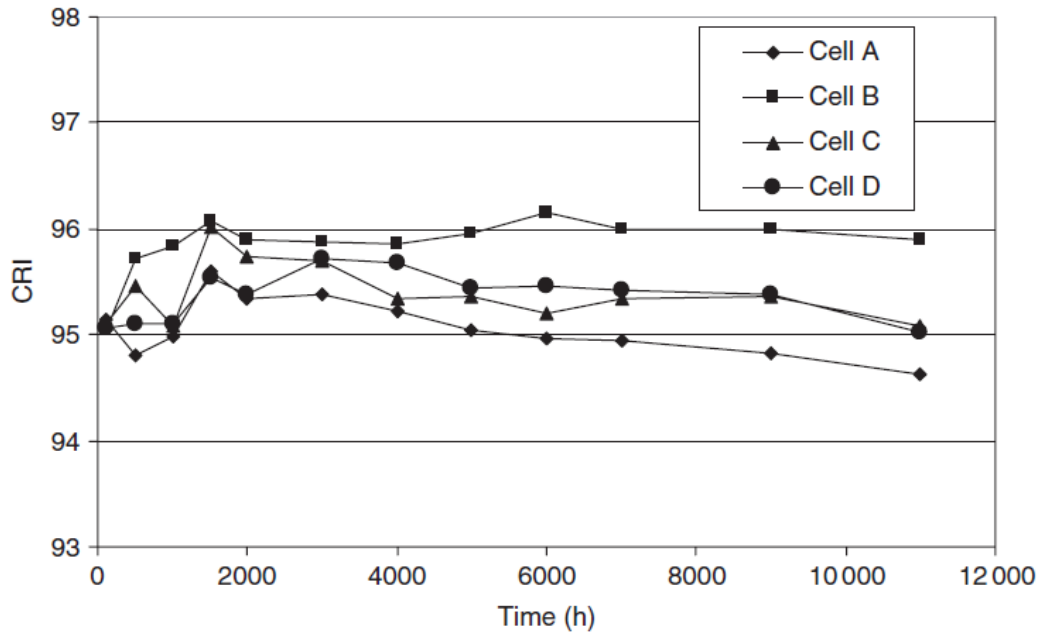


Figura 8 Variazione dell'indice CRI in funzione delle ore di funzionamento per il gruppo A (lampade funzionanti a 150 W), B (operanti a 70W), C (dimmerate a 76 W da 150 W per il 50% del tempo), D (riduzione a 100 W da 150 W per il 50% del tempo). Tutte le lampade sono state misurate alla potenza di 150 W.

Le lampade a ioduri metallici mostrano un aumento della tensione di lampada nel corso della loro vita la cui causa è da ricercarsi nell'erosione degli elettrodi all'interno del tubo di scarica.

Anche se gli alimentatori elettronici consentono un controllo della potenza elettrica su un intervallo ampio di tensioni di lampada, maggiore di quello di un alimentatore elettromagnetico tradizionale, la tensione di lampada non deve superare il limite superiore di progetto dell'alimentatore. È quindi necessario quantificare ogni aumento della tensione di lampada come effetto del funzionamento a regime ridotto di potenza.

Occorre inoltre verificare che il funzionamento prolungato della lampada, ad un regime di potenza ridotto, non determini un incremento della tensione di lampada oltre i limiti di funzionamento per i quali l'alimentatore è stato progettato.

Dall'esame dei dati, si osserva che l'andamento della tensione di lampada tra 500 h e 9.000 h, rispetto al valore a 100 h del gruppo B (funzionamento delle lampade a potenza ridotta a 70 W) è significativamente diverso dagli andamenti degli altri gruppi di lampade (Figura 9).

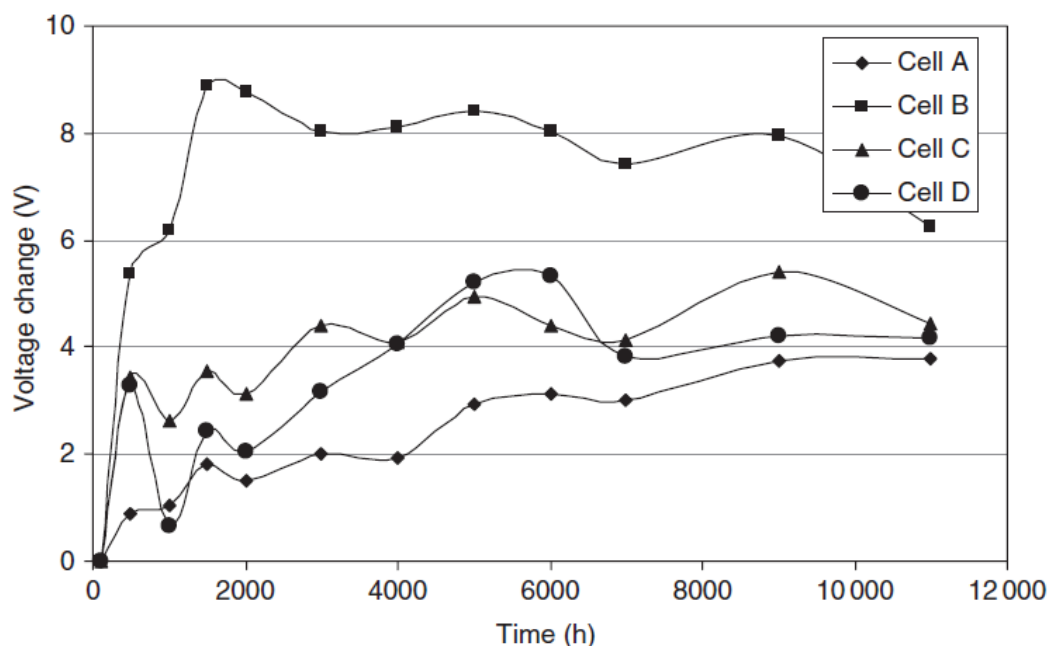


Figura 9 Variazione della tensione di alimentazione in funzione delle ore di funzionamento per il gruppo A (lampade funzionanti a 150 W), B (operanti a 70W), C (dimmerate a 76 W da 150 W per il 50% del tempo), D (riduzione a 100 W da 150 W per il 50% del tempo). Tutte le lampade sono state misurate alla potenza di 150 W.

A 11.000 h di funzionamento le tensioni delle lampade del gruppo B non sono significativamente differenti dalle altre; inoltre tutti gli aumenti di tensione delle lampade del gruppo B, si sono mantenuti all'interno dell'intervallo di variazione previsto per l'alimentatore elettronico impiegato.

Dall'esame dei risultati, si può quindi concludere che il funzionamento a regime ridotto di potenza delle lampade a ioduri metallici con bruciatore ceramico, testate per 11.000 ore, non ha avuto un significativo impatto sul tasso di sopravvivenza e sul mantenimento del flusso luminoso nel tempo.

Il funzionamento prolungato al 50% della potenza ha prodotto un significativo impatto sulla temperatura di colore delle sorgenti, quando fatte funzionare alla potenza nominale di 150 W.

Le lampade fatte funzionare in modo continuo al 50% della potenza, hanno mostrato un aumento della tensione di lampada tra 500 e 11.000 ore di funzionamento rispetto alle lampade fatte funzionare alla potenza nominale e quelle fatte funzionare per il 50% del tempo alla potenza nominale e per il restante periodo alla massima potenza.

La Figura 10 mette in relazione il valore della potenza di lampada con il flusso luminoso, per diverse modalità di funzionamento ridotto.

Actual lamp power (W)	Lamp orientation	Light output	Relative to full light output (%)	Relative to rated lamp power (%)
76	VBU	5016	37	51
76	H	5320	39	51
100	VBU	8200	61	67
100	H	8500	63	67

Figura 10 Legame tra potenza e flusso luminoso per diversi valori del dimming.

Anche l'impiego di alimentatori elettronici che variano la frequenza di funzionamento per ottenere una variazione della potenza di lampada non sono esenti da problemi, primo tra tutti il fenomeno della risonanza quando la lampada

funziona ad alta frequenza. La risonanza, che dipende dalla temperatura del plasma e degli elettrodi, dalla geometria del tubo di scarica, può portare alla comparsa di fenomeni di flickering o alla distruzione della lampada stessa. Le difficoltà nascono dal fatto che le frequenze di risonanza cambiano durante la fase di start-up e anche durante la vita della lampada e perché dovrebbe essere possibile abbinare lampade con geometrie differenti e con diverse miscele allo stesso alimentatore.

La riduzione della potenza di lampada cambia la frequenza di risonanza a causa della variazione della temperatura del plasma⁹.

5. Regolatori di flusso luminoso centralizzati

Esistono diverse tecnologie con cui viene effettuata la regolazione della tensione di alimentazione di un impianto di illuminazione:

- elettromeccanica;
- completamente elettronica.

La prima si basa sull'impiego di un autotrasformatore variabile e di un trasformatore booster in serie alla linea di alimentazione; la stabilizzazione della tensione di uscita è ottenuta variando il rapporto del trasformatore in serie alla linea, fornendo attraverso un autotrasformatore variabile collegato ad un servomotore, una tensione additiva e sottrattiva all'avvolgimento primario, necessario per portare la tensione nei limiti di uscita prefissati.

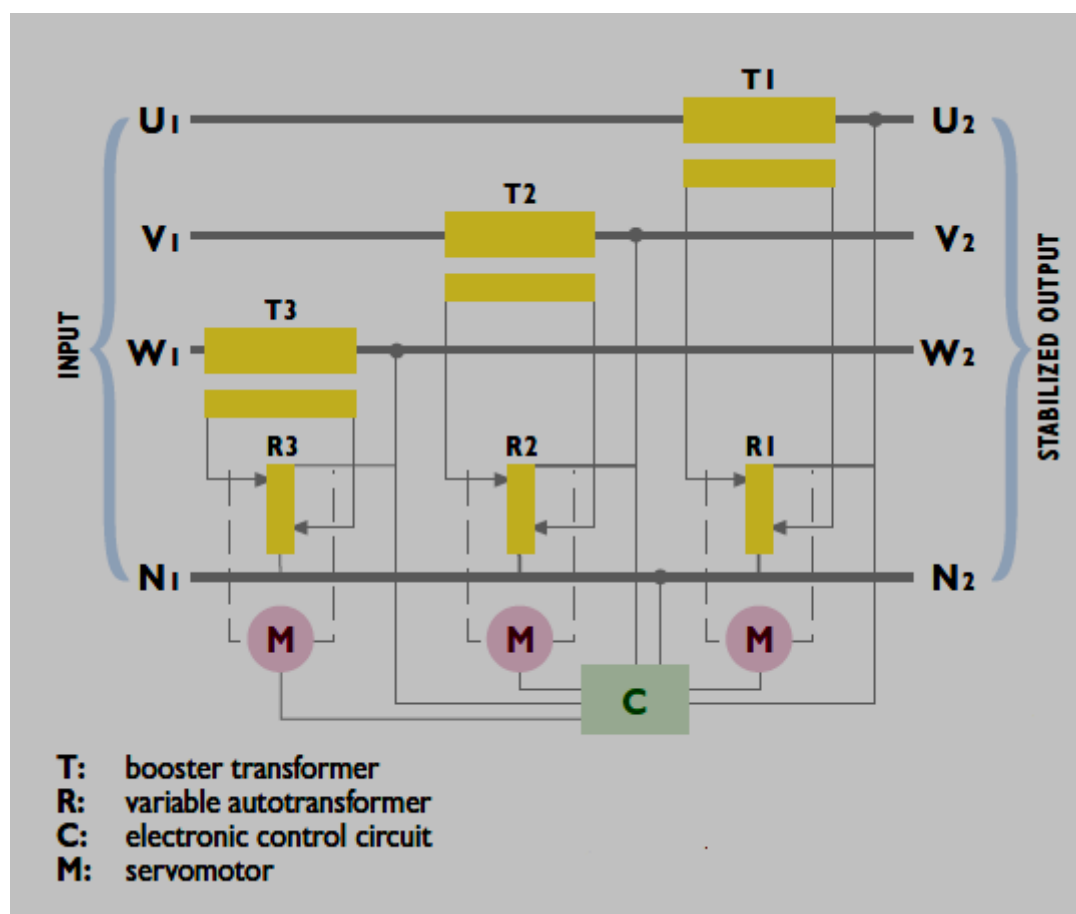


Figura 11 Principio di funzionamento di un regolatore elettromeccanico¹⁰.

La stabilizzazione avviene sul vero valore efficace e quindi è indipendente da eventuali distorsioni armoniche presenti sulla rete.

⁹ "High Intensity Discharge lamps Technical Information on reducing the wattage", OSRAM

¹⁰ IREM Stabilux, "Regolatori di Flusso Luminoso IL RISPARMIO DIVENTA INTELLIGENTE"

In caso di guasto nella parte di regolazione e/o controllo, le lampade continueranno a rimanere in servizio.

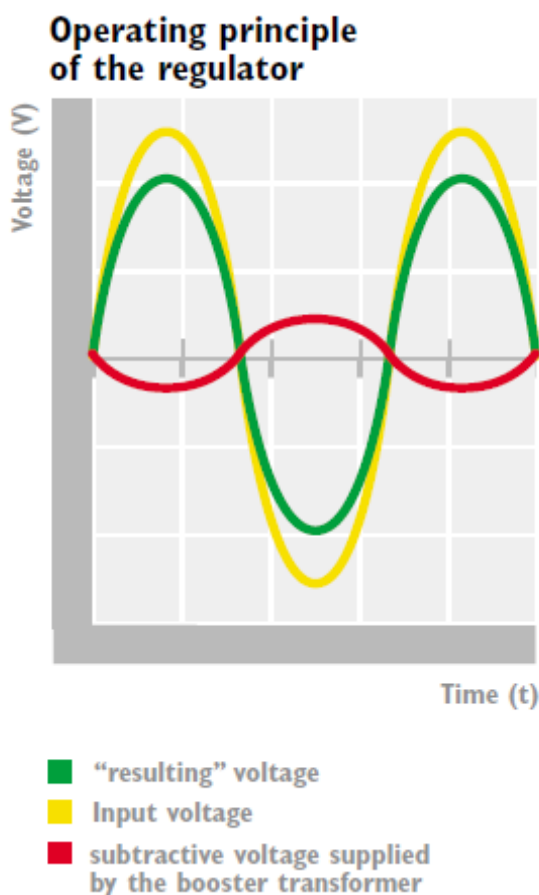


Figura 12 Applicazione di una tensione di correzione in sottrazione a quella presente all'ingresso del regolatore¹¹.

La distorsione armonica introdotta, a differenza di alcuni sistemi di regolazione completamente elettronica, è molto contenuta, entro lo 0.2% in ogni condizione di carico; le perdite nel regolatore sono basse (il costruttore "dichiara" un rendimento del 98%¹²).

La velocità di compensazione delle variazioni di rete è buona, si compensa la tensione di uscita rispetto al suo valore nominale in modo sufficientemente rapido (<40 ms/volt) e senza continue oscillazioni. La tensione di uscita è stabile entro il $\pm 1\%$ del valore nominale.

Necessita il rispetto dei piani di manutenzione previsti per il costruttore per le parti mobili (autotrasformatore e motore).

I regolatori completamente elettronici della nuova generazione funzionano sul principio del controllo del taglio di fase, utilizzando come componente di potenza gli IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)¹³.

La tecnologia Adaptive Waveform Intersection (AWI), controlla il livello di parzializzazione applicando lo spegnimento degli IGBT solo durante la fase discendente della sinusoide positiva dell'alimentazione (lo stesso si fa durante la fase ascendente di quella negativa). In questo modo, nella fase critica della riaccensione dell'arco, che si ha nella fase ascendente della positiva e in quella discendente della negativa, viene sempre applicata alla lampada la tensione di rete, qualunque sia il livello di parzializzazione richiesto.

¹¹ IREM Stabilux, "Regolatori di Flusso Luminoso IL RISPARMIO DIVENTA INTELLIGENTE"

¹² IREM Stabilux, "Regolatori di Flusso Luminoso IL RISPARMIO DIVENTA INTELLIGENTE"

¹³ Brochure di sintesi tratta dal Catalogo Generale Regolatori di flusso luminoso e Sistemi di Telegestione, Reverberi Entec

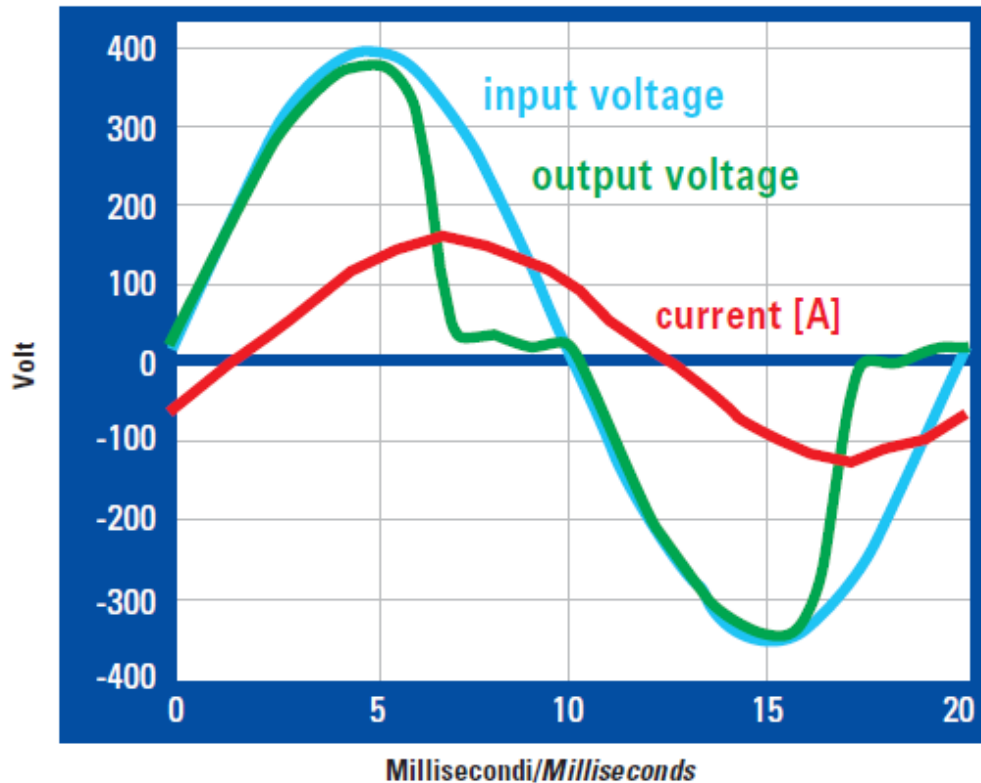


Figura 13 Funzionamento di un regolatore in tecnologia AWI.

L'applicazione della tensione di rete piena, fino alla riaccensione dell'arco, permette di superare i problemi di invecchiamento delle lampade e al conseguente aumento della tensione d'arco.

La strategia di controllo della tensione di uscita, in questo tipo di regolatori, è adattiva in quanto la sequenza di accensioni e spegnimenti degli IGBT dipende dalla corrente del carico, dal suo sfasamento, dal tipo di lampada e dal fattore di potenza a valle del regolatore.

In letteratura non esistono dati che consentano di confrontare le performance di questi due tipi di regolatori in riferimento alla durata delle lampade e al mantenimento del flusso luminoso nel tempo; il confronto tra i due sistemi potrebbe essere fatto solo in termini di costo di investimento, oneri di manutenzione e tempo necessario a ripagare l'investimento.

Vi è una notevole differenza tra i dati di mortalità e mantenimento del flusso residuo, per lampade a scarica nei gas, effettuati in laboratorio e quelli derivanti dall'esercizio in assenza di regolazione della tensione di alimentazione: i costruttori di lampade affermano, ad esempio, che le lampade al sodio ad alta pressione possono arrivare fino a 23.000 ore di funzionamento, con un decadimento del flusso luminoso entro il 30% del valore iniziale (Figura 15).

Lamp type: Mercury Lamp

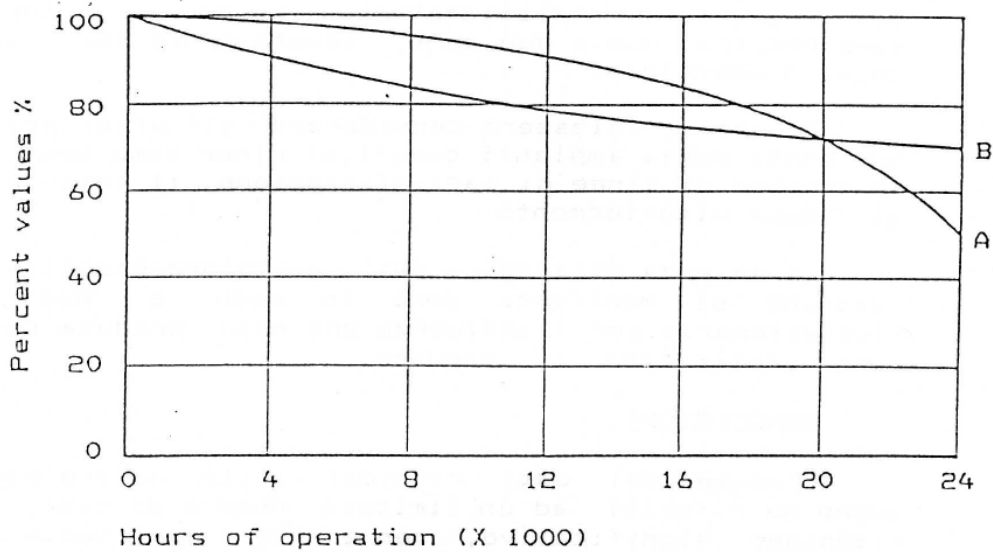


Figura 14 Dati dichiarati dal costruttore e riferiti a prove di laboratorio per lampade a vapori di Mercurio. A: curva di mortalità delle lampade, B: curva di mantenimento del flusso luminoso.

Lamp type: High Pressure Sodium

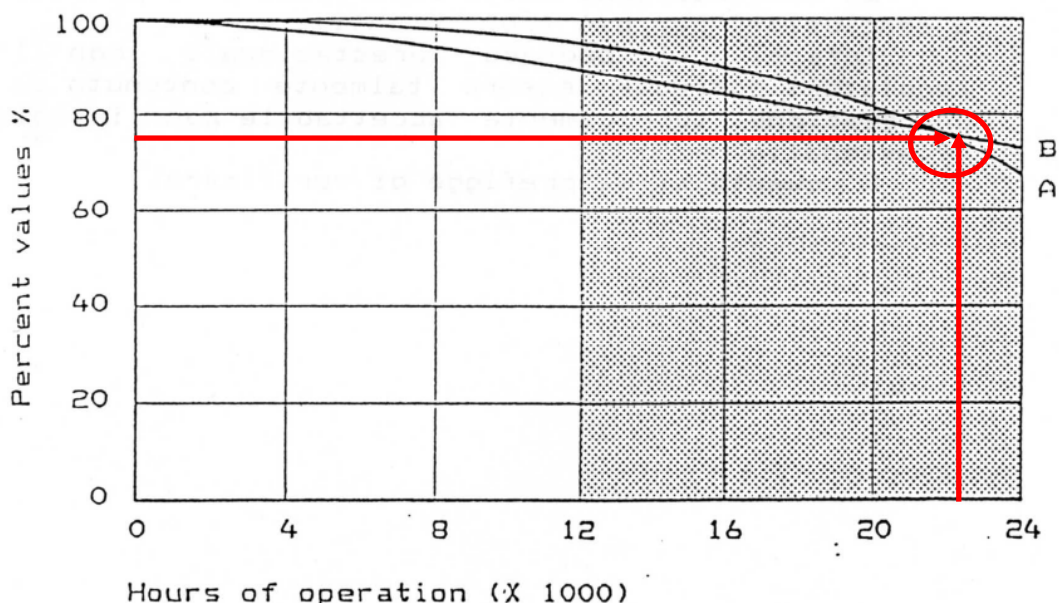


Figura 15 Dati dichiarati dal costruttore e riferiti a prove di laboratorio per lampade a vapori di Sodio alta pressione. A: curva di mortalità delle lampade, B: curva di mantenimento del flusso luminoso.

La differenza tra dati di laboratorio e dati di esercizio è notevole e le cause possono essere ricercate nei seguenti fattori :

- ✓ Effetto specchio: parte della radiazione luminosa viene riflessa sul bruciatore della lampada con effetti negativi sulla durata.
- ✓ Perdita di amalgama (miscela dei gas presenti nella lampada).

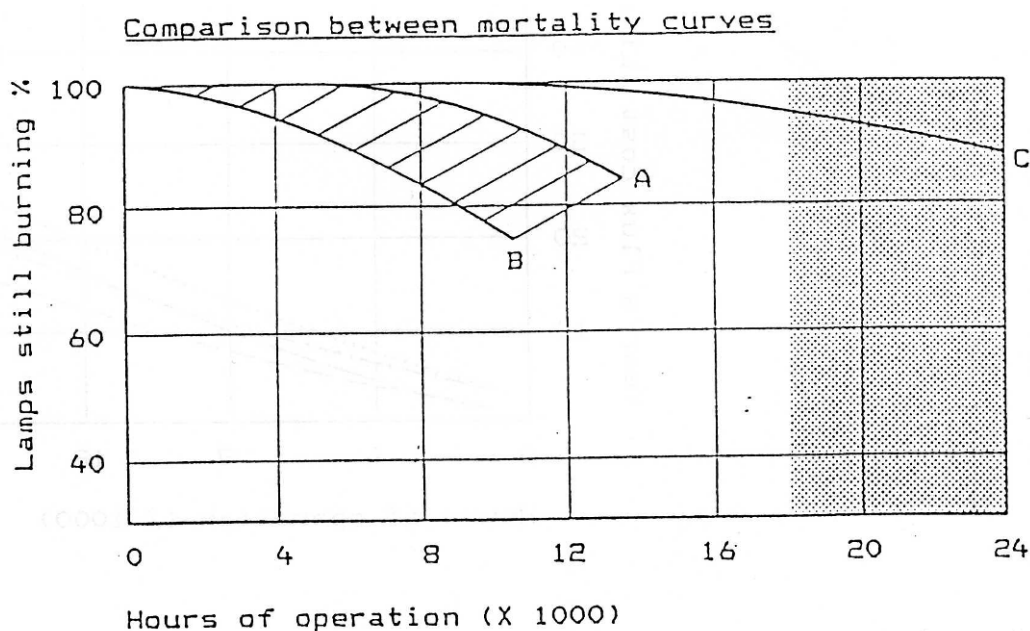
- ✓ Gruppo di alimentazione non idoneo.
- ✓ Eccesso di tensione di alimentazione.

Le reti di alimentazione pubbliche garantiscono, sulla tensione di fornitura, una tolleranza che va da -10% al +10% e una tensione di alimentazione troppo alta è una tra le cause più importanti di premorienza della lampade.

Per contro, in esercizio, in assenza di regolazione della tensione di alimentazione, il ricambio delle lampade a programma viene effettuato, dalla maggior parte dei gestori, nell'intorno delle 8000 ore di funzionamento, in quanto, in quel momento, queste hanno già perso il 30% del proprio flusso luminoso¹⁴.

Sulla base della scarsa bibliografia disponibile¹⁵, gli effetti dei regolatori di flusso possono essere così schematizzati:

- risparmio energetico dovuto alla riduzione della tensione di alimentazione nelle ore profonde della notte; il legame tra potenza assorbita e flusso emesso dalle lampade funzionanti a regime ridotto, dipende dal tipo di sorgente impiegata e dalla sua potenza;
- maggiore durata delle lampade, in termini di riduzione del numero di esemplari che vanno fuori servizio;
- maggiore stabilità del flusso luminoso nel tempo, che offre la possibilità di effettuare un ricambio lampade a intervalli più lunghi (che dipende dal tipo e dalla potenza delle sorgenti luminose impiegate).



A: Upper limit without regulator

B: Lower limit without regulator

C: With regulator

Figura 16 Curve di mortalità per lampade al sodio alta pressione, con e senza l'impiego di regolatori¹⁶.

¹⁴ Enrico Losi, Marco Venturi, "I Regolatori di flusso nell'alimentazione dei circuiti di Pubblica Illuminazione", Luce N1/94 pag. 52-55

¹⁵ Enrico Losi, Marco Venturi, "I Regolatori di flusso nell'alimentazione dei circuiti di Pubblica Illuminazione", Luce N1/94 pag. 52-55

¹⁶ Enrico Losi, G. Carlo Borelli, "Impianti di illuminazione con lampade a scarica: nuove strategie", IV° Congresso Internazionale AIDI, Taormina 24-26 Ottobre 1990

5.1 Considerazioni conclusive sulla durata e mortalità della lampada

Sulla base delle informazioni reperite in letteratura¹⁷, si può affermare che:

- per lampade al sodio ad alta pressione, impiegate in assenza di regolatore, il ricambio lampade dovrebbe essere operato ogni 3 anni di funzionamento, cioè dopo circa 12.000 ore, dove il flusso residuo della lampada può oscillare tra 70% il e il 75% di quello iniziale. La mortalità delle lampade oscilla tra un minimo del 15% e un massimo del 26% (Figura 16) .

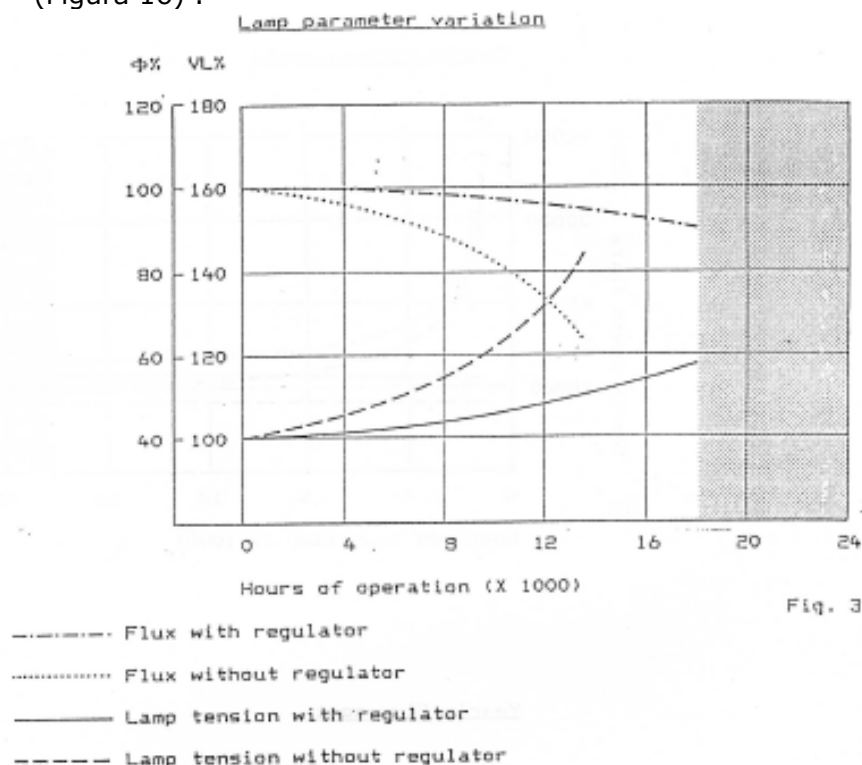


Figura 17 Andamento del flusso residuo e tensione di lampada in presenza e in assenza della regolazione della tensione di alimentazione.

- per lampade al sodio ad alta pressione da 100W con l'impiego di regolatori di prima generazione, il ricambio potrebbe situarsi tra le 16.000 e 18.000 ore di funzionamento;
- per lampade al sodio ad alta pressione da 150 W, l'impiego di regolatori di flusso consentirebbe di spostare il ricambio delle lampade a 24.000 ore di funzionamento (equivalenti a circa 6 anni solari), con un flusso residuo molto elevato pari a circa 80% di quello iniziale (Figura 17). La mortalità di tali lampade si è ridotta al 5% (Figura 16);
- per lampade al sodio ad alta pressione di potenza superiore, non sono stati, al momento, reperiti i dati, ma si potrebbe assumere i valori rilevati per le lampade da 150 W;
- ad oggi mancano informazioni circa la durata, con e senza regolatore delle lampade a ioduri metallici in abbinamento a sistemi di alimentazione ferromagnetica.

¹⁷ Ing. Enrico Losi (Direttore Tecnico A.M.C.M.), Ing. Marco Venturi (Capo Reparto Progetti e Costruzioni Impianti Elettrici A.M.C.M.), "I Regolatori di flusso nell'alimentazione di circuiti di Illuminazione pubblica", Convegno sul Tema "Problemi illuminotecnici in una città in provincia e in contesto rurale", Vercelli, Mercoledì 22 Settembre 1993

In linea generale potremmo assumere una vita media della lampada (al Sodio alta pressione) di 8.000 ore senza regolazione della tensione di alimentazione e una vita utile di 16.000 ore in presenza di regolatore di flusso luminoso¹⁸ (con flusso residuo di circa il 90% rispetto a quello iniziale, come mostrato dalla Figura 17). L'applicazione di un regolatore di flusso a un impianto con lampade ai vapori di mercurio è da sconsigliare, in quanto tali lampade non possono essere sottoalimentate oltre certi valori (190 V) e per massimizzare il risparmio è necessario inserire nell'apparecchio di illuminazione un dispositivo antispengimento (DAS) che ha l'effetto di aumentare la corrente di lampada evitando lo sfarfallio e lo spegnimento tipico dovuto alla sotto alimentazione di queste sorgenti (Figura 18). Si tratta quindi di una soluzione in grado di consentire il collegamento di pochi centri dotati di lampade ai vapori di mercurio ad un impianto di lampade al vapori di sodio ad alta pressione di cui si voglia ottenere un funzionamento a regime ridotto.

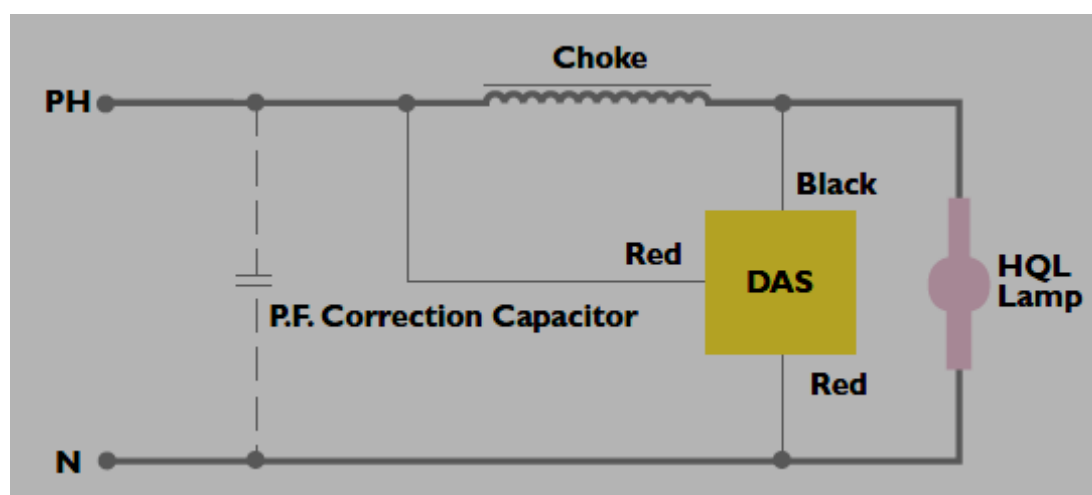


Figura 18 Schema di inserzione del dispositivo anti-spegnimento (gruppo RC) (Documento IREM).

Non sono disponibili in letteratura dei dati circa la maggior durata delle lampade ai vapori di mercurio, quando fatte funzionare con un regolatore di flusso (per altro si tratta di sorgenti ormai obsolete). In prima approssimazione potremmo assumere i dati che i costruttori di lampade forniscono, per questo genere di sorgenti, sul mantenimento del flusso luminoso nel tempo (approssimativamente 8000 h con il 90% del flusso luminoso residuo)¹⁹.

Per quanto riguarda la maggior durata delle componenti elettriche in presenza di regolatori di flusso, le uniche informazioni disponibili sono quelle delle provincie (Tabella 4), come nell'esempio sotto riportato.

Tabella 4 Telecontrollo, telesorveglianza e tele gestione degli impianti elettrici stradali della provincia di Bergamo.

Tabella 4.2 – interventi lungo l'Asse Interurbano anni 2003 – 2006

	2003	2004	2005	2006
Sostituzione lampade da 150/250W S.A.P.	574	634	94	90
Sostituzione di reattori	238	182	35	12
Sostituzione di accenditori	200	108	19	10
Sostituzione di condensatori	66	25	6	0
Interventi	37	19	4	1

■ = impiego dei regolatori di flusso telecontrollati (a regime da gennaio 2005)

¹⁸ IREM Stabilux, "Regolatori di flusso luminoso IL RISPARMIO DIVENTA INTELLIGENTE"

¹⁹ "Life behaviour of discharge lamps for general lighting -Support for planning maintenance", ZVEI Electric lamps

La tabella mostra l'andamento degli interventi manutentivi lungo l'Asse Interurbano (consistenza: 17 quadri elettrici – 1767 lampade) negli anni 2003 – 2006; anche in questo caso la scarsità di dati disponibili non consente l'estrapolazione di un risultato generale (quali tipi lampade sono installati, di quale potenza, quanto vecchi sono gli impianti su cui si è installato il regolatore, ecc).

Sulla base di queste informazioni, non è possibile però quantificare ed estendere ad altre situazioni il miglioramento apportato dall'introduzione dei regolatori di flusso, in quanto:

- ✓ non si hanno dati circa le ore di funzionamento degli impianti sui quali sono stati effettuati gli interventi;
- ✓ nulla si conosce sulle caratteristiche elettriche e sulla costruzione degli apparecchi (apparecchi molto economici potrebbero utilizzare alimentatori e accenditori con limiti delle temperature di funzionamento degli avvolgimenti troppo basse o essere dotati di un insufficiente sistema di smaltimento del calore, che unitamente alla tensione di alimentazione troppo elevata, ne hanno determinato una ridotta durata);
- ✓ nulla si conosce sugli interventi compiuti su tali impianti negli anni precedenti a quelli riportati.

Ciò che si può concludere è che la stabilizzazione della tensione di alimentazione produrrà degli effetti benefici sulla durata delle componenti elettriche in esercizio e quindi una diminuzione degli interventi straordinari di manutenzione sugli impianti; la quantificazione di questi risparmi non risulta tuttavia possibile sulla base delle informazioni ad oggi disponibili.

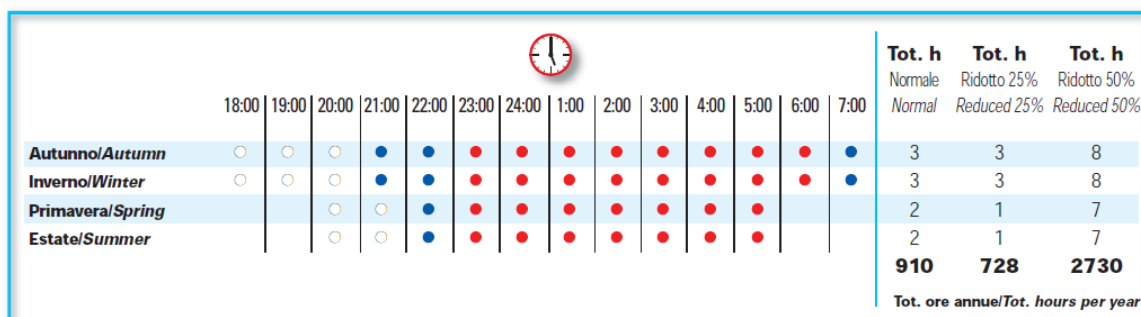
6. Cicli di riduzione del flusso luminoso

I regolatori di flusso luminoso permettono l'attivazione delle diverse categorie illuminotecniche di esercizio previste per un impianto.

Le modalità di regolazione del flusso luminoso dell'impianto sono definite dal progettista, che dovrà determinare la categorie illuminotecniche di esercizio (quella a cui corrisponde il massimo flusso luminoso dell'impianto e quelle a cui corrispondono le parzializzazioni) e le modalità di commutazione tra l'una e l'altra. Una possibile strategia di commutazione è quella di far coincidere la variazione della categoria illuminotecnica di esercizio con le variazioni del flusso di traffico nelle diverse fasce orarie di funzionamento dell'impianto.

La norma UNI 11248 prevede al massimo due o tre categorie illuminotecniche compresa quella di partenza.

Aree urbane/Urban areas.



Legenda: ○ lampade accese al 100% ● lampade accese al 75% ● lampade accese al 50%
 Legend: ○ lamp 100% on ● lamp dimming at 75% ● lamp dimming at 50%

Figura 19 Schema delle riduzioni di flusso luminoso (75% e 50%) nelle diverse ore della notte per ciascuna stagione dell'anno.

Dall'esame della Figura 19, si osserva che gli orari di parzializzazione dell'impianto variano con le stagioni; sono inoltre previsti due livelli di

parzializzazione (75% e 50% del flusso luminoso nominale a piena tensione di alimentazione).

La possibilità di utilizzare le riduzioni di flusso luminoso deve essere valutata dal progettista dell'impianto in accordo a quanto previsto dalla norma UNI 11248. Sono ormai parecchie le provincie e i comuni che rendono disponibili in rete i dati riguardanti i flussi di traffico delle principali strade provinciali o di alcune tratti stradali comunali scelti in modo che siano rappresentativi dell'andamento del flusso di traffico che giornalmente attraversa la città.

A titolo di esempio si riportano i dati del flusso di traffico nel tempo registrati in provincia di Roma sulla S.P.101/a Albano-Torvaianica, nel periodo di osservazione 25/5/2008 al 26/5/2008 (Figura 20); sulla base delle intensità del flusso di traffico nelle ore notturne, il progettista dell'impianto dovrebbe scegliere le eventuali riduzioni del flusso luminoso dell'impianto.

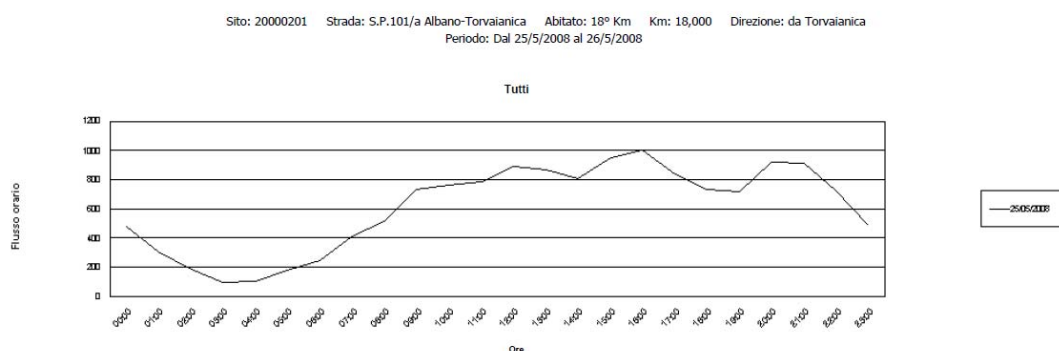


Figura 20 Flusso del traffico nel tempo lungo la SP 101/a Albano-Torvaianica.

Dall'analisi del grafico, emerge che la riduzione del traffico al di sotto del 50% del massimo (circa 1.000 veicoli/h) si ha solo nelle ore profonde della notte, approssimativamente tra la mezzanotte e le 6.00 del mattino.

Considerando i flussi di traffico all'interno di un centro urbano, si ha l'andamento mostrato in Figura 21²⁰.

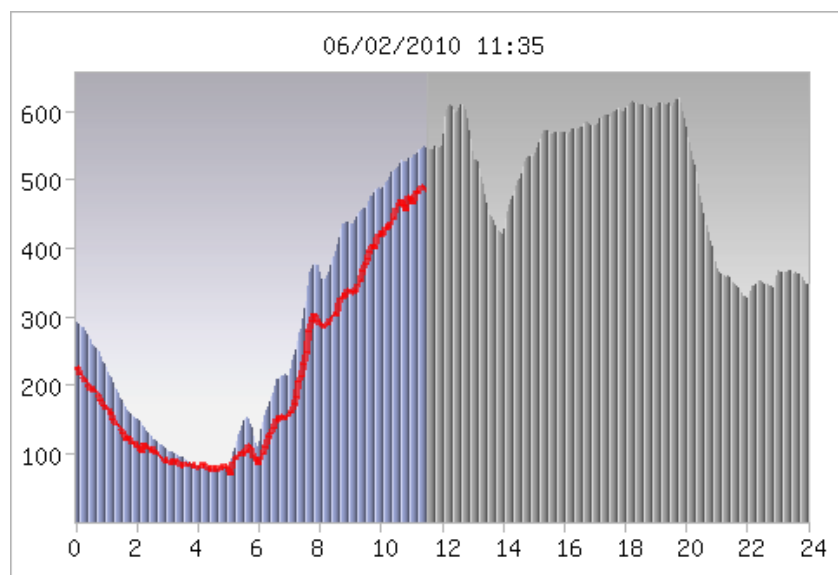


Figura 21 Il grafico riporta i flussi veicolari espressi in veicoli all'ora e misurati dal sistema di controllo del traffico di 5T nelle varie ore del giorno confrontati con l'andamento del "giorno tipo" (Torino).

In colore rosso vi è l'andamento del flusso di traffico giornaliero (dato reso disponibile on-line dal comune di Torino), mentre in colore azzurro vi è la situazione media del giorno tipo.

²⁰ <http://www.5t.torino.it/5t/it/traffico/flussi.jsp>

Il flusso veicolare è il valore medio su un generico tratto di strada per un senso di marcia ed è calcolato facendo la media delle misure provenienti da circa 1.500 sensori (spire) posti su circa 500 sensi di marcia nell'area controllata dal Sistema 5T.

Il "giorno tipo" è definito da:

- giorno della settimana;
- periodo scolastico o non scolastico.

Anche in questo caso la riduzione del 50% del flusso di traffico, rispetto al suo valore di picco, si ha solo nelle ore che vanno dalla mezzanotte alle 8.00 del mattino.

I due esempi riportati, vogliono mostrare come si debba prestare attenzione ad applicare in maniera acritica uno schema di riduzione del flusso luminoso che non sia basato su informazioni specifiche relative alla zona dell'intervento.

Le percentuali di riduzione della potenza elettrica del complesso lampada e alimentatore, corrispondenti ad una riduzione del flusso luminoso del 75% e del 50% dipendono dalla sorgente impiegata nell'impianto.

Il calcolo dell'energia (E) annua (kWh) assorbita dall'impianto in presenza di un programma di riduzione di flusso luminoso nelle ore centrali della notte, è dato dalla seguente relazione:

$$E = (P_{100\%} * N_{100\%} + P_{75\%} * N_{75\%} + P_{50\%} * N_{50\%}) * (1 / \eta_{regolatore})$$

dove :

$P_{100\%}$ è la potenza elettrica complessiva dell'impianto senza alcuna riduzione di flusso luminoso delle lampade, comprensiva delle perdite dell'alimentatori delle lampade (kW).

$P_{75\%}$ è la potenza elettrica complessiva dell'impianto con flusso ridotto al 75%, comprensiva delle perdite dell'alimentatori delle lampade (kW).

$P_{50\%}$ è la potenza elettrica complessiva dell'impianto con flusso ridotto al 50%, comprensiva delle perdite dell'alimentatori delle lampade (kW).

$N_{100\%}$: numero delle ore annue in cui l'impianto funziona alla massima potenza (con riferimento alla Figura 19, $N_{100\%}=910$ h annue).

$N_{75\%}$: numero delle ore annue in cui l'impianto funziona con un regime di flusso ridotto al 75% (con riferimento alla Figura 19, $N_{75\%}=728$ h annue).

$N_{50\%}$: numero delle ore annue in cui l'impianto funziona con un regime di flusso ridotto al 50% (con riferimento alla Figura 19, $N_{75\%}=2730$ h annue).

$\eta_{regolatore}$: rendimento del regolatore (vedi paragrafo precedente). Si può assumere, come valore indicativo il valore che oscilla tra 0.96-0.98. Il rendimento dipende dal fattore di carico.

Il numero complessivo delle ore di funzionamento dell'impianto è di 4.368 h/annue, in accordo con il valore standard di 4.400 h/annue.

Considerando, ad esempio, una lampada al sodio alta pressione da 100 W e volendo applicare entrambe le riduzioni del flusso luminoso previste dalla Figura 19, la relazione che esprime l'energia elettrica (kWh) complessivamente assorbita dall'impianto in un anno di esercizio, diventa:

Lampada SAP 100 W/HPS lamp 100 W

Tensione/Voltage	Potenza/Power	Φ Flux. %	Potenza/Power %
250	141	136,1	128,2
240	126	118,4	114,5
230	110	100,0	100,0
220	101	87,8	91,8
210	90	74,1	81,8
200	81	64,6	73,6
190	73	54,4	66,4
180	65	44,9	59,1

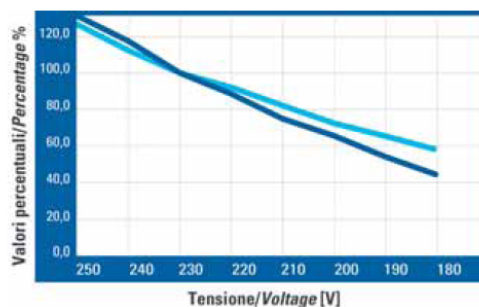


Figura 22 Tabella di sottoalimentazione di una lampada al sodio alta pressione da 100W²¹.

²¹ Documentazione Reverberi

$$E = (100 \cdot 910 + 81.8 \cdot 728 + 66.4 \cdot 2730) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{regolatore}}} \right)$$

Per dettagli si rimanda alla tabella .xls di sottoalimentazione delle lampade, in allegato alla presente relazione.

Si ottengono quindi 3.318²² ore equivalenti annue con una riduzione dell'energia impiegata di circa il 32% (non considerando la potenza dissipata dal regolatore), considerando un periodo di funzionamento annuo dell'impianto pari a 4.368 h.

In generale il calcolo si svolge secondo i seguenti passi:

- ✓ Determinazione delle categorie illuminotecniche di esercizio;
Si consideri il seguente esempio:
 ME1 (100% del flusso)
 ME2 (flusso parzializzato 0.75)
 ME3a (flusso parzializzato 0.5)
- ✓ Determinazione delle frazioni di flusso luminoso iniziale per le due parzializzazioni previste nel progetto;
- ✓ Determinazione della potenza elettrica per ciascun livello parzializzato, corrispondente ai valori di flusso luminoso, che dipende dal tipo e dalla potenza della sorgente impiegata;
Per le lampade al sodio ad alta pressione con potenze comprese tra 100 e 600 W, la tabella da utilizzare è la seguente:

Tabella 5 Corrispondenza flusso e potenza elettrica attiva per apparecchi con lampade SAP 100-600W.

Frazione di flusso luminoso	Apparecchi illuminanti con lampade SAP 100W	Apparecchi illuminanti con lampade SAP 150W	Apparecchi illuminanti con lampade SAP 250W	Apparecchi illuminanti con lampade SAP 600W
	Potenza attiva (W)	Potenza attiva (W)	Potenza attiva (W)	Potenza attiva (W)
[%]	(W)	(W)	(W)	(W)
1.00	113	169	305	640
0.75	92	140	238	505
0.67	86	131	216	451
0.60	80	123	200	426
0.50	72	112	174	373

- ✓ Determinazione dei cicli di funzionamento dell'impianto (stabilendo, ad esempio, un legame con il flusso del traffico, nelle diverse ore della notte).

Ciclo								
Ora di inizio	Estate				Inverno			
	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄	
	Frazione di flusso luminoso	Durata in ore	Frazione di flusso luminoso	Durata in ore	Frazione di flusso luminoso	Durata in ore	Frazione di flusso luminoso	Durata in ore
20.30	1.00	2.0	1.0	3.0	1.0	5	1.00	6
22.30	0.75	1.0			0.75	1		
23.30	0.50	5.0	0.667	5.5	0.50	6	0.67	6
4.30	0.75	0.5			0.75	1		

²² Numero di ore annue di funzionamento delle lampade al 100% della potenza, a parità di consumo annuo, supponendo il rendimento del regolatore unitario.

5.30	1.00	0.5	1.0	0.5	1.00	1	1.00	2
------	------	-----	-----	-----	------	---	------	---

- ✓ Calcolare l'energia impiegata per un ciclo di funzionamento (*supponendo che ci si trovi nella stagione invernale e gli apparecchi dell'impianto montino lampade al sodio alta pressione da 250W e che l'impianto sia costituito da $N_{lampade}$ tutte uguali*)

$$E = N_{lampade} * (P_{100\%} * N_{100\%} + P_{75\%} * N_{75\%} + P_{50\%} * N_{50\%} + P_{75\%} * N_{75\%} + P_{100\%} * N_{100\%}) * (1/\eta_{regolatore})$$

$$E[Wh] = (1/\eta) * (5.0 * 305 + 1.0 * 238 + 6.0 * 174 + 1.0 * 238 + 1.0 * 305) * N_{lampade}$$

Il significato dei simboli $P_{100\%}, P_{75\%}, P_{50\%}, N_{100\%}, N_{75\%}, N_{50\%}$ della formula precedente è quello già riportato all'inizio del paragrafo, mentre $\eta > 96\%$ rappresenta il rendimento del regolatore, assunto indipendente dal carico

Per la valutazione del risparmio (R) ottenuto dall'impiego di un regolatore, si può utilizzare la seguente relazione²³:

$$R = \frac{\text{energia/energy}}{\text{kWh}} \left(P_a \times t_f \times Re\% \times \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) + \frac{\text{manutenzione/maintenance}}{\text{kWh}} \left(N_L \times \left[\frac{(Cl + Cm)}{t_2} - \frac{(Cl + Cm)}{t_1} \right] \times t_f \right) + \frac{\text{stabilizzazione/stabilization}}{\text{kWh}} \left(P_a \times Rs\% \times t_f \times \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)$$

R : Risparmio conseguibile.

P_a : Potenza totale assorbita dall'impianto kW.

t_f : Numero di ore annue di funzionamento a regime ridotto.

$Re\%$: Percentuale risparmio energia per funzionamento a regime ridotto.

€/kWh costo di un kWh di energia elettrica.

Cl : costo acquisto lampada in euro.

Cm costo della sostituzione per ogni lampada (costo di manodopera) in euro.

t_2 durata media senza regolatore di flusso (in ore) (default 8.000 h).

t_1 durata media delle lampade con stabilizzatore (in ore) (16.000h).

$Rs\%$ percentuale annua di risparmio energia elettrica per stabilizzazione (7/8% annuo).

t_f Numero ore annue di funzionamento.

N_L : numero delle lampade.

²³ Documentazione Reverberi

7. Apparecchi a led

Il led viene spesso presentato, nei documenti pubblicitari di alcuni costruttori di apparecchi, come un dispositivo semiconduttore con una vita media utile di 50.000÷100.000 ore, ma una simile affermazione spesso non è completamente vera.

Non si esclude infatti che un dispositivo possa funzionare per un tale periodo, ma con questa informazione non si fornisce alcuna informazione, sulla quantità di luce disponibile in quell'arco di tempo, né se l'apparecchio avrà cessato di funzionare in modo efficace.

Ci sono molti fattori che contribuiscono a determinare la durata in vita di un led, ma i due principali sono la temperatura di giunzione durante il funzionamento (T_j) e la corrente di alimentazione del dispositivo (I_F).

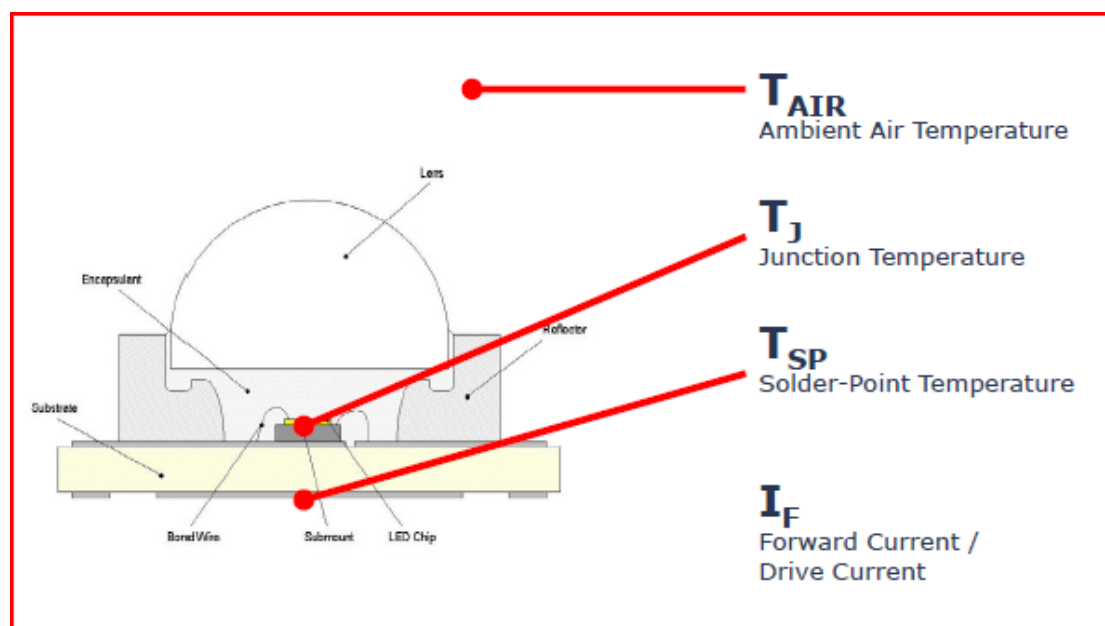


Figura 23 Punti di misura e di valutazione delle temperature di un led²⁴.

La corrente I_F è la quantità di corrente che fluisce all'interno del led quando funziona polarizzato direttamente, tipicamente espressa in mA.

La tensione V_F è la caduta di tensione ai capi del led quando funziona polarizzato direttamente, misurata in Volt.

La temperatura dell'aria (T_{AIR}) è la temperatura dell'aria che circonda le immediate vicinanze del led; in generale questa temperatura viene misurata al di fuori dell'angolo di apertura del fascio luminoso.

La temperatura T_j è la temperatura della giunzione all'interno del led; la misura diretta di tale grandezza è alquanto difficoltosa e può facilmente condurre a risultati errati.

A tale scopo, la sua determinazione avviene attraverso una relazione matematica che lega T_{SP} , V_F e I_F , che assume la seguente forma:

$$T_j = T_{SP} + (R_{th-j-p} \cdot V_F \cdot I_F)$$

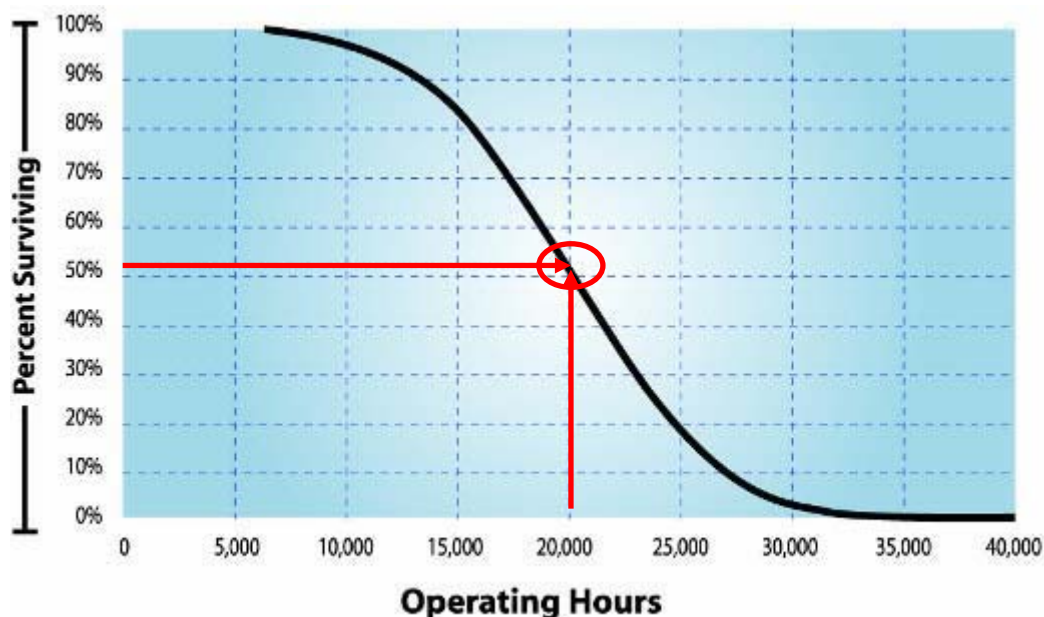
Si osserva che R_{th-j-p} è la resistenza termica tra la giunzione del led e il solder point del dispositivo; di norma il suo valore viene fornito dai produttori in tutti i loro data sheets tecnici.

La T_{SP} è la temperatura della superficie di scambio termico posteriore del led; spesso viene anche indicata come temperatura del case (T_C).

L'industria dei prodotti di illuminazione ha storicamente utilizzato il concetto di affidabilità delle lampade al fine di individuare l'intervallo tra un cambio e il successivo che consentisse di minimizzare i costi di esercizio.

²⁴ CREE XLAMP Long-Term Lumen Maintenance, July 2009

L'affidabilità è definita come le ore di funzionamento per cui una certa percentuale (tipicamente il 50%) di popolazione di lampade, ha cessato di funzionare.



Rated lamp life is point where 50% of lamps have failed, or 20,000 hours on this curve.

Figura 24 Molte delle sorgenti bruciano al termine a fine vita. Per le lampade la fine vita corrisponde ad un tasso di mortalità del 50%. I led, normalmente, non bruciano, ma diminuiscono il flusso luminoso emesso rispetto a quello iniziale.

Occorre definire in modo accurato che cosa si intenda per "rottura": per una lampada ad incandescenza, ad esempio, significa la rottura del filamento (assottigliamento e successiva rottura a seguito di vibrazioni).

Per i led, le rotture catastrofiche sono piuttosto rare (Figura 25), più comunemente si assiste ad una diminuzione del flusso luminoso emesso al crescere delle ore di funzionamento.

Quando la diminuzione raggiunge una certa soglia, ad esempio il 30%, il dispositivo viene considerato come non più rispondente alle specifiche.

L_{70} rappresenta il numero delle ore di funzionamento di un led, per una prefissata temperatura di giunzione, trascorse le quali, il flusso luminoso residuo, è pari ad almeno il 70% del valore iniziale.

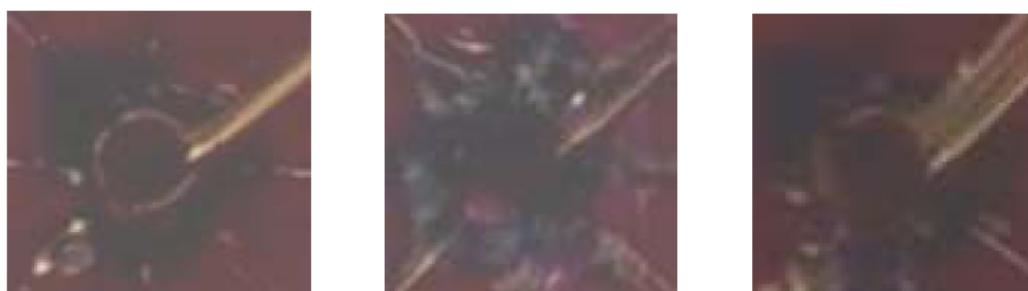


Figura 25 Esempi di rottura di un led dovuti a sovraccarico elettrico (tensione ai capi del led che supera i 5V o eccessivo valore di corrente, rispetto a quello massimo indicato nel data sheets). Altri tipi di rottura si possono avere per shock termico a causa dei diversi valori di dilatazione termica dei materiali che costituiscono il dispositivo²⁵.

Il valore del 30% è stato portato ad esempio perché alcune ricerche²⁶ hanno dimostrato che una riduzione del 30% del flusso luminoso, rispetto al valore

²⁵ Seoul Semiconductor, Z power LED – failure mode

²⁶ Led life for general lighting: Definition of life, Volume 1, Issue 1, February 2005

iniziale, è ritenuta accettabile per la maggior parte degli occupanti di uno spazio, quando i led vengono utilizzati per realizzare l'illuminazione generale di un ambiente.

Il mantenimento del flusso luminoso è la misura della capacità di una sorgente di conservare il proprio flusso luminoso emesso nel tempo, ed è espresso in valori percentuali rispetto al flusso iniziale.

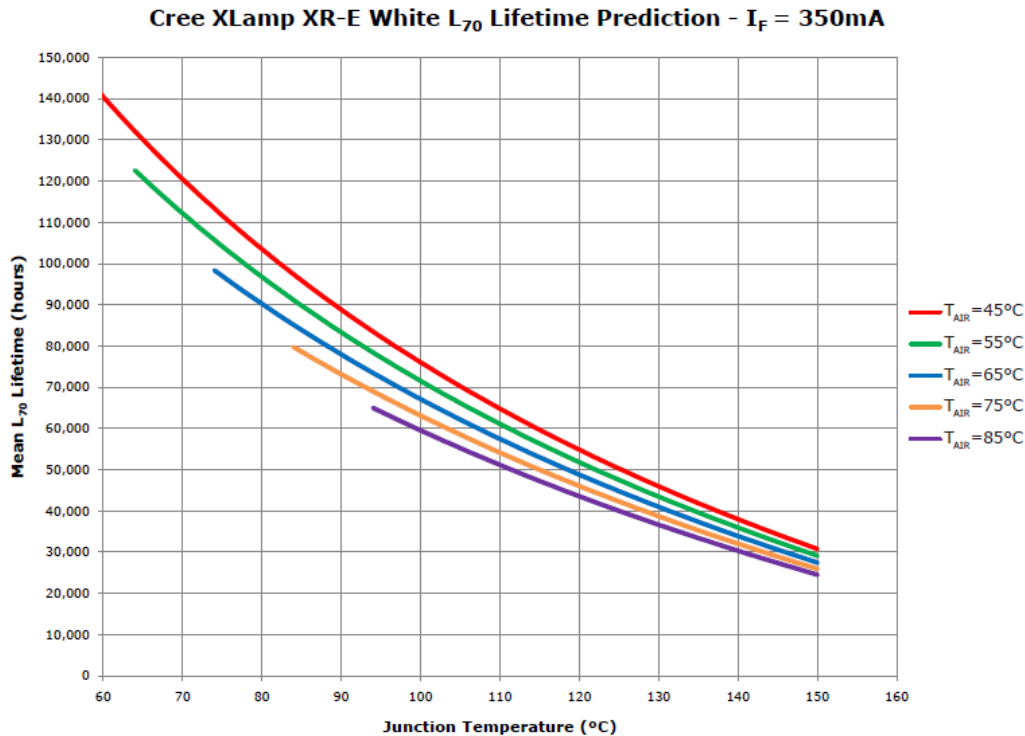
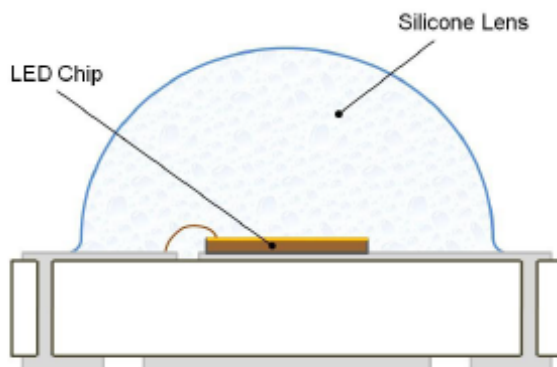


Figura 26 L₇₀ per CREE XR-E led in funzione delle corrente I_F e della temperatura di giunzione.

Alcuni costruttori sostengono che, oltre ai due parametri già citati, anche la temperatura dell'aria, gioca un ruolo importante nella mantenimento del flusso luminoso nel tempo nel caso di led incapsulati in silicone²⁷. La Figura 26 mostra l'andamento di L₇₀, in funzione della corrente di giunzione e della temperatura dell'aria. Molti led di potenza utilizzano silicone come materiale per il package (Figura 27); quando tale materiale viene esposto a elevate temperature, si degrada, riducendo la frazione di flusso luminoso trasmesso proveniente dal led chip.



Cross-Section Diagram of a High-Power LED

Figura 27 Sezione trasversale di un led incapsulato in silicone.

²⁷ CREE Long Term Lumen Maintenance, July 2009

Alcuni tra i maggiori produttori di led, forniscono delle proiezioni sul mantenimento del flusso luminoso nel tempo dei loro prodotti, basate su estesi test in fabbrica ed estrapolazioni statistiche dei risultati, utilizzando, quali fattori di sollecitazione dei dispositivi, il valore della corrente di pilotaggio (I_F) e la temperatura di giunzione in esercizio (T_J).

Il grafico della Figura 28 mostra l'aspettativa di vita (B50, L70 significa che il 50% dei prodotti avranno almeno il 70% del flusso luminoso dopo un certo numero di ore di funzionamento) per il led package K2 prodotto da Philips Lumileds.

In accordo con questo grafico, il 50% dei campioni del led K2 funzionanti a 350 mA, manterranno fino a 60.000 ore un flusso luminoso pari ad almeno il 70% del loro flusso iniziale, quando la temperatura di giunzione si mantenga inferiore o uguale a 160°C.

B50 rappresenta quindi un altro aspetto delle proiezioni di vita dei led, utilizzato in combinazione con L e l'intervallo di confidenza statistica. B50 significa che ci si aspetta il flusso luminoso scenda al di sotto del livello di flusso medio mantenuto L_{70} o L_{50} , al raggiungimento di un certo numero di ore di funzionamento, per non più del 50% dei led di un lotto.

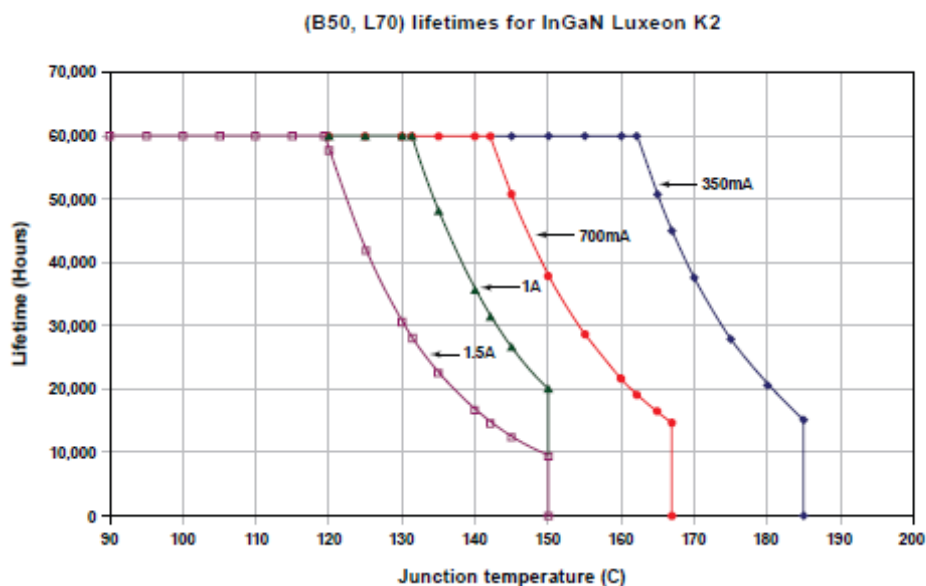


Figura 28 Le curve mostrano l'aspettativa di vita dei LED basati sul valore della corrente di pilotaggio (linee colorate) e sul valore della temperatura di giunzione. Fonte Philips Lumileds.

La Figura 29 mostra il confronto tra un led e una lampada ioduri metallici, con accenditore incorporato; nel corso delle 50.000 ore di funzionamento del led, la lampada a scarica è stata ricambiata 4 volte e al termine delle 50.000 ore il flusso residuo del led rimane pari a circa il 70% del flusso iniziale, mentre la lampada a scarica decade fino al 50% del flusso iniziale.

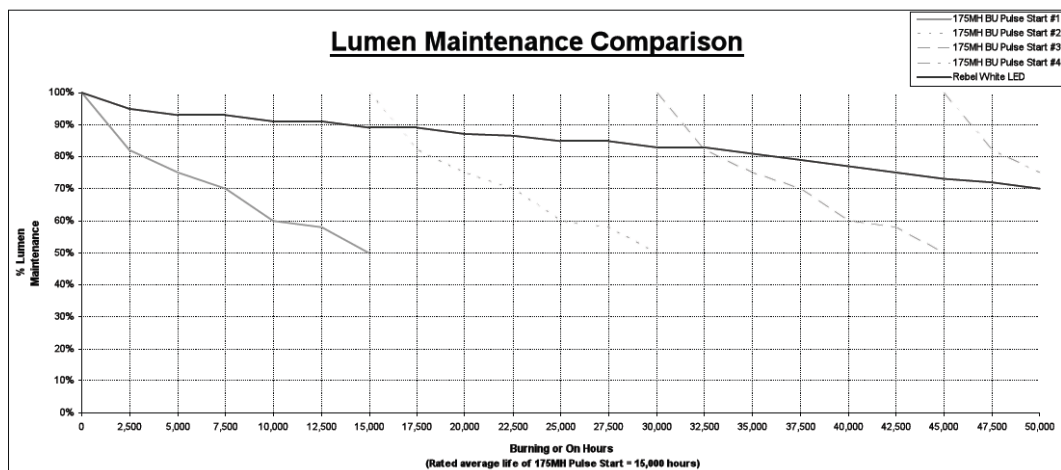


Figura 29 Confronto tra il decadimento del flusso luminoso di un led e quello di una lampada a vapori di alogenuri con accenditore incorporato²⁸.

I concetti di decadimento del flusso luminoso e di mortalità sono legati al fattore di manutenzione (MF) adottato durante la fase di progettazione degli impianti, che a sua volta è il prodotto di tre differenti fattori²⁹:

$$MF = LLMF * LSF * LMF$$

LLMF : Lamp lumen maintenance factor. La lampada diminuisce il flusso durante il funzionamento; il tasso di diminuzione del flusso luminoso dipende dal tipo di lampada e di alimentatore. La riduzione delle performance dell'impianto dovute a questo parametro può essere ridotta attraverso un ricambio lampade, magari a programma.

LSF : lamp survival factor : rappresenta la probabilità che una lampada continui a funzionare per un certo periodo. Il tasso di sopravvivenza dipende dal tipo di lampada, e nel caso particolare di lampade a scarica, dalla potenza e dalla frequenza delle accensioni e degli spegnimenti, e dal sistema di alimentazione.

LMF : luminaire maintenance factor : Il deposito di sporcizia su lampada e apparecchio rappresenta la maggior perdita di flusso luminoso dell'apparecchio; la deposizione di sporco sulle superfici riflettenti, può essere minimizzata utilizzando apparecchi con vano ottico sigillato rispetto all'ingresso di polvere e di umidità. La quantità di luce perduta dipende dalla natura e dalla densità dello sporco nell'aria, dalla forma e dalla costruzione dell'apparecchio (ad esempio dipende dal grado di protezione del vano ottico), dal tipo di lampada impiegata.

Non esiste, ad oggi, un metodo internazionalmente riconosciuto, per valutare il degrado del flusso luminoso per gli apparecchi di illuminazione a led.

Introduciamo ora alcune definizioni, utilizzate negli standard Statunitensi, per definire i vari elementi che costituiscono la "parte ottica" di un apparecchio di illuminazione allo stato solido.

Led Package: un assemblaggio di uno o più LED dies completo di fili di connessione ai contatti esterni del dispositivo, con la possibilità di essere dotato di un elemento ottico, una interfaccia elettrica, meccanica e termica. Il dispositivo non include una sorgente di alimentazione, non include un attacco standardizzato ANSI, e non è connesso direttamente con un ramo del circuito.

Led array: un assemblaggio di led package su un circuito stampato o substrato, possibilmente con un elemento ottico e un'interfaccia termica, meccanica ed elettrica aggiuntivi. Il dispositivo non contiene una sorgente di alimentazione,

²⁸ Information Brief LM-80 e LM-79 Philips HADCO

²⁹ CIE 154, "The maintenance of Outdoor lighting system", 2003

non include un attacco standardizzato e non è connesso direttamente con un ramo del circuito.

Led module: una componente di una sorgente di luce, che include uno o più led connessi come carico di una sorgente di alimentazione o di un led driver. Componenti elettronici, elettrici, meccanici, ottici possono essere parte di un modulo led. Il dispositivo non contiene una sorgente di alimentazione, non include un attacco standardizzato e non è connesso direttamente con un ramo del circuito.

L'Energy Star Program offre due metodi per la valutazione del decadimento del flusso luminoso dei led nel tempo³⁰:

- 1) Component performance;
- 2) Luminaire performance;

La modalità "component performance", consente al produttore dell'apparecchio di dimostrare la conformità allo standard, per quanto riguarda il mantenimento del flusso luminoso, utilizzando i dati forniti dai costruttori dei led, misurati secondo opportuni riferimenti normativi.

Lo standard IESNA LM-80, "Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Source", prescrive i metodi di misura per la valutazione del mantenimento del flusso luminoso per i led package, array e module soltanto e non per l'intero apparecchio di illuminazione. I led package, array e module, vengono testati nel tempo per un minimo di tre differenti temperature del case: 25°C, 55°C e 85°C $\pm 2^\circ\text{C}$. Il flusso luminoso emesso viene misurato e registrato per un minimo di 6.000h, con un intervallo minimo tra le misure di 1.000h. A partire da queste informazioni, i fabbricanti di led sono in grado di fare delle proiezioni sulla vita utile del dispositivo.

Un esempio di applicazione dello standard è quello riportato nella Figura 30: i led sono montati su un metal core PCB che a sua volta è fissato su di un dissipatore posto all'interno di una camera climatica. La temperatura del solder point (T_{sp}) di ciascun led è monitorata in modo continuo e controllata variando la temperatura del dissipatore. La temperatura dell'aria (T_{AIR}) nella camera climatica è misurata e controllata variando la temperatura dell'aria immessa; il controllo esercitato su questo parametro ambientale è tale per cui T_{AIR} è mantenuto a $T_{SP} \pm 5^\circ\text{C}$.

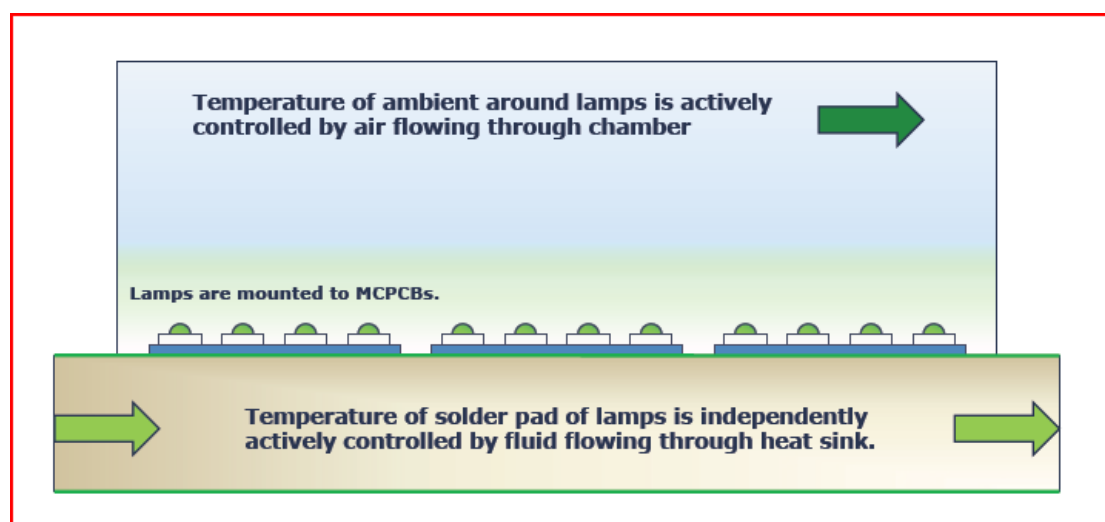


Figura 30 Esempio di configurazione per la determinazione del Lumen Maintenance in conformità allo standard IESNA LM-80³¹.

Lo standard IESNA LM-80 definisce il mantenimento del flusso luminoso per i led package, array e module; ma dal momento che i led sono incorporati all'interno di

³⁰ ENERGY STAR, Manufacture's Guide for Qualifying Solid-State Lighting Luminaries , September 2008

³¹ CREE XLAMP Long-Term Lumen Maintenance, July 2009

un apparecchio con un sistema di dissipazione (heat-sink), le parti ottiche, gli alimentatori ed altro, si trovano ad operare in condizioni ambientali molto differenti tra loro e quindi lo standard non può essere assunto come un predittore affidabile del decadimento del flusso luminoso nel tempo dell'intero apparecchio. Al fine di poter correlare i dati risultati dai test condotti in conformità allo standard IESNA LM 80 ad un apparecchio, occorre che l'apparecchio funzioni nelle condizioni di reale utilizzo, considerando il led più caldo del dispositivo e l'alimentazione elettrica a regime, in condizioni di equilibrio termico con l'ambiente operativo. I riferimenti normativi per l'esecuzione delle misure, indicati nella ENERGY STAR, sono riferiti al mercato statunitense (ANSI/UL/ 1598-2004 Luminaries o ANSI/UL 153-2005 Portable Luminaries) con l'aggiunta di una o due termocoppie per la rilevazione della temperatura del led package, array o module e l'altra per la rilevazione della temperatura del driver.

Per quanto riguarda gli esterni, un riferimento normativo Europeo equivalente, potrebbe essere IEC 60598-1 (ANNEX K).

Durante le misure di temperatura, tutte le seguenti condizioni devono essere soddisfatte contemporaneamente:

- 1) Il led package, array o module usato nell'apparecchio deve essere stato testato in accordo con lo standard LM-80;
- 2) Per il led package, array o module, il fabbricante deve indicare un TMP (punto di misura della temperatura) sul dispositivo;
- 3) Il led package, array o module, deve essere temporaneamente accessibile per il posizionamento delle termocoppie per la misura in situ delle temperature. L'accesso all'interno dell'apparecchio può essere garantito mediante un foro (di cui lo standard dà il diametro massimo) che dovrà essere ben chiuso con stucco o altro sigillante, durante le misure.

Una termocoppia andrà posizionata sul led package, array o module più caldo presente all'interno dell'apparecchio, nel test point (TMP_{LED}) indicato dal fabbricante (per una disposizione rettangolare/quadrata o circolare il led più caldo è quello più vicino al centro; per altre configurazioni, il costruttore dovrà individuare la sua posizione mediante una serie di prove). La seconda termocoppia andrà fissata all'alimentatore/driver nel test point (TMP_{ps}) indicato per la rilevazione della temperatura. Nei casi in cui il test point non sia indicato dal costruttore, o nel caso in cui il driver sia integrato con il PCB che ospita anche i led, il fabbricante dell'apparecchio dovrà individuare un test point (TMP_{ps}) opportuno.

La garanzia del mantenimento del flusso luminoso a 25.000 e 35.000 ore di funzionamento, è basata sui risultati ottenuti a 6.000 h, rilevati in accordo con lo standard LM-80.

La Tabella 6, mostra il valore del flusso residuo minimo che si dovrebbe rilevare a 6.000h per il led package, array o module, misurati in accordo con lo standard LM-80, affinché sia garantito un degrado del 70% del flusso luminoso iniziale dopo 25.000 o 35.000 ore di funzionamento. La percentuale è stata ottenuta andando a considerare un decadimento esponenziale (determinazione valore dell'esponente) del flusso luminoso, che garantisca il 70% di flusso residuo dopo 25.000 o 35.000 ore.

Application required minimum useful life (L_{70})	Required lumen maintenance at 6,000 hours or greater
25,000 hours	91.8%
35,000 hours	94.1%

Tabella 6 Limiti minimi del flusso luminoso a 6000 h per garantire un valore residuo del 70% a 25.000 o a 35.000 ore³²

³² ENERGY STAR, Manufacture's Guide for Qualifying Solid-State Lighting Luminaries, September 2008

Fissato quindi il valore di soglia per il flusso luminoso a 6.000h, occorre determinare a quale temperatura di funzionamento andare a confrontare il flusso luminoso residuo a 6.000 h (valore ricavato dalla lettura del report LM-80 forniti dal costruttore del led package, array o module) con il limite ricavato dalla tabella precedente.

Se il valore di T_{LED} è più grande della più elevata temperatura rilevata in accordo con lo standard IESNA LM-80, l'apparecchio non potrà essere qualificato nel rispetto dello standard ENERGY STAR per la mancanza dati con cui confrontarsi.

Se il valore di T_{LED} è inferiore della più bassa temperatura rilevata in accordo con lo standard IESNA LM-80, allora sarà possibile assumere, come fattore di mantenimento del flusso luminoso, il valore ricavato dalle misure fornite dal costruttore del semiconduttore (led package, array o module) per la più bassa temperatura disponibile.

Se la temperatura TMP_{LED} misurata in situ è compresa tra due temperature considerate nello standard LM-80, allora è possibile utilizzare l'interpolazione lineare per determinare il flusso residuo a 6.000 ore di funzionamento dell'apparecchio.

$$L_{TMP} = L_{below} + \left(\frac{L_{above} - L_{below}}{T_{s, above} - T_{s, below}} \right) (TMP_{LED} - T_{s, below})$$

L_{below} :flusso luminoso residuo, in percentuale, riferito ad una temperatura al di sotto di TMP_{LED} @>= 6.000h di funzionamento (dato proveniente da report LM-80).

L_{above} :flusso luminoso residuo, in percentuale, riferito ad una temperatura al di sopra di TMP_{LED} @>= 6.000h di funzionamento (dato proveniente da report LM-80).

$T_{s, below}$ temperatura, in gradi °C, al di sotto di TMP_{LED} , per cui sono stati forniti i dati di flusso luminoso residuo al trascorrere delle ore di funzionamento.

$T_{s, above}$ temperatura, in gradi °C, al di sopra di TMP_{LED} , per cui sono stati forniti i dati di flusso luminoso residuo al trascorrere delle ore di funzionamento.

TMP_{LED} : valore di temperatura misurato in situ sull'apparecchio nelle medesime condizioni di funzionamento dell'applicazione, al raggiungimento dello stato di equilibrio termico.

Consideriamo il seguente esempio:

EXAMPLE:

In situ measured TMP (TMP_{LED}) = 67°C

LED Manufacturer LM-80 test data for XYZ Package			
	Case Temperature		
Time (hours)	25°C	55°C	85°C
0	100%	100%	100%
⋮	⋮	⋮	⋮
6,000	99%	95%	90%

Applying the equation above:

$$L_{TMP} = 95 + \left(\frac{90 - 95}{85 - 55} \right) (67 - 55)$$

$$\therefore L_{TMP} = 93.0\%$$

Valutazione:

$L_{TMP} \geq 91.8$ e quindi il prodotto risulta idoneo per garantire un flusso residuo maggiore del 70% a 25.000 ore (applicazione indoor residential).

$L_{TMP} \geq 94.1$ e quindi il prodotto non risulta idoneo per garantire un flusso residuo maggiore del 70% a 35.000 ore (applicazione outdoor commercial)

Occorre inoltre verificare che la corrente misurata nel dispositivo, sia inferiore o uguale a quella specificata nel report LM-80.

L'opzione "Luminaire Performance", consente di verificare il requisito del mantenimento del flusso luminoso nel tempo, attraverso i seguenti passi:

- 1) Viene determinato il flusso luminoso uscente dal dispositivo dopo un periodo di funzionamento maggiore o uguale a 6.000 ore (misura in accordo con IESNA LM-79, che potrebbe trovare il suo equivalente nel progetto di norma italiana U29000400, "Luce e illuminazione - Caratterizzazione fotometrica degli apparecchi di illuminazione a LED")
- 2) Il flusso luminoso determinato al punto precedente viene diviso per il valore del flusso misurato a 0 ore di funzione manto e verificato che sia maggiore o uguale al 91.8% per una proiezione di vita di 25.000 (indoor residential) e al 94.1% per una proiezione di vita di 35.000 (outdoor commercial)
- 3) Durante il periodo di funzionamento per il raggiungimento delle 6.000 h, l'apparecchio deve funzionare in modo continuo nell'ambiente appropriato previsto dalla norma UL 1598/153, fatta eccezione dei periodi in cui viene rimosso per essere sottoposto al test fotometrico

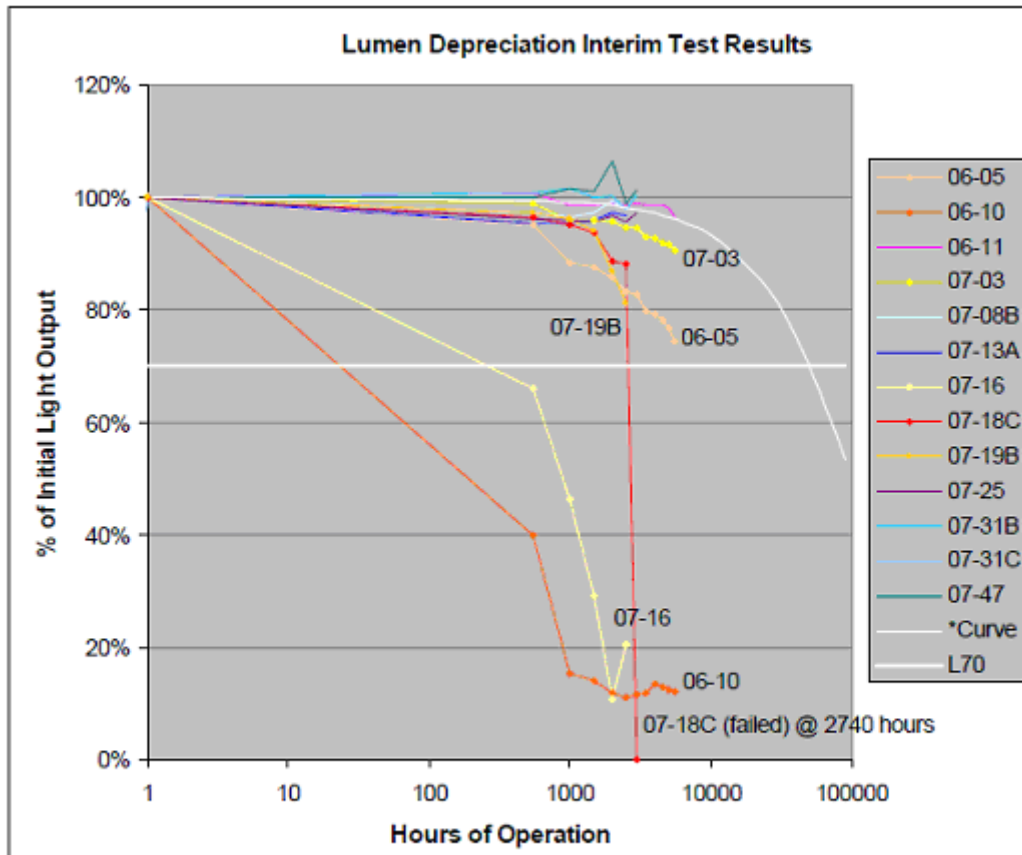
Per quanto riguarda l'alimentatore/driver dei led package, array o module, integrato con i led o posto all'interno dell'apparecchio, deve essere testato nelle condizioni di regime elettrico e termico andando a misurare la temperatura nel TMP_{PS} indicato dal costruttore.

L'alimentatore soddisfa i requisiti ENERGY STAR se la temperatura misurata al TMP_{PS} , risulta inferiore o uguale a quella dichiarata dal costruttore del dispositivo, per assicurare una durata di almeno 3 anni.

L'applicazione di questo schema ad un prodotto per l'illuminazione pubblica, pone alcuni interrogativi da sciogliere:

- ✓ Gli apparecchi di illuminazione per esterni possono utilizzare diversi valori delle correnti in ciascun ramo al fine di realizzare/ottimizzare la distribuzione fotometrica desiderata. I valori delle correnti di ciascun ramo non sono resi pubblici dai fabbricanti.

- ✓ Nessuna informazione viene resa pubblica circa i led impiegati (produttore e modello): risulta pertanto impossibile applicare la procedura sopra esposta.
- ✓ Gli apparecchi vengono spesso venduti pubblicizzando una vita utile del dispositivo di 50.000 ore, senza tuttavia fornire alcun valore sul flusso residuo dell'apparecchio dopo tale periodo; in questo modo non è possibile determinare il fattore di manutenzione dell'impianto e quindi un suo dimensionamento.



*Note that the white curve is provided only as an example of exponential depreciation which would reach L70 (70% of initial output) at 50,000 hours. The horizontal white line indicates L70.

Figura 31 Risultati preliminari per il CALiper lumen depreciation testing Maggio 2008:Fonte CALiPER Round 5 Summary report.

In letteratura sono riportati alcuni test sul campo su prodotti di illuminazione a led con lo scopo di verificare il mantenimento del flusso luminoso nel tempo per le applicazioni più diffuse, tra cui l'illuminazione stradale.

Il programma DOE CALiper³³ ha iniziato il test di affidabilità sui prodotti di illuminazione allo stato solido nell'Agosto del 2007 (il programma ha preso in considerazione diversi tipi apparecchi, da interno e da esterno, compresi quelli utilizzati per l'illuminazione stradale).

Alcuni degli apparecchi testati, hanno mantenuto un elevato valore del flusso luminoso in uscita per le prime 6.000 h di funzionamento (7 su 13 prodotti esaminati, hanno mantenuto più del 96% del loro flusso luminoso iniziale), mentre altri hanno mostrato un rapido deterioramento dopo 1.000-2.000h di funzionamento e alcuni prodotti hanno mostrato un significativo spostamento delle coordinate cromatiche dopo le prime 6.000 h di funzionamento.

³³ Per maggiori dettagli, si veda : <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/caliper.html>

Report includes test results and analysis for products tested in Round 5, including linear, A-lamp, and MR16 replacement lamps, downlights, desk/task lamps, undercabinet lighting, and outdoor lighting. (29 pages, May 2008)

La Figura 31 mostra l'andamento del flusso luminoso, al trascorrere delle ore di funzionamento, dei 13 prodotti testati; il test non è ancora completo ma fornisce comunque delle indicazioni di massima. In colore bianco, sono riportate due linee: una orizzontale che rappresenta il 70% del flusso iniziale e una curva discendente che rappresenta un tipico decadimento logaritmico che raggiunge il valore L_{70} a 50.000 ore di funzionamento.

In conclusione, possiamo affermare che:

- ✓ Il semplice impiego di un prodotto a led non garantisce automaticamente una vita utile di 50.000 ore;
- ✓ Il funzionamento del dispositivo (la semplice accensione dell'apparecchio), non è una informazione sufficiente per dimensionare correttamente il fattore di manutenzione dell'impianto;
- ✓ L'utilizzo di un fattore di manutenzione pari a 0.9 (valore molto usato in alcuni progetti, quando si propone una soluzione a LED), se non si dispone di alcuna informazione circa la costruzione dell'apparecchio, è del tutto arbitraria;
- ✓ Nell'ipotesi che L_{70} dell'apparecchio a led si verifichi a 50.000 ore (determinato ad esempio con una delle due modalità proposte), occorrerà dimensionare il coefficiente di manutenzione a un valore che oscilla tra 0.7 e 0.75. Valori più bassi del deprezzamento del flusso luminoso a 50.000 ore sono possibili a patto di far funzionare il led a temperature di giunzione molto basse o valori di corrente molto modesti (aumento del costo iniziale del prodotto);
- ✓ Anche nel caso in cui si utilizzi un apparecchio a led, occorre prevedere dei cicli di pulizia delle superfici ottiche, almeno ogni 3 anni di funzionamento (per un apparecchio IP 6X si ha perdita flusso luminoso che oscilla tra 10% e 17% a seconda del livello di inquinamento dell'aria)

8. Proposta di specifiche per il programma di calcolo

8.1 Cicli manutenzione lampade a scarica

In presenza di regolatori di flusso luminoso, si utilizzeranno i dati forniti dai produttori di lampade circa la mortalità e il flusso residuo in relazione alle ore di funzionamento; questa approssimazione si rende necessaria per la mancanza di dati specifici, suddivisi per tipo e potenza di lampada.

L'utente deve essere in grado di inserire l'andamento del flusso nel tempo o la mortalità delle lampade, utilizzando i grafici che vengono forniti nei data sheets dei costruttori: l'immagine acquisita tramite scanner o cut and paste da pdf e deve poter essere ricalcata dall'utente e trasformata in una tabella attraverso l'applicazione di opportuni fattori di scala agli assi. Gli assi potranno avere scala lineare o logaritmica a seconda della natura del dato trattato³⁴.

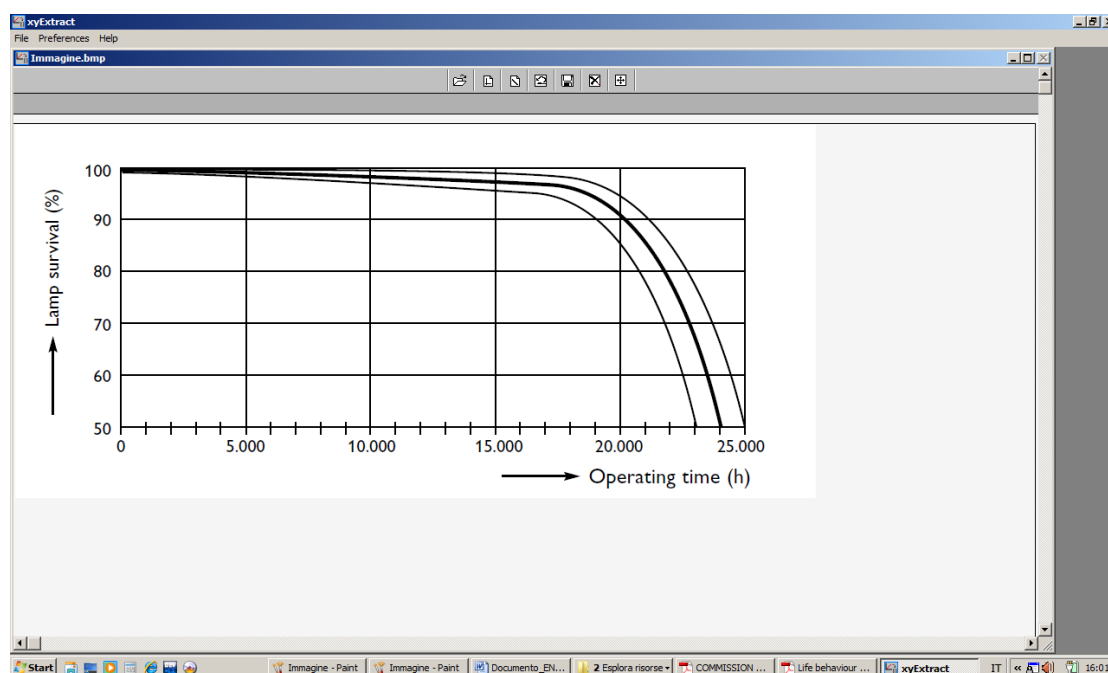


Figura 32 Esempio di acquisizione di informazioni a partire da grafici

In assenza di regolatori di flusso luminoso, si suggerisce di utilizzare un ricambio lampade ogni 8.000h di funzionamento in modo da avere un flusso residuo del 70%. Il progettista potrà comunque fissare, in modo coerente, i valori del coefficiente di manutenzione impiegato nel calcolo e la frequenza dei ricambi delle lampade secondo le informazioni in suo possesso.

8.2 Cicli Manutenzione apparecchi a LED

Sono trattati alla medesima stregua degli apparecchi con lampade a scarica, sarà quindi compito del progettista individuare il coefficiente di manutenzione dell'impianto e il ciclo di manutenzione (ricambio apparecchio), che ritiene più opportuno, in relazione alle osservazioni fatte ai paragrafi precedenti e alle informazioni messe a disposizione dal costruttore dell'apparecchio.

8.3 Pulizia apparecchi

L'utente può inserire dei cicli di pulizia delle parti ottiche degli apparecchi, siano essi a scarica o con tecnologia LED; la loro frequenza è decisa dal progettista e può essere fatta coincidere con un ricambio lampade. In linea del tutto generale si osserva che deve sussistere una coerenza tra il valore del coefficiente di manutenzione e il ciclo di pulizia.

³⁴ Il programma di riferimento per questa funzionalità è **xyExtract Graph Digitizer 4.1**, scaricabile gratuitamente dal sito: <http://www.brothersoft.com/xyextract-graph-digitizer-29196.html>

8.4 Efficienza degli alimentatori per lampade a scarica

Le efficienze minime degli alimentatori per lampade a scarica, devono soddisfare i requisiti riportati alla seguente tabella (Tabella 7)³⁵.

Minimum efficiency for ballasts for high intensity discharge lamps — Stage 2

Nominal lamp wattage (P) W	Minimum ballast efficiency ($\eta_{ballast}$) %
$P \leq 30$	65
$30 < P \leq 75$	75
$75 < P \leq 105$	80
$105 < P \leq 405$	85
$P > 405$	90

Tabella 7 Efficienza minima per alimentatori lampade a scarica.

I valori della tabella dovranno essere utilizzati ogni qualvolta non sia disponibile un dato misurato della potenza elettrica complessivamente assorbita dal sistema lampada e alimentatore, ma si abbia a disposizione il solo valore della potenza nominale di lampada.

8.5 Perdite lungo le linee di alimentazione

Le perdite nella linea di alimentazione, non tenendo conto del transitorio di accensione, in condizioni regolari di esercizio, non devono superare i valori sotto indicati (salvo che il committente dell'impianto abbia prescritto valori differenti)
- 5 % della potenza assorbita dai centri luminosi³⁶, per impianti in derivazione
- 10% della potenza elettrica assorbita dai centri luminosi per impianti in serie³⁷

8.6 Durata convenzionale di funzionamento degli impianti

Per determinare la durata convenzionale di funzionamento degli impianti, riferirsi alla Tabella 8³⁸.

Tabella 8 Numero di ore di funzionamento annuo degli impianti, per diversi tipi di installazione.

Examples of typical annual lamp operating hours.

Installation	hours/year
Continuous	8760
All Night (Sunset to sunrise)	4200
Sunset to 24:00 hr	2600
Sunset to 22:00 (5 nights/week)	1300
4 hrs/week	208

La valutazione della effettiva durata della notte, al variare delle coordinate geografiche del sito dell'impianto e della stagione, potrebbe essere un importante parametro di cui tenere conto per una accurata valutazione dei periodi di accensione degli impianti di illuminazione pubblica.

Il primo passo per la valutazione della effettiva durata della notte, è quello di associare la posizione del sole sull'orizzonte (angolo zenitale o altezza solare).

³⁵ Direttiva 245/2009

³⁶ "Centro luminoso" è il complesso costituito dall'apparecchio di illuminazione, dalle lampade installate e dagli ausiliari elettrici anche se non incorporati nell'apparecchio stesso.

³⁷ Norma CEI 64-7 "Impianti elettrici di illuminazione pubblica"

³⁸ CIE 154, "The maintenance of outdoor lighting system", 2003

La Figura 33, propone la funzione empirica descritta da Seidelmann³⁹, che mette in relazione l'illuminamento del cielo e l'altezza solare, in condizione di cielo sereno.

Sulla base di questa funzione è possibile determinare l'angolo solare zenitale per il quale la funzione supera una prefissata soglia del valore di illuminamento su una superficie (es. 80 lux per accensione dell'impianto e 20 lux per lo spegnimento).

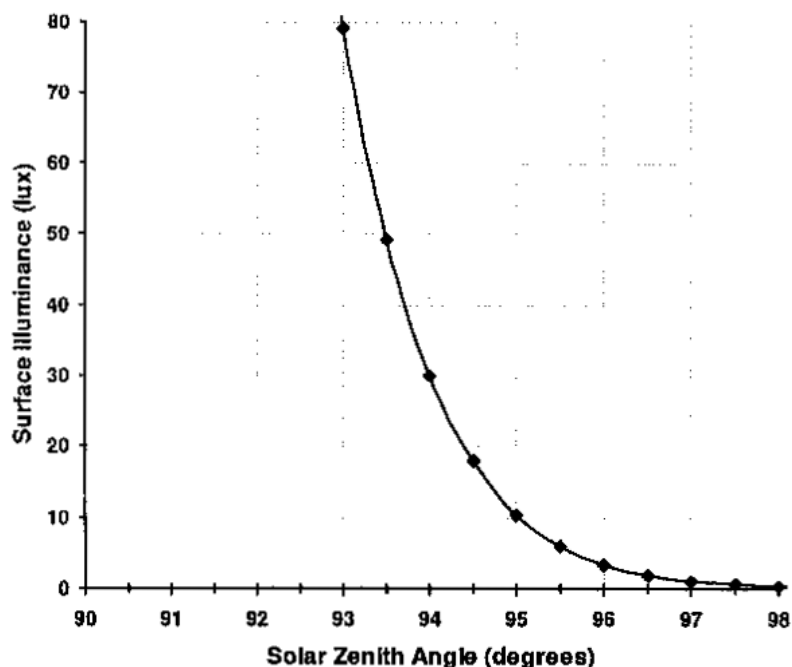


Figura 33 Diagramma della funzione empirica dell'illuminamento di una superficie orizzontale, in funzione dell'angolo solare zenitale, per una giornata di cielo sereno.⁴⁰

Nel caso in cui il cielo non sia sereno, la Figura 34 mostra il confronto tra la curva stimata e quella effettivamente rilevata in condizione di cielo coperto al tramonto. Si nota una differenza angolare di 1.25° a 80 lux, come conseguenza della diminuzione dell'illuminamento naturale⁴¹.

In condizione di cielo coperto, la durata della notte sarà maggiore, infatti la soglia di illuminamento, verrà raggiunta più tardi al mattino rispetto alle condizioni di cielo sereno.

Altri fattori, come la presenza di edifici, i gas inquinanti e il pulviscolo atmosferico, oltre alle condizioni atmosferiche, possono influenzare il livello di illuminazione naturale.

³⁹ Seidelmann P.K. (Ed.) Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. ISBN 0-935702-68-7, University Science Books, 1992

⁴⁰ "Night length duration and public illumination", F. Ramos Martins, E. Bueno Pereira, ISES Solar World Congress 2005, Orlando Florida (2005).

⁴¹ "Night length duration and public illumination", F. Ramos Martins, E. Bueno Pereira, ISES Solar World Congress 2005, Orlando Florida (2005).

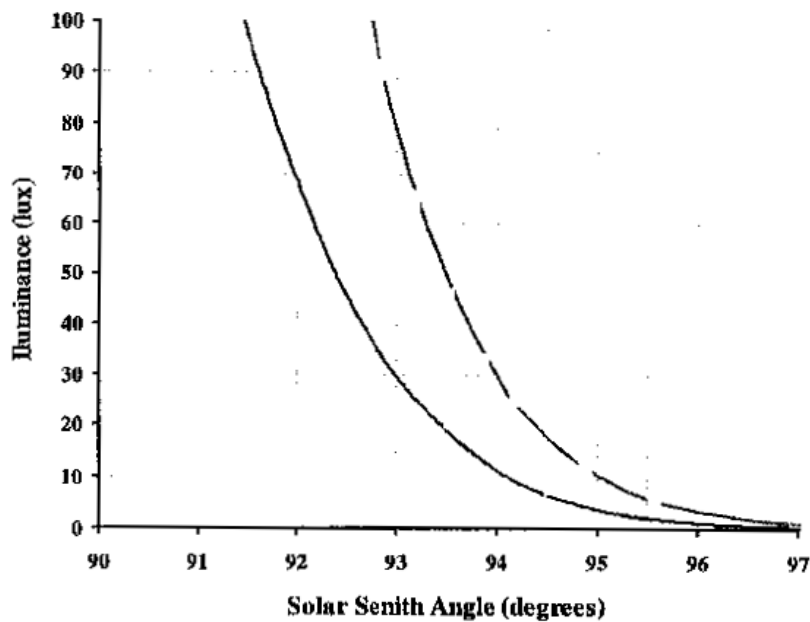


Figura 34 Comparazione tra la l'illuminamento stimato (linea tratteggio) e quello misurato a terra (linea continua), in condizioni di cielo coperto⁴².

L'esame delle figure precedenti, suggerisce che la determinazione della effettiva durata della notte sulla base della valutazione del superamento delle due soglie di illuminamento, risulta abbastanza critica e poco significativa dal punto di vista del risparmio energetico, dal momento che i 3-4 gradi di elevazione vengono coperti in 20-40 minuti.

Bisogna inoltre considerare che per un calcolo accurato, occorrerebbe mediare tra loro le curve illuminamento vs altezza solare ottenute in diverse condizioni atmosferiche, con la difficoltà di reperire, per il luogo di interesse, informazioni così dettagliate.

La valutazione della effettiva durata della notte, al variare della coordinate geografiche del luogo di installazione, può essere quindi svolta sulla base del semplice calcolo dell'ora di alba e tramonto, nell'arco dell'anno.

Per tale calcolo, il procedimento suggerito fa riferimento a quanto contenuto nella guida "Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications"⁴³, National Renewable Energy Laboratory, che oltre alle formule di calcolo, contiene una implementazione in linguaggio C di alcuni degli algoritmi di calcolo proposti .

⁴² "Night length duration and public illumination", F. Ramos Martins, E. Bueno Pereira, ISES Solar World Congress 2005, Orlando Florida (2005).

⁴³ Il documento è scaricabile all'indirizzo internet : www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf

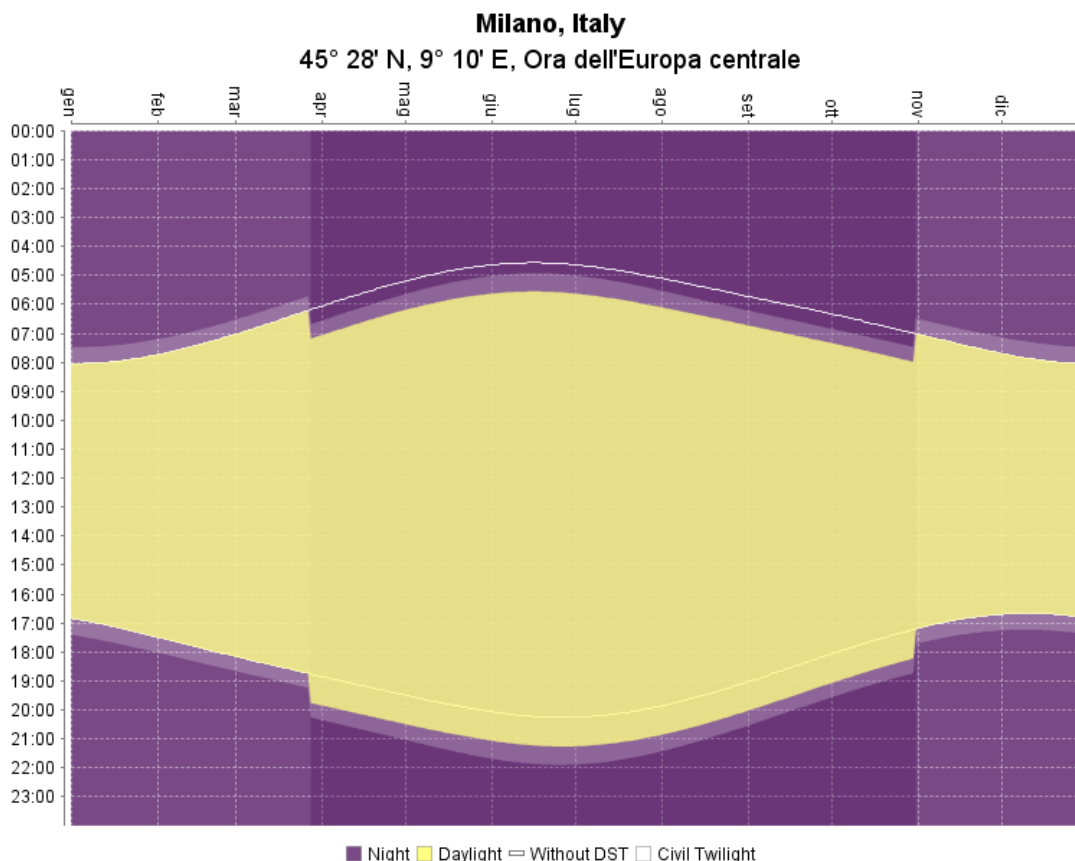


Figura 35 Andamento degli orari di alba e tramonto per la città di Milano, per i diversi mesi dell'anno.

La Figura 35, riporta la mappa con l'andamento delle ore di alba e tramonto, per ciascun mese dell'anno, relativa a Milano⁴⁴.

8.7 Riduzione del flusso luminoso nelle ore di notte profonda (solo per apparecchi con lampade a scarica nei gas)

L'utente deve poter inserire le ore in cui il sistema funziona a regime ridotto e quelle in cui funziona alle massime prestazioni. L'inserimento di queste informazioni dovrebbe avvenire per via grafica, attraverso la costruzione di un diagramma simile a quello riportato alla Figura 36.

Per ciascuna zona di funzionamento, l'utente può decidere la percentuale di riduzione della potenza di lampada, con la conseguente diminuzione del flusso luminoso emesso dalle lampade.

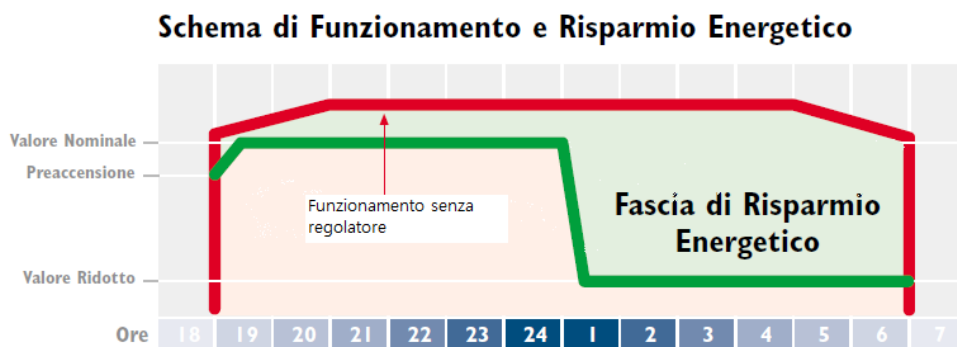


Figura 36 Esempio di andamento della potenza elettrica nel corso della notte

⁴⁴ Il programma utilizzato è liberamente scaricabile all'indirizzo: <http://daylightchart.sourceforge.net/>

In allegato, viene fornito un foglio excel con le corrispondenze potenza vs flusso luminoso, dei principali tipi di lampada a scarica in condizione di sotto-alimentazione.

Tali informazioni verranno utilizzate per determinare la potenza elettrica impegnata nelle diverse fasi del ciclo di funzionamento del regolatore.

8.8 Riduzione del flusso luminoso nelle ore di notte profonda (apparecchi a led)

Ad oggi non esiste uno standard che consente di legare la potenza elettrica assorbita al flusso luminoso emesso dell'apparecchio a causa dell'enorme varietà e tipologie costruttive dei prodotti presenti sul mercato.

Per realizzare questa funzione, l'utente potrebbe inserire nel progetto più apparecchi (selezionandone l'accensione o lo spegnimento in maniera opportuna), a diversi regimi di funzionamento.

Sarà poi l'attribuzione di una durata di accensione nel corso della notte, che consentirà di ottenere la simulazione di un ciclo di programmazione dei diversi regimi di flusso luminoso.

8.9 Inserimento dei dati

Il programma deve essere in grado di gestire situazioni impiantistiche complesse e in particolare:

- presenza di diversi tipi di apparecchi (scarica-led) ciascuno con caratterizzato dal proprio programma di manutenzione, costo iniziale, ecc;
- diversi tipi di sorgente (ciascuna con le proprie caratteristiche di decadimento del flusso luminoso, durata, ecc);
- gli apparecchi possono avere durate di accensione diversificate (es. apparecchi led con funzione dimming).

Il programma dovrà quindi essere in grado di poter ricevere in ingresso i diversi componenti dell'impianto ciascuno caratterizzato da un certo numero di attributi (che generano i costi corrispondenti, gli oneri di manutenzione, gli investimenti).

I dati relativi ad alcune voci di costo di uso più frequente, come il prezzo delle sorgenti, la manodopera, ausiliari elettrici, ecc, devono essere inseriti in un DB, in modo che l'utente possa gestirli in maniera molto semplice e rapida.

8.10 Calcoli economici

Lo scopo delle seguenti specifiche è quello di introdurre nel software di calcolo illuminotecnico, la possibilità di valutare la classe energetica del sistema di illuminazione, secondo le direttive EUP.

Il ciclo di vita del prodotto (**Life Cycle Assessment**) è un concetto ampio da tenere in considerazione per valutare correttamente l'impatto ambientale della produzione di beni industriali.

In quest'ottica, un prodotto è analizzato in ogni fase di produzione, e non soltanto in quella del consumo, per calcolare complessivamente l'impatto ambientale.

- ✓ estrazione materie prime ;
- ✓ trasporto materie prime;
- ✓ trattamento delle materie prime e loro trasformazione in semilavorati;
- ✓ trasporto semilavorati;
- ✓ fabbricazione del prodotto;
- ✓ trasporto del prodotto finito alla rete distributiva;
- ✓ distribuzione del prodotto;
- ✓ utilizzo del prodotto;
- ✓ eventuale riciclaggio e riutilizzo.



Figura 37 Schematizzazione LCA.

Lo scopo è evidente: incentivare la fabbricazione di manufatti e prodotti che richiedano minori risorse naturali, minore trasporto e maggiore possibilità di riciclaggio, per favorire un buon rapporto con l'ambiente e la salute delle persone. Per avviare un corretto riciclaggio dei prodotti è fondamentale che le considerazioni di riutilizzo siano considerate fin nelle fasi di fabbricazione e di progettazione.

Per una corretta analisi è necessario disporre di un grado di conoscenza sufficientemente approfondito sulle materie prime impiegate e sulle lavorazioni e trasformazioni a cui esse vanno incontro; queste competenze non sono normalmente diffuse presso i progettisti degli impianti di illuminazione, inoltre le diverse fasi dei cicli produttivi (per esempio nella costruzione dei led) costituiscono informazioni riservate per la maggior parte dei costruttori. Esistono inoltre diverse metodologie per condurre il Life Cycle Assessment, in funzione dello scopo che ci si pone e della natura del processo analizzato.

Come conseguenza di queste considerazioni, le informazioni circa l'impatto ambientale per la produzione e la consegna del prodotto di illuminazione (apparecchio, lampade, pali, cavi, ecc) dovrebbero essere svolte dai singoli costruttori e fornite al progettista dell'impianto in un formato standardizzato che ne consenta un uso immediato: sarà poi compito del progettista valutare l'impatto ambientale del loro utilizzo per completare il calcolo dell'impatto ambientale dell'impianto nel suo complesso.

Alcuni tentativi di percorrere questa strada sono stati già compiuti in ambito Europeo⁴⁵, ma la necessità di ridurre la complessità del problema, ha introdotto notevoli semplificazioni nella descrizione dei prodotti di illuminazione (3 apparecchi tipo, in cui è possibile variare soltanto la potenza e il tipo di lampada, che dovrebbero rappresentare l'enorme e variegata produzione del settore) che ha reso lo studio inadatto quando si volesse decidere se un prodotto di illuminazione abbia un maggiore o minore impatto ambientale rispetto ad un altro.

Lo studio citato, terminato nel 2007 ma iniziato nel 2005, non considera l'impiego di apparecchi a led (a quel tempo poco diffusi), in cui le spiccate differenze costruttive tra i fabbricanti potrebbero portare a notevoli differenze nella valutazione dell'impatto ambientale.

Anche la possibilità di considerare dei "dati aggregati" per le principali componenti dell'impianto (lampade, apparecchi, pali, ecc) comporta notevoli problemi per la difficoltà di reperire tali informazioni dai costruttori in un formato universalmente riconosciuto. Il rischio è che l'utente inserisca dei valori fittizi o poco attendibili, rendendo vana la valutazione dell'impatto ambientale.

Stante la situazione descritta, si è deciso di non inserire questo aspetto nell'attuale implementazione del software.

Lo scopo è quindi quello di determinare la redditività di alcuni investimenti di risparmio energetico, nel campo dell'illuminazione per esterni, tramite la **Life Cycle Cost Analysis (LCCA)**.

Si tratta di uno strumento puramente di carattere economico, che può assumere anche una valenza ambientale, se indirizzato a misure di risparmio energetico,

⁴⁵ Preparatory Studies for Eco-Design Requirements of EuPs FINAL REPORT LOT 9:Public Street Lighting, January 2007

soprattutto se usato in congiunzione con altri strumenti, quali la LCA (Life Cycle Assessment) che "misura" gli impatti ambientali dei vari interventi.⁴⁶

In uno scenario internazionale, in cui il costo delle fonti energetiche è destinato a salire nel tempo, è possibile mostrare, attraverso strumenti economico-finanziari, che alcuni interventi, volti ad una riduzione dei consumi a fronte di un maggiore costo iniziale, portano a lungo termine dei vantaggi economici di notevole entità⁴⁷.

La limitata diffusione di tali soluzioni nel settore della pubblica illuminazione, può essere ricondotta a tre fattori⁴⁸:

- ✓ inerzia dei progettisti e degli acquirenti a percorrere strade innovative, non sfruttando appieno le migliorie e le novità offerte dal mercato (nuove sorgenti, sistemi di alimentazione, apparecchi, sistemi di gestione degli impianti);
- ✓ preferenza degli amministratori a ottenere risultati immediati di poco conto, rispetto a migliori performance su periodi maggiori, senza che vi siano reali limitazioni finanziarie (vincoli di bilancio o spesa pubblica) sui tempi di ritorno dell'investimento;
- ✓ discordanza di interessi tra chi progetta e realizza l'impianto (minor costo iniziale possibile, anche a prezzo di maggiori costi di manutenzione) e chi ne dovrà curare la manutenzione nel tempo (in un arco temporale di almeno 25-30 anni).

Gli elementi considerati nell'analisi sono i seguenti:

Costo investimento iniziale : rappresenta il costo complessivo per l'esecuzione del nuovo impianto/ammodernamento di un impianto esistente (mediante, ad esempio, sostituzione dei soli apparecchi). Comprende il costo degli apparecchi, dei pali, eventuali sbracci o mensole e delle lampade. Se si desidera eseguire un confronto tra schemi impiantistici differenti, occorre incorporare anche i costi di realizzazione, quali ad esempio scavi per posa cavi e per le fondazioni dei pali, costo dei cavi e dei quadri di comando, dell'eventuale regolatore di flusso luminoso, ecc

Durata dell'investimento

Per quanto riguarda la durata di un impianto, occorre osservare che questa dipende, più che dalla durata dei singoli componenti, dall'obsolescenza tecnica dell'impianto, cioè dalla sua convenienza economica rispetto ad altre soluzioni rese disponibili dalla tecnica.

In base all'esperienza passata, un periodo di utilizzazione media per una certa tipologia di impianto, può aggirarsi nell'ordine dei 25-30 anni, ipotizzando almeno una sostituzione intermedia delle parti più vulnerabili (esempio componenti elettriche).

Tasso di crescita costo Energia

La stima del tasso di crescita nominale dell'energia elettrica costituisce un parametro di una certa importanza nell'LCCA, dato che, come abbiamo visto in precedenza, la durata stimata dell'impianto si aggira sui 25-30 anni.

Il tasso sconto reale (e), relativo all'energia, tiene conto del valore dell'inflazione (I_{inf}) e viene usato per calcolare il valore attuale dei flussi di cassa dell'investimento (impianto), secondo la seguente relazione:

⁴⁶ Accordo di Programma MSE-ENEA, "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali", paragrafo 6 (Analisi del costo del ciclo di vita)

⁴⁷ Accordo di Programma MSE-ENEA, "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali", paragrafo 6 (Analisi del costo del ciclo di vita)

⁴⁸ Accordo di Programma MSE-ENEA, "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali", paragrafo 6 (Analisi del costo del ciclo di vita)

$$e = 100 * \left[\frac{(1 + E_n)}{(1 + I_{inf})} \right]$$

E_n :tasso nominale di sconto dell'energia elettrica.

Le difficoltà nascono dalla stima del valore da assegnare a E_n ; occorre infatti fornire l'indicazione al progettista di dove reperire tale informazione, in modo da fornire una stima ufficiale ed attendibile.

L'unico riferimento istituzionale è la relazione annuale dell'Autorità per l'Energia (struttura, prezzi e qualità nel settore elettrico), dove è riportata la seguente tabella.

TAV. 2.50

MESI	2007				2008			
	PREZZO NOMINALE	VAR. % 2007-2006	PREZZO REALE ^(A)	VAR. % 2007-2006	PREZZO NOMINALE	VAR. % 2008-2007	PREZZO REALE ^(A)	VAR. % 2008-2007
Gennaio	121,5	11,7	93,4	9,9	127,9	5,3	95,5	2,3
Febbraio	121,5	11,7	93,1	9,8	127,9	5,3	95,3	2,4
Marzo	121,5	11,7	93,0	9,9	127,9	5,3	94,8	1,9
Aprile	121,0	5,9	92,4	4,3	132,1	9,2	97,7	5,7
Maggio	121,0	5,9	92,2	4,2	132,1	9,2	97,1	5,4
Giugno	121,0	5,9	92,0	4,2	132,1	9,2	96,7	5,1
Luglio	121,2	0,8	91,9	-0,8	136,9	13,0	99,8	8,6
Agosto	121,2	0,8	91,7	-0,8	136,9	13,0	99,6	8,6
Settembre	121,2	0,8	91,7	-0,8	136,9	13,0	99,9	8,9
Ottobre	123,7	1,6	93,4	-0,6	137,7	11,3	100,5	7,7
Novembre	123,7	1,6	93,0	-0,8	137,7	11,3	100,9	8,5
Dicembre	123,7	1,6	92,7	-1,0	137,7	11,3	101,0	8,9
MEDIA ANNUA	121,9	4,8	92,6	2,9	133,7	9,7	98,2	6,2

Indici mensili Istat
dei prezzi dell'energia
elettrica
Numeri indice 1995 = 100
e variazioni percentuali

(A) Rapporto percentuale tra l'indice di prezzo dell'energia elettrica e l'indice generale (esclusi i tabacchi).

Fonte: Elaborazioni su dati Istat, numeri indice per l'intera collettività - Indici nazionali.

I valori considerati nella tabella, sono notevolmente differenti da quelli indicati dal documento ENEA (tenuto conto che i due dati sono riferiti a periodi temporali differenti). Occorre quindi fornire un riferimento su cui basare il calcolo.

Costo Energia : questi costi contengono una doppia incertezza, la prima è legata alla valutazione della quantità di energia consumata nel periodo di studio, la seconda è legata al prezzo dell'energia e al suo tasso di crescita reale. Per questo costo potrebbe essere necessario anche considerare la presenza di tariffe diversificate per fasce orarie a seconda delle condizioni contrattuali di fornitura. Il valore attuale ($VA_{energia}$)⁴⁹ del costo dell'energia è dato dalla seguente relazione (flusso di cassa che ricorre anno per anno, con un tasso di crescita "e"):

$$VA_{energia} = C_{energia} \cdot \sum_{t=1}^n \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t = C_{energia} \cdot \frac{(1+e)}{(d-e)} \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^n \right]$$

$C_{energia}$: valore del flusso di cassa dovuto al costo energetico, stimato all'inizio dell'investimento.

e : tasso di crescita reale del costo dell'energia, tenuto conto dell'inflazione.

d : tasso di sconto.

t : numero di anni tra il momento in cui si manifesterà il flusso di cassa e il momento in cui è redatta l'analisi.

n : durata in anni dell'investimento.

Al medesimo risultato si giunge applicando la seguente procedura:

⁴⁹ "Use of LED or Other New Technology to Replace Standard Overhead and Sign Lighting (Mercury and/or Sodium)", Final Report, NJDOT Research project Manager Edward S. Kondrath, June 2005

- ✓ considero gli effetti del tasso di crescita dell'energia sui flussi di cassa (F_t con $t=1,2,\dots,n$), per ciascuno degli anni di durata dell'investimento,

$$F_1 = A_0 \cdot (1+e)^1, F_2 = A_0 \cdot (1+e)^2, \dots, F_n = A_0 \cdot (1+e)^n$$

- ✓ calcolo poi il valore attuale dei flussi di cassa precedenti, mediante la seguente relazione:

$$VA_t = F_t \cdot \frac{1}{(1+d)^t}$$

Dove

F_t sono i flussi di cassa generati per $t=1,2,3,\dots,n$.

VA_t sono i valori dei flussi di cassa attualizzati, generati per $t=1,2,3,\dots,n$.

Nel caso in cui si voglia trascurare il tasso di crescita del costo dell'energia⁵⁰, e si voglia determinare il flusso di cassa che ricorre anno per anno, rimanendo invariato, si applica la seguente relazione:

$$VA_{energia} = C_{energia} \cdot \sum_{t=1}^n \left(\frac{1}{(1+d)^t} \right) = C_{energia} \cdot \frac{(1+d)^n - 1}{d \cdot (1+d)^n}$$

$C_{energia}$: valore del flusso di cassa per le spese energetiche, stimato all'anno zero.

d : tasso di sconto.

t : numero di anni tra il momento in cui si manifesterà il flusso di cassa ed il momento in cui è redatta l'analisi.

n : durata in anni dell'investimento.

8.10.1 Costo manutenzione (ricambio lampade)

$$VA_{m\&r} = \frac{C_{m\&r}}{(1+d)^t}$$

$VA_{m\&r}$: valore attualizzato del flusso di cassa, relativo al ricambio lampade

$C_{m\&r}$: valore del flusso di cassa (costo) per la manutenzione (ricambio lampade) e comprende il costo del personale, delle attrezzature necessarie al ricambio (come ad esempio il cestello su autocarro).

Il linea generale, tale costo sarà dato dal prodotto dei seguenti fattori:

- ✓ Numerosità delle lampade da ricambiare ($N_{lampade}$).
- ✓ Fattore di maggiorazione per spese generali (1.20).
- ✓ Costo del personale (due operatori) e del cestello ($C_{personale+cestello}$), espresso in €/min.
- ✓ Tempo necessario per il ricambio della lampada e la pulizia del vetro $T_{ricambio}$, espresso in minuti.

$$C_{m\&r} = N_{lampade} \cdot C_{personale+cestello} [\text{€/min}] \cdot T_{ricambio} [\text{min}] \cdot 1.20$$

d : tasso di sconto.

t : numero di anni tra il momento in cui si manifesterà il flusso di cassa ed il momento in cui è redatta l'analisi.

8.10.2 Costo manutenzione (pulizia)

$$VA_{m\&p} = \frac{C_{m\&p}}{(1+d)^t}$$

⁵⁰ Valore di difficile valutazione in alcuni scenari

$VA_{m\&p}$: valore attualizzato del flusso di cassa, relativo al costo della pulizia degli apparecchi

$C_{m\&p}$: valore del flusso di cassa per la manutenzione (costo pulizia apparecchio). In questo costo sono assorbiti il costo della manodopera, del personale, delle attrezzature necessarie all'accesso all'apparecchio di illuminazione (come ad esempio il cestello su autocarro).

Il linea generale, tale costo sarà dato dal prodotto dei seguenti fattori:

- ✓ Numerosità degli apparecchi dell'impianto ($N_{apparecchi}$).
- ✓ Fattore di maggiorazione per spese generali (1.20).
- ✓ Costo del personale (due operatori) e del cestello ($C_{personale+cestello}$), espresso in €/min.
- ✓ Tempo necessario per la pulizia del vetro $T_{pulizia}$, espresso in minuti.

$$C_{m\&p} = N_{lampade} * C_{personale+cestello} [\text{€/min}] * T_{pulizia} [\text{min}] * 1.20$$

d : tasso di sconto.

t : numero di anni tra il momento in cui si manifesterà il flusso di cassa ed il momento in cui è redatta l'analisi.

8.10.3 Costi manutenzione (diversi da pulizia e ricambio lampade)

$$VA_{m\&diversi} = \frac{C_{m\&diversi}}{(1+d)^t}$$

$VA_{m\&diversi}$: valore attualizzato del flusso di cassa, relativo ad altri costi di manutenzione, diversi dal ricambio lampade e della pulizia.

$C_{m\&diversi}$: valore del flusso di cassa all'anno zero per la manutenzione (altri costi di manutenzione).

In questa voce possono essere inseriti i costi relativi a:

- manutenzione dell'impianto di regolazione del flusso (secondo le indicazioni fornite dal costruttore);
- manutenzione su apparecchi di illuminazione (sostituzione ausiliari elettrici, come reattore, accenditore, condensatore) o del led driver. Per apparecchi tradizionali, si può ipotizzare la sostituzione degli ausiliari elettrici almeno una volta nell'arco di vita dell'impianto (ogni 10 anni circa); per gli apparecchi a led, il led driver potrebbe avere una durata inferiore del led driver rispetto alla durata dei led stessi. Per la stima potrebbe essere assunti il valore di MTBF del led driver dichiarato dal costruttore per la temperatura di esercizio del componente all'interno dell'apparecchio.

d : tasso di sconto.

t : numero di anni tra il momento in cui si manifesterà il flusso di cassa ed il momento in cui è redatta l'analisi.

8.10.4 Investimenti

Coincide con il costo di una delle lampade comprensivo dello smaltimento della vecchia sorgente (espresso in €) nel caso di apparecchi tradizionali, oppure coincide con il costo di nuovi apparecchi e lo smaltimento dei vecchi nel caso di un impianto a led.

L'occorrenza temporale di tali investimenti sarà determinata dal ciclo di ricambio lampade (es. ogni 3 anni) o dalla capacità dell'apparecchio a led di mantenere il flusso luminoso nel tempo nelle condizioni di esercizio.

$$VA_{investimenti} = \frac{I}{(1+d)^t}$$

dove

$VA_{investimenti}$: valore attualizzato del flusso di cassa, relativo all'investimento rappresentato dall'acquisto delle lampade per il ricambio o dell'intero apparecchio (nel caso di impianto con l'impiego di LED)

I: flusso di cassa determinato dall'investimento per l'acquisto di nuove sorgenti luminose (con periodicità dipendente dal piano di manutenzione adottato) o apparecchi (nel caso di soluzione a led).

d : tasso di sconto.

t : numero di anni tra il momento in cui si manifesterà il flusso di cassa ed il momento in cui è redatta l'analisi.

8.10.5 Valore residuo degli impianti

Per quanto riguarda il valore residuo dell'impianto, si può ipotizzare una perdita lineare di valore nel tempo, a partire dall'istante di installazione fino alla fine della sua vita media. Il valor residuo dell'impianto riguarda la sola sorgente luminosa, che al termine della vita utile dell'impianto, potrebbe aver funzionato per un numero di ore inferiore alla sua durata di vita (a causa del ciclo di ricambi programmati) e quindi, almeno teoricamente, rappresentare un valore economico di cui tenere conto.

Nel caso di durata 30 anni dell'impianto assumendo che, al termine della vita utile dell'impianto, le sorgenti abbiano funzionato per 2.5 anni rispetto ad una vita di 4 anni, il valore residuo dell'impianto sarà pari a $(4-2.5)/4=37.5\%$ circa, rispetto al valore iniziale dell'investimento (costo complessivo delle lampade installate).

$$R_{es} = C_{lampade/apparecchi} * pv$$

$C_{lampade/apparecchi}$: costo complessivo delle lampade per il ricambio/costo complessivo per la sostituzione degli apparecchi a led

pv valore percentuale che stima la perdita di valore dovuto alla differenza tra vita utile della sorgente luminosa e quella dell'impianto.

Tale valore dovrà essere attualizzato mediante la seguente relazione:

$$VA_{residuo} = \frac{R_{es}}{(1+d)^t}$$

dove

$VA_{residuo}$: valore attualizzato del flusso di cassa, relativo al valore residuo degli impianti

R_{es} : flusso di cassa, derivante dal valore residuo dell'impianto.

d : tasso di sconto.

t : numero di anni tra il momento in cui si manifesterà il flusso di cassa ed il momento in cui è redatta l'analisi.

Per semplicità si potrebbe assumere che il valore residuo dell'impianto, al termine della durata dell'investimento, sia nullo⁵¹.

8.10.6 LCCA impianto

Per la stima dell'LCC si ricorre alla seguente suddivisione dei flussi di cassa:

$$LLC = I + E + OM_{m\&r} - R_{es}$$

I : valore attuale degli investimenti.

E : valore attuale dei costi energetici.

$OM_{m\&r}$: valore attuale dei costi operativi, manutenzione e riparazione.

R_{es} : valore attuale residuo dell'impianto.

8.10.7 Indici

Il metodo LCC consente di confrontare più alternative tra loro; quella che produrrà un valore più basso sarà quella con maggiori vantaggi economici.

Le alternative confrontate potrebbero essere differenti:

⁵¹ Le lampade usate vengono normalmente utilizzate per il ricambio lampade tra due ricambi a programma per andare a ripristinare il funzionamento di centri luminosi fuori servizio. Prima di poter utilizzare tali lampade, occorrerebbe verificare il flusso residuo e la tensione di lampada, in modo da evitare di introdurre in esercizio delle lampade poco affidabili. Talvolta il costo di questa selezione non compensa il risparmio ottenuto.

- nel caso di rifacimento di un impianto, la vecchia configurazione con quella derivata dalla riprogettazione;
- due soluzioni alternative per il medesimo problema, l'una che utilizza una soluzione fortemente innovativa (esempio utilizzo di apparecchi a led, tele gestione dell'impianto, controllo adattivo dei livelli di illuminamento in funzione del flusso di traffico) e l'altra che utilizza una soluzione più convenzionale (apparecchi con lampade a scarica).

Gli indici considerati sono quelli definiti nel seguito:⁵²

NS (net savings) consente di confrontare un'alternativa rispetto al caso base (per versioni differenti di impianto per una medesima zona di studio):

$$NS = LCC_{base} - LCC_{alternativa}$$

$$NS = \sum_{t=0}^N \frac{S_t}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^N \frac{\Delta I_t}{(1+d)^t}$$

dove :

NS : net saving dell'alternativa rispetto al caso base

S_t : risparmi conseguiti durante l'anno t-esimo

ΔI_t : costi di investimento aggiuntivi, associati all'alternativa

t : anno di occorrenza

d : tasso di sconto

N : durata dell'investimento

L'alternativa migliore sarà quella con NS più basso, cioè quella che consente di ottenere un maggiore risparmio totale, durante il ciclo di vita dell'impianto.

Il SIR (Saving to Investment) è un indice che misura la relazione tra risparmi prodotti e l'aumento di investimenti per una data serie di alternative.

$$SIR = \frac{\sum_{t=1}^N S_t / (1+d)^t}{\sum_{t=1}^N \Delta I_t / (1+d)^t}$$

dove:

S_t sono i risparmi attualizzati ottenuti all'anno t-esimo.

ΔI_t sono gli incrementi di investimento associati all'alternativa.

t : anno di occorrenza.

d: tasso di sconto.

N numero di anni nel periodo di studio.

Questo indice rappresenta quanti euro vengono risparmiati per ogni euro investito inizialmente; un investimento alternativo sarà quindi più conveniente rispetto ad uno base quando questo indice è maggiore di 1.

L'AIIR (Adjusted Rate of Return), misura invece il guadagno proveniente da un investimento, in termini di percentuale annua:

$$AIIR = (1+d) * \sqrt[N]{SIR} - 1$$

dove :

AIIR : Adjusted Rate of Return alternativa.

d : tasso di sconto.

SIR : saving to investment.

N : numero di anni del periodo di studio.

⁵² Gli indici considerati sono quelli indicati nel documento MSE-ENEA, "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali", paragrafo 6 (Analisi del costo del ciclo di vita)

Un'alternativa risulta conveniente dal punto di vista economico, se AIRR è maggiore del tasso di sconto utilizzato nell'analisi, che può essere visto come il minimo tasso di ritorno accettabile per l'investitore.

PB Periodo di rimborso (*Pay Back Period*, nella notazione inglese): calcolo del numero di anni necessario per compensare l'investimento attraverso il risparmio. Nel caso di confronto tra due differenti alternative, si utilizzano le corrispondenti grandezze incrementali (numero di anni necessario affinché sia compensato l'incremento di investimento iniziale, attraverso l'incremento del risparmio).

Il DPB (Discounted Payback) di un investimento rappresenta il numero di anni che occorre aspettare affinché la somma cumulata della differenza tra il risparmio all'anno t-esimo e i costi aggiuntivi di investimento dell'alternativa, nello stesso periodo, eguagli o superi l'incremento di investimento iniziale dell'alternativa.

$$\sum_{t=1}^y \frac{(S_t - \Delta I_t)}{(1+d)^t} \geq \Delta I_0$$

y: Discounted payback di un'alternativa.

S_t : risparmi conseguiti durante l'anno t.

ΔI_0 costi di investimento iniziali associati all'alternativa.

ΔI_t costi di investimento aggiuntivi, diversi da quelli iniziali, associati all'alternativa.

t: anno di occorrenza.

d: tasso di sconto.

Per valutare un investimento con il DPB, occorre confrontare il tempo di ritorno calcolato con quello massimo ammissibile dall'investitore, compatibilmente alle proprie dinamiche finanziarie.

8.10.8 Trattamento dell'incertezza

I tempi di ritorno degli investimenti nel risparmio energetico possono avvenire in tempi lunghi e per tale motivo la stima dei costi è piuttosto incerta (l'operazione è piuttosto critica per alcune voci di spesa come ad esempio i costi energetici) e questo provoca un certo grado di incertezza nella valutazione complessiva.

Una tecnica molto usata per valutare l'incertezza della stima consiste nell'utilizzare l'analisi di sensibilità, cioè nel fare variare alcuni parametri all'interno di un possibile intervallo di variazione e di osservare come variano gli indici dell'investimento.

L'individuazione dei parametri sensibili per la valutazione dell'investimento può essere fatta facendo variare di una percentuale fissa, tutti i parametri dell'investimento, uno per volta, andando a individuare quelli che fanno variare in maniera significativa il valore degli indici.

È facile prevedere che si risconterà una forte dipendenza degli indici dal costo dell'energia e quindi occorrerà verificare che l'investimento continui ad essere vantaggioso al variare di questo costo all'interno di un intervallo ritenuto ammissibile.

Considerando la variazione di più parametri significativi contemporaneamente, si possono creare degli scenari, in cui osservare la convenienza dell'investimento.

Il programma dovrà essere in grado di individuare i parametri significativi e consentire all'utente la valutazione di uno o più scenari, fornendo all'ingresso gli intervalli di variazione di ciascuno dei costi considerati.

Il programma dovrà poi essere in grado di calcolare il punto di "break-even", in cui i risparmi conseguiti sono pari all'incremento degli investimenti.

In questo modo è possibile determinare quanto può variare un dato in ingresso (tipicamente un costo) affinché l'investimento sia ancora vantaggioso;

l'investitore sarà tanto più soddisfatto quanto il valore attuale del parametro risulta distante dal punto di break-even.

8.11 Rappresentazione delle informazioni in uscita

Le informazioni in uscita dovranno essere rappresentate in forma tabellare e grafica; in particolare i risparmi energetici andranno espressi in tonnellate di CO₂ risparmiate e in TEP (tonnellate di petrolio equivalenti).

Per quanto riguarda LCC, i valori attualizzati, ottenuti nella durata dell'investimento, dovranno essere rappresentati in formato grafico, come mostrato nell'esempio della Figura 38.

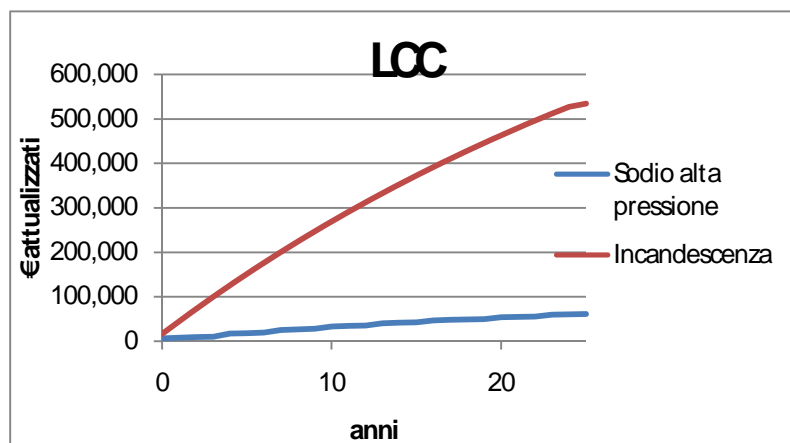


Figura 38 Andamento temporale LCC per le due alternative esaminate.

L'andamento nel tempo dei flussi di cassa generati dall'impianto, dovrebbe essere rappresentato con uno schema simile a quello proposto alla Figura 39.

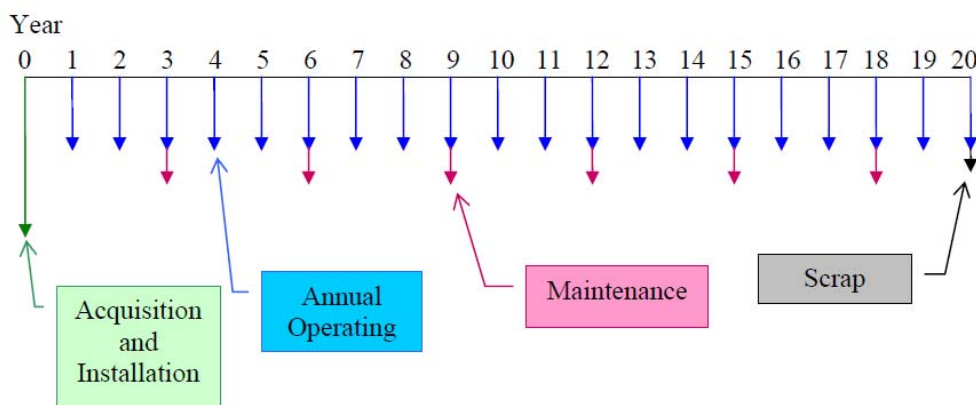


Figura 39 Andamento dei flussi di cassa durante l'arco di vita utile dell'impianto (20 anni).

Milano, 26.2.2010
Prof. Maurizio Rossi
Politecnico di Milano

Allegati: file "Sottoalimentazione_lampade.xls"

DATI SOTTOALIMENTAZIONE LAMPADE

Lampada a fluorescenza 36 W tipo OSRAM L36/21

Tensione alimentazione (Volt)	% Tensione nominale	Corrente lampada (A)	% Corrente nominale	Potenza lampada + alimentatore (W)	% Potenza lampada + alimentatore	VA	% VA	cosφ	% flusso
220	100.00	0.24	100.00	45	100.00	52.8	100.00	0.85	100
210	95.45	0.22	91.67	41.5	92.22	46.2	87.50	0.9	90.3
200	90.91	0.2	83.33	37	82.22	40	75.76	0.93	79
190	86.36	0.18	75.00	33	73.33	34.2	64.77	0.96	75.8
180	81.82	0.165	68.75	28	62.22	29.7	56.25	0.94	74.2
170	77.27	0.15	62.50	23.5	52.22	25.5	48.30	0.92	58.1
160	72.73	0.145	60.42	18	40.00	23.2	43.94	0.78	51.6

Lampada al sodio alta pressione 250 W tipo OSRAM NAV-T

220	100.00	1.49	100.00	285	100.00	327.8	100.00	0.87	100
210	95.45	1.4	93.96	253	88.77	294	89.69	0.86	89.6
200	90.91	1.34	89.93	220	77.19	268	81.76	0.82	78.1
190	86.36	1.3	87.25	190	66.67	247	75.35	0.77	63.5
180	81.82	1.21	81.21	165	57.89	217.8	66.44	0.76	53.1
170	77.27	1.13	75.84	143	50.18	192.1	58.60	0.74	43.8
160	72.73	1.07	71.81	125	43.86	171.2	52.23	0.73	33.9
150	68.18	1	67.11	108	37.89	150	45.76	0.72	27.6
140	63.64	0.94	63.09	94	32.98	131.6	40.15	0.71	22.4

Lampada Alogenuri metallici 400 W OSRAM HQI-T

220	100.00	1.9	100.00	380	100.00	418	100.00	0.91	100
210	95.45	1.77	93.16	342	90.00	371.7	88.92	0.92	89.2
200	90.91	1.7	89.47	310	81.58	340	81.34	0.91	76.7
190	86.36	1.62	85.26	282	74.21	307.8	73.64	0.92	68.2
180	81.82	1.54	81.05	250	65.79	277.2	66.32	0.9	56.1
170	77.27	1.45	76.32	225	59.21	246.5	58.97	0.91	47.1
160	72.73	1.39	73.16	200	52.63	222.4	53.21	0.9	38.6
150	68.18	1.3	68.42	175	46.05	195	46.65	0.9	32.3

140	63.64	1.2	63.16	155	40.79	168	40.19	0.92	22.4
Lampada al sodio alta pressione 400 W OSRAM NAV-T									
220	100.00	2.27	100.00	450	100.00	499.4	100.00	0.9	100
210	95.45	2.12	93.39	410	91.11	445.2	89.15	0.92	91.2
200	90.91	2	88.11	360	80.00	400	80.10	0.9	82
190	86.36	1.88	82.82	325	72.22	357.2	71.53	0.91	74
180	81.82	1.75	77.09	285	63.33	315	63.08	0.9	65.2
170	77.27	1.69	74.45	250	55.56	287.3	57.53	0.87	55.2
160	72.73	1.58	69.60	215	47.78	252.8	50.62	0.85	46.8
150	68.18	1.45	63.88	192	42.67	217.5	43.55	0.88	41.6
140	63.64	1.35	59.47	170	37.78	189	37.85	0.9	36
Lampada al sodio alta pressione 150W RADIO RNP-T									
220	100.00	0.9	100.00	151	100.00	198	100.00	0.76	100
210	95.45	0.85	94.44	134	88.74	178.5	90.15	0.75	84.1
200	90.91	0.8	88.89	123	81.46	160	80.81	0.77	73.9
190	86.36	0.76	84.44	108	71.52	144.4	72.93	0.75	59.2
180	81.82	0.71	78.89	97	64.24	127.8	64.55	0.76	47.1
170	77.27	0.68	75.56	88	58.28	115.6	58.38	0.76	41.4
160	72.73	0.64	71.11	79	52.32	102.4	51.72	0.77	34.4
150	68.18	0.6	66.67	70	46.36	90	45.45	0.78	29.9
140	63.64	0.57	63.33	61	40.40	79.8	40.30	0.76	24.2
Lampada ai vapori di mercurio 250 W OSRAM HQL									
220	100.00	1.25	100.00	260	100.00	275	100.00	0.95	100
210	95.45	1.18	94.40	235	90.38	247.8	90.11	0.95	85
200	90.91	1.12	89.60	212	81.54	224	81.45	0.95	73.2
190	86.36	1.04	83.20	188	72.31	197.6	71.85	0.95	62.7
180	81.82	0.99	79.20	166	63.85	178.2	64.80	0.93	57.5
170	77.27	0.93	74.40	150	57.69	158.1	57.49	0.95	51
160	72.73	0.86	68.80	130	50.00	137.6	50.04	0.94	42.5
150	68.18	0.82	65.60	111	42.69	123	44.73	0.9	35.3
Lampada ai vapori di mercurio 125 W OSRAM HQL									
220	100.00	0.68	100.00	138	100.00	149.6	100.00	0.92	100
210	95.45	0.63	92.65	125	90.58	132.3	88.44	0.94	89

200	90.91	0.6	88.24	112	81.16	120	80.21	0.93	80
190	86.36	0.58	85.29	104	75.36	110.2	73.66	0.94	71.7
180	81.82	0.54	79.41	89	64.49	97.2	64.97	0.92	63.4
170	77.27	0.52	76.47	79	57.25	88.4	59.09	0.89	57.2
160	72.73	0.47	69.12	67	48.55	75.2	50.27	0.89	49
150	68.18	0.44	64.71	58	42.03	66	44.12	0.88	40
140	63.64	0.4	58.82	50	36.23	56	37.43	0.89	31

Lampada ai vapori di sodio bassa pressione 90 W

220	100.00	0.62	100.00	114	100.00	136.4	100.00	0.84	100
210	95.45	0.61	98.39	111	97.37	128.1	93.91	0.87	98.5
200	90.91	0.585	94.35	104	91.23	117	85.78	0.89	96.6
190	86.36	0.595	95.97	100	87.72	113.05	82.88	0.88	93.5
180	81.82	0.61	98.39	95	83.33	109.8	80.50	0.87	86.5
170	77.27	0.62	100.00	88	77.19	105.4	77.27	0.83	77
160	72.73	0.63	101.61	81	71.05	100.8	73.90	0.80	69.2
150	68.18	0.64	103.23	72	63.16	96	70.38	0.75	59.4
140	63.64	0.64	103.23	63	55.26	89.6	65.69	0.70	49.5