



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

AMBIENTE e SOCIETA'



ILLUMINAZIONE A LED E SOSTENIBILITA' AMBIENTALE





ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

ILLUMINAZIONE A LED E SOSTENIBILITA' AMBIENTALE

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per suo conto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Quaderni – Quaderno Ambiente e Società 9/2014
ISBN 978-88-448-0688-0

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica
ISPRA

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Coordinamento editoriale:
Daria Mazzella
ISPRA – Settore Editoria

04 DICEMBRE 2014

Autori

Valeria Canè, Cristina Farchi, Maria Logorelli, Giuseppe Marsico, Luisa Vaccaro (Servizio AMB-AGF ISPRA)

INDICE

CAPITOLO 1- LA TECNOLOGIA SOLID STATE LIGHTING (SSL)	7
1.1.Principi generali di funzionamento e alcuni parametri caratteristici dei LED	7
1.2 Potenzialità e criticità della tecnologia SSL	13
1.3 I LED ed il loro impatto sanitario	17
CAPITOLO 2- ILLUMINAZIONE A LED E RISPARMIO ENERGETICO	24
2.1 Strategie per il risparmio energetico nell'illuminazione	24
2.2 La nuova etichettatura energetica delle lampade	26
2.3 Illuminazione pubblica a LED e risparmio energetico	29
2.4 Metodologia per la valutazione dell'efficienza energetica di apparecchi e impianti per l'illuminazione pubblica	31
CAPITOLO 3- ILLUMINAZIONE A LED E INQUINAMENTO OTTICO E LUMINOSO	38
3.1 Inquinamento ottico e luminoso: il quadro normativo	38
3.2 L'inquinamento luminoso e il suo impatto sull'ambiente	46
3.3. L'inquinamento luminoso e l'illuminazione stradale: lo specifico caso dei LED.	49
CAPITOLO 4- L'ILLUMINAZIONE E L'IMPATTO SULLA FLORA E SULLA FAUNA: APPROFONDIMENTI SULL'ILLUMINAZIONE A LED	53
4.1 L'impatto dell'illuminazione sulla fauna	53
4.2 L'illuminazione e l'impatto sulla flora: approfondimenti sull'illuminazione a LED	56
CAPITOLO 5- RAPPORTO DI MISURA DELLE SORGENTI LED – INDAGINE SVOLTA SULL'ARMATURA STRADALE IGUZZINI "ARCHILEDE"	60
5.1. Introduzione	60
5.2. Sorgente luminosa sotto indagine	60

5.3 Misure in esterno	61
5.4 Misure in interno	63
Conclusioni	67
BIBLIOGRAFIA (ARTICOLI, TESTI):	68
BIBLIOGRAFIA (RAPPORTI):	71
NORMATIVA:	72
GLOSSARIO	74

PRESENTAZIONE

Lo scopo del presente Quaderno è di effettuare una panoramica aggiornata sui sistemi di illuminazione a LED, considerandone gli aspetti di impatto sull'ambiente, che sono quelli di pertinenza di questo Istituto, ovvero riguardanti l'inquinamento luminoso, gli impatti sulla flora e sulla fauna ed il risparmio energetico.

Inoltre, sono presi in considerazione alcuni aspetti legati all'impatto sanitario di questa nuova tecnologia che, in alcuni prodotti presenti sul mercato, si caratterizza per avere un'emissione relativamente elevata nella banda del blu, banda spettrale a cui si riconosce, in caso di esposizioni intense e prolungate, la capacità di indurre danni a carico della retina e che, per questo motivo, deve essere indagata più approfonditamente.

Note per la lettura:

I termini in corsivo (ad esclusione di quelli riportati nel capitolo 4) sono spiegati nel glossario

Ringraziamenti:

Si ringraziano Enel Sole e iGuzzini Italia per aver fornito informazioni, dati e le lampade sulle quali effettuare le misurazioni.

CAPITOLO 1- La tecnologia Solid State Lighting (SSL)

di Maria Logorelli, Luisa Vaccaro

1.1. Principi generali di funzionamento e alcuni parametri caratteristici dei LED

In questi ultimi anni la tecnologia più innovativa che si sta inserendo nel mercato illuminotecnico, in sostituzione di alcune sorgenti di luce tradizionali, è quella basata su materiali semiconduttori (*diodi*) ad emissione di luce che convertono l'elettricità in luce, denominata illuminazione allo stato solido (Solid State Lighting - SSL), che comprende l'illuminazione a LED (Light Emitting Diode) e a OLED (Organic Light Emitting Diode).

Tali dispositivi generano una luce bianca in diverse tonalità e variazioni cromatiche, dal bianco caldo al bianco freddo, e prevedono al loro interno sorgenti di luce puntiforme e ad elevata intensità.

Come le lampade ad incandescenza e a scarica, anche il LED ha una lunga storia alle spalle, non come sorgente per l'illuminazione di ambienti, bensì nel ruolo di micro-componente optoelettronica pensata per la segnalazione. Solo a partire dagli anni '90, grazie ai LED emittenti radiazioni di frequenza maggiore rispetto ai predecessori, il campo di applicazione dei LED si è esteso, interessando l'illuminazione di ambienti interni ed esterni.

Il LED è un particolare *diodo a giunzione p-n* ad emissione luminosa, costituito da un sottile strato di materiale *semiconduttore* drogato (ovvero sottoposto a *drogaggio*) che, al transito di corrente, genera radiazioni nello *spettro elettromagnetico* della luce visibile (Figura 1).

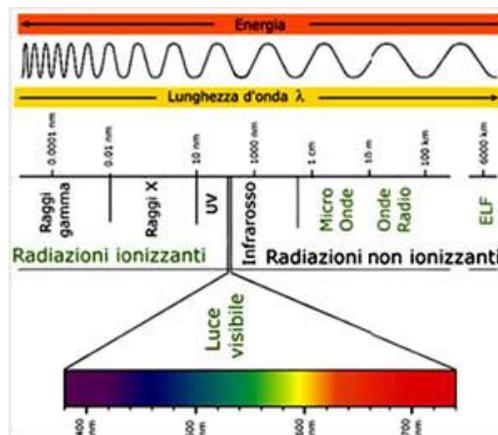


Figura 1 Spettro della luce visibile (lunghezze d'onda tra 380 nm-760 nm)

Queste ultime si originano grazie al passaggio degli elettroni da un livello energetico superiore ad uno inferiore; maggiore è questo salto, minore è la lunghezza d'onda della radiazione emessa. Il salto energetico che si può ottenere dipende dal drogaggio a cui è sottoposto il materiale semiconduttore.

TAVOLA PERIODICA degli ELEMENTI

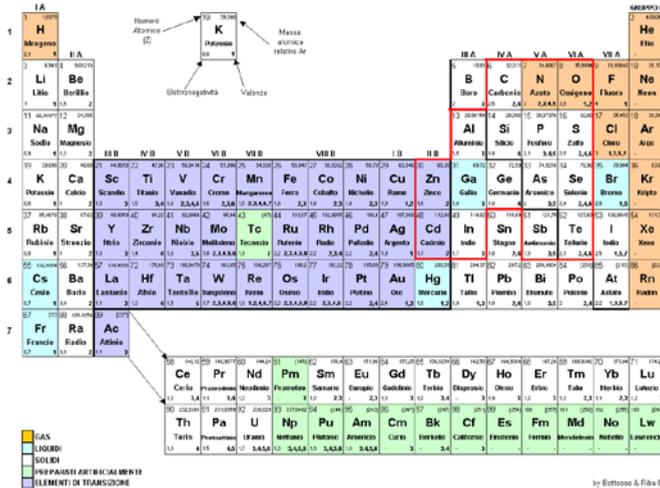


Figura 2 Tavola periodica degli elementi in cui vengono evidenziati nel riquadro rosso gli elementi chimici utilizzati nella produzione dei materiali semiconduttori per la produzione di LED.

Nei dispositivi LED i semiconduttori maggiormente utilizzati sono: l'arseniuro di gallio GaAs, il fosfuro di gallio GaP, il fosfuro arseniuro di gallio GaAsP, il carburo di silicio SiC, il nitruo di gallio e indio GaInN.

Il LED è quindi assimilabile ad una sorgente a banda stretta poiché la larghezza di banda copre generalmente un intervallo di lunghezze d'onda tra i 20 nm e i 30 nm. A differenza delle sorgenti tradizionali, l'emissione dei LED per l'illuminazione non si accompagna generalmente a radiazioni diverse da quelle dello spettro visibile. Dai diagrammi energetici (figura 3), risulta chiaramente che il LED produce radiazioni raccolte intorno ad una radiazione principale che esprime il massimo valore di potenza (radiazione di picco); la sua lunghezza d'onda (o la sua frequenza) diventa il parametro caratterizzante.

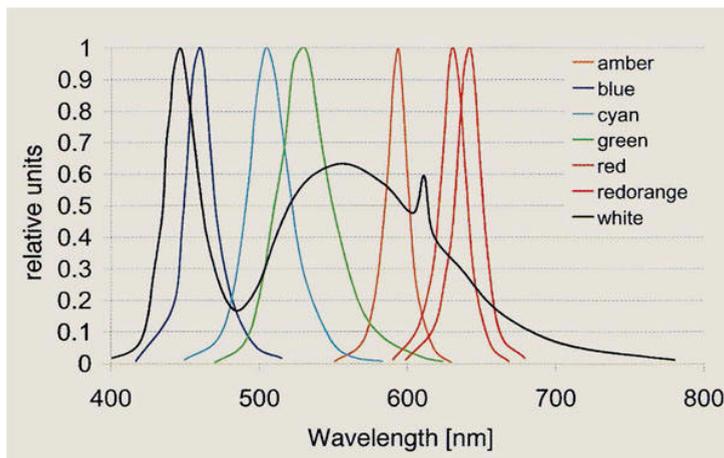


Figura 3 Spettri di emissione caratteristica di LED con emissione nel visibile [11]

Il mondo dei LED è caratterizzato da una notevole diversificazione di prodotti disponibili, caratterizzati da varie funzioni e prestazioni, che permettono impieghi diversificati. Esistono LED idonei per gli impieghi nel campo della segnalazione (tipo THT “Through Hole Technology”), delle guide di luce (tipo SMT “Surface Mounted Technology”), dell’illuminazione di piccole zone di ambienti interni a valenza prevalentemente decorativa, dell’illuminazione di ambienti interni ed esterni (tipo LED di potenza o Power LED). Sia i LED SMT, sia i Power LED, possono essere poi proposti in aggregazione in serie o in parallelo per incrementare il flusso complessivo (i cosiddetti moduli o array LED) e tali soluzioni sono particolarmente utilizzate in ambienti esterni.

Il piccolo elemento di materiale semiconduttore drogato, che prende il nome di chip, ha, a suo corredo, elementi ottici necessari alla distribuzione più opportuna del *flusso luminoso*.

Tutti i diodi luminosi emettono luce con spettri a banda stretta (luce pressoché monocromatica). La luce policromatica (bianca), necessaria per illuminare gli ambienti, si può ottenere mediante diverse tecniche: sintesi additiva di colori o fluorescenza di fosfori.

Con i LED, quindi, cambia il modo di generare luce bianca. È possibile, infatti, integrare tre LED in un solo modulo LED, oppure tre chip in un solo LED (LED multi chip), dove gli elementi attivi generano le diverse radiazioni che per sintesi additiva formano lo spettro di luce bianca. Intervenendo sui parametri di alimentazione dei singoli elementi, si riescono a riprodurre le diverse tonalità di luce bianca. Come mostrato in figura 4, già da alcuni anni i LED bianchi raggiungono un livello di efficienza fino a 100 lm/W e per questo vengono sempre più utilizzati nell’illuminazione generale.

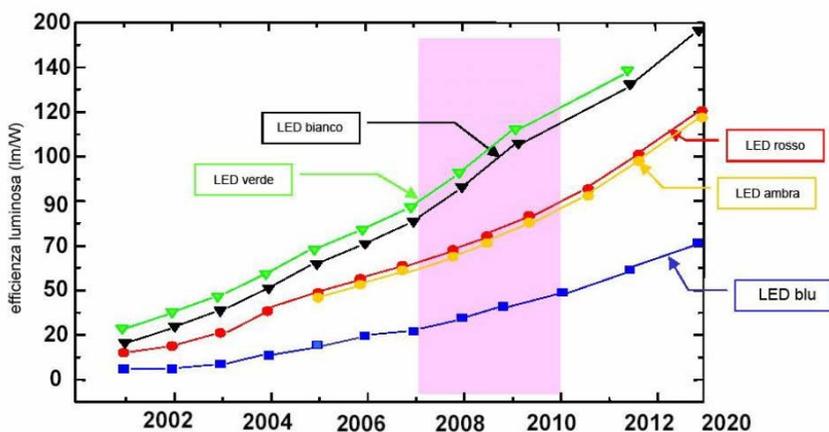


Figura 4 Andamento degli incrementi di efficienza luminosa dei LED monocromatici e dei LED bianchi [11]

Alcuni dei più importanti parametri caratteristici dei dispositivi LED sono: il rendimento luminoso, l'efficienza luminosa, la temperatura di giunzione, la temperatura di colore e l'indice di resa cromatica.

Con il termine rendimento luminoso si intende il rapporto tra flusso luminoso uscente dall'eventuale ottica secondaria ed il flusso complessivo prodotto dall'elemento attivo. Il sistema ottico ha il delicato ruolo di riflettere o rifrangere la quota di flusso in modo da cambiare le direzioni di propagazione per orientare i vettori intensità. La presenza dell'ottica secondaria altera il diagramma di flusso (*solido fotometrico*) del LED. Quanto maggiore è questo rapporto, tanto minori saranno le perdite di radiazioni e migliore sarà il rendimento luminoso. Un'accurata ingegnerizzazione, unitamente ad una ottimale scelta dei materiali e della qualità ottica degli stessi, consente di produrre sorgenti aventi un rendimento luminoso dell'ordine del 70%. [10]

L'efficienza luminosa di una sorgente di luce è il rapporto tra il flusso luminoso e la potenza elettrica assorbita, espressa in lumen/watt. Il flusso luminoso, come detto nel glossario, è definito in base alla percezione soggettiva dell'occhio umano e, quindi, alla risposta spettrale dell'occhio verso le componenti dello spettro visibile, parametro definito dal CIE¹ mediante la

¹ La Commissione internazionale per l'illuminazione (Commission Internationale de l'Éclairage) opera, grazie alle sue forti basi tecniche, scientifiche e culturali, nel campo della cooperazione mondiale e lo scambio di informazioni per ciò che riguarda la scienza e l'arte della luce e dell'illuminazione, il colore e la visione, la fotobiologia e la tecnologia delle immagini. Fin dalla sua istituzione nel 1913, la CIE è diventata un'organizzazione professionale ed è riconosciuta da ISO come organismo internazionale di normalizzazione nel campo dell'illuminazione.

funzione di ponderazione spettrale o *curva di sensibilità relativa* $V(\lambda)$, il cui andamento è mostrato in fig.5. Il massimo della sensibilità si attesta a 555 nm, corrispondente a radiazioni capaci di dare uno stimolo visivo giallo-verde. Si osservi come l'intensità dello stimolo visivo, nonché la percezione cromatica, non sia legata tanto all'energia complessiva che incide sulla retina quanto piuttosto alla distribuzione spettrale, ovvero all'abbondanza relativa delle diverse componenti (100 fotoni di luce monocromatica di λ 555 nm daranno uno stimolo circa 10 volte superiore a quello di 100 fotoni di λ 650 nm o di 100 fotoni di λ 470 nm). Per quantificare lo stimolo ci viene in aiuto la teoria codificata a livello internazionale dal CIE della sensibilità dell'occhio medio internazionale, da cui il coefficiente o curva di sensibilità relativa $V(\lambda)$.

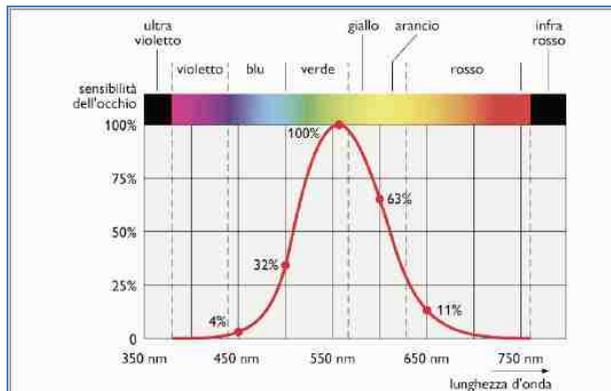


Figura 5 Curva del coefficiente di sensibilità relativa $V(\lambda)$ (con indicazioni dei colori percepiti nel caso di radiazioni monocromatiche, in funzione della lunghezza d'onda)

La teoria prevede (come si può notare dalla figura 5) un valore massimo del coefficiente intorno al valore di lunghezza d'onda pari a 555 nm percepita come luce di colore giallo-verde; quindi, una lampada che sia in grado di convertire tutta la potenza elettrica in radiazione a 555 nm, avrebbe la maggior efficienza luminosa possibile, ma non sarebbe in grado di riprodurre altro colore al di fuori del giallo-verde.

Per quanto riguarda il valore dell'efficienza luminosa dei LED bianchi, si evidenzia, in figura 4, che, mentre attorno agli anni '90, si attestava sui valori da 20 lm/W a 40 lm/W, attualmente ha già oltrepassato la soglia dei 100 lm/W e, nel prossimo futuro, supererà i 150 lm/W, arrivando a competere quindi con le sorgenti al sodio a bassa pressione che, ad oggi, hanno la migliore efficienza luminosa.

Un altro parametro importante per i LED è la temperatura della giunzione. Tale temperatura, fornita dal produttore del dispositivo, rappresenta il limite invalicabile per una vita operativa ragionevole del componente. Essa è strettamente correlata al flusso luminoso emesso ed alla durata: maggiore è

la temperatura, minore sarà il flusso luminoso e, conseguentemente, la durata della sorgente LED.

Considerato che, ad oggi, non è possibile misurare direttamente tale temperatura e che ciò che viene fornito dai produttori è il risultato di valutazioni indirette mediante codici di calcolo che cercano di riprodurre il comportamento della giunzione, un dato importante per ricavare indirettamente la temperatura di giunzione del LED, è la temperatura della piastra sul quale è saldato poiché questa è ovviamente superiore ad essa. Nell'illuminazione stradale, spesso si registrano temperature delle piastre (e, quindi, a maggior ragione, di quelle di giunzione) sopra i valori indicati dai produttori. Quindi risulta fondamentale il ruolo ricoperto dall'apparato dissipativo del calore posto a corredo dell'apparecchio di illuminazione: una lunga durata del diodo LED è correlata al mantenimento di una temperatura di esercizio entro un opportuno intervallo operativo, da cui consegue il controllo della temperatura di giunzione, della temperatura dell'ambiente immediatamente circostante e della capacità dissipativa della piastra su cui sono saldati i LED.

La temperatura di colore ha come riferimento l'emissione del *corpo nero*. Nella realtà, il corpo nero è un'astrazione, ma alcuni materiali mostrano un comportamento abbastanza simile a quello dei corpi neri (ad esempio, i metalli incandescenti, i filamenti delle lampadine, detti corpi grigi). I LED non sono assimilabili a corpi neri, pertanto, al fine di caratterizzarne la cromaticità, è stato definito il concetto di Temperatura di Colore Correlata: in pratica la temperatura del corpo nero che manifesta la medesima cromaticità del LED in esame. Una sorgente LED nasce come una sorgente quasi monocromatica, il cui colore dipende dal materiale utilizzato nella sua fabbricazione; al fine di produrre luce bianca, si ricorre alla cosiddetta "conversione della luminescenza" applicando, cioè, uno o più tipi di fosfori al diodo, in modo da convertire parte della radiazione nella porzione di spettro mancante. Ad esempio, la temperatura del bianco prodotto dipende, oltre che dal tipo e dalla formulazione dei fosfori, anche dalla quantità di questi usata nel rivestimento: la luce bianca fredda viene prodotta diminuendo la quantità di fosfori, la luce bianca calda viene prodotta aumentandola. La massima efficienza luminosa si ottiene utilizzando la minima quantità di fosfori possibile; pertanto, temperature di luce bianca calda, pur essendo contraddistinte da una qualità della luce più bilanciata, ovvero più simile allo spettro solare e, quindi, in grado di fornire un indice di resa cromatica CRI (Color Rendering Index) più elevato, hanno rese luminose fino al 40% inferiori rispetto a quelle di luce bianca fredda.

L'indice di resa cromatica (CRI) indica quanto la percezione cromatica di un oggetto illuminato con una determinata sorgente sia distante dalla percezione correlata all'illuminazione del medesimo oggetto con sorgenti di riferimento standard: varia in una scala da un minimo di 0 ad un massimo di 100. Il metodo, definito dallo standard CIE 13.3.-1995 [N27], si basa sul calcolo delle differenze che una serie di campioni di colore presenta al variare dell'illuminazione della sorgente di riferimento rispetto a quella in esame:

proprio per l'arbitrarietà sulla scelta dei colori presi in considerazione, questo parametro rappresenta un valore abbastanza soggettivo. Lo spettro di emissione di una sorgente, al fine di garantire una corretta percezione dei colori, dovrebbe avvicinarsi il più possibile allo spettro solare nel visibile. Il tipico spettro LED a luce bianca (figura 3) non è continuo e presenta un grande gap sull'emissione del rosso (da 620 nm a 700 nm). Nel rapporto CIE 177:2007 [N28], la Commissione Internazionale per l'Illuminazione ha stabilito che il CRI non può essere applicato alle moderne sorgenti bianche a LED. Generalmente, si consiglia di tenere in considerazione il CRI nei casi in cui la restituzione fedele dei colori sia fondamentale per il compito visivo considerato.

1.2 Potenzialità e criticità della tecnologia SSL

Le ragioni per le quali il mercato dell'illuminazione basata sui LED si sta diffondendo sempre più per l'illuminazione sia di ambienti interni, sia di ambienti esterni, risiedono nel fatto che si tratta senza dubbio di una sorgente ad elevata efficienza luminosa (alto rapporto tra flusso luminoso emesso sulla potenza assorbita), come appare evidente dall'analisi comparativa della figura 6, e con promettenti vantaggi anche dal punto di vista del risparmio energetico (sia per la superiore efficienza luminosa, sia per la maggiore durata degli apparecchi), anche nell'ottica del raggiungimento dell'obiettivo per l'UE "20-20-20" (20% di riduzioni di CO2 entro il 2020).

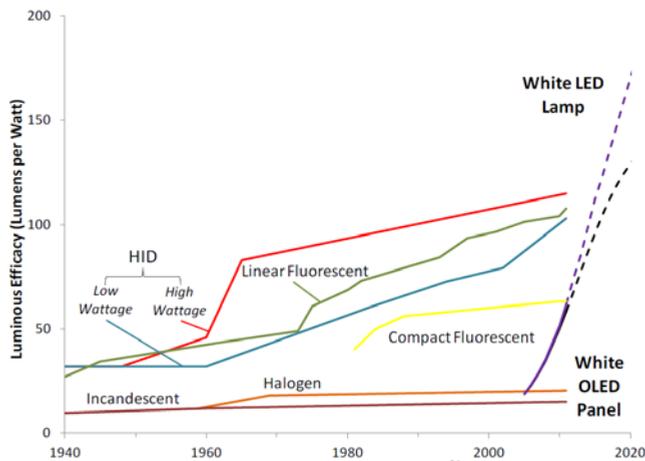


Figura 6 Evoluzione temporale dell'efficienza luminosa di diversi tipi di lampade [42]

Esiste già sul mercato una vasta gamma di prodotti SSL creati in funzione delle diverse esigenze degli utilizzatori, ma permangono diversi punti in sospeso riguardanti le caratteristiche principali della tecnologia SSL.

In particolare, esistono già buoni apparecchi di illuminazione a LED per le aree pedonali e per l'illuminazione d'accento. Per quanto riguarda l'illuminazione stradale, intesa come illuminazione pubblica della sede stradale, bisogna sottolineare che le sorgenti LED sono caratterizzate da elevata *radianza* (flusso luminoso molto intenso generato da una o più sorgenti di ridotte dimensioni), che, per garantire una corretta illuminazione del piano stradale, deve essere ridistribuito attraverso ottiche opportune.

Analizziamo ora, brevemente, alcuni pro e contro riguardanti l'utilizzo di tali sorgenti in ambito illuminotecnico.

Ad oggi, i costi di questi dispositivi sono mediamente superiori rispetto agli altri prodotti che utilizzano tecnologie di illuminazione tradizionali, anche se questi stanno diminuendo di anno in anno per i rapidi progressi realizzati a livello di componenti e di processi di fabbricazione e anche grazie ai notevoli investimenti effettuati dalle varie aziende costruttrici. Nel decidere come valutare il costo di un prodotto per l'illuminazione, bisognerebbe basarsi sul calcolo del costo di proprietà complessivo (*total cost of ownership – TCO*), indicatore adottato in sede di consultazione Europea nel documento MEEUP Product Cases Report 2005 della Commissione Europea.² [55]

A fronte di questi alti costi, tali dispositivi sono però spesso scelti per il risparmio energetico che dalla loro adozione deriva: per quanto riguarda l'illuminazione stradale, in particolare, si va dal caso di semplice sostituzione di sorgenti tradizionali con lampade a LED su armature stradali preesistenti, che non va preso come caso per calcolare un reale risparmio perché lo scenario non è mai paragonabile in termini di efficacia dell'illuminazione del piano stradale, alla riprogettazione dell'intero impianto, con cui si può ottenere un risparmio energetico fino al 70%.³

Un altro elemento a favore della scelta di questo tipo di sorgenti è l'accensione istantanea in qualsiasi condizione con temperature di utilizzo da -40°C a +60°C.

Altra caratteristica delle sorgenti a LED è, come già accennato, la maggiore facilità di indirizzare il flusso luminoso rispetto alle lampade tradizionali, consentendo di illuminare in modo più puntuale e mirato e quindi di contenere, in linea teorica, sempre mediante progettazione idonea, le dispersioni nelle direzioni non desiderate, con benefici in termini di riduzione dell'inquinamento luminoso ed ottico (cfr. cap. 3) ed in coerenza con le norme tecniche di riferimento.[N1][N2]

² Adozione a livello di legislazione italiana : Criteri ambientali minimi per l'illuminazione pubblica -Decreto Ministro Ambiente 22/2/2011 [N26]

³ In base alla Seconda agenda strategica di ricerca della piattaforma PHOTONICS21, le sorgenti SSL possono elevare il potenziale risparmio energetico fino al 50% e, se abbinate a sistemi intelligenti di gestione dell'illuminazione, fino al 70% rispetto ai consumi odierni.

Aspetto decisamente non trascurabile è rappresentato dagli innegabili vantaggi a livello di sostenibilità ambientale di questa tecnologia. Basti pensare, innanzitutto, alla diminuzione della quantità di materiale usato nella produzione con conseguente riduzione dei pesi e degli ingombri. Inoltre, i tipi di materiali utilizzati in fase di smaltimento agevolano le operazioni di selezione e separazione, considerata la semplicità dei collegamenti e le minime dimensioni. Infine, si sottolinea l'assenza di mercurio, sostanza tossica e nociva per la salute dell'uomo, degli animali e per la conservazione dell'ambiente. A seguito dell'emanazione della Direttiva 2005/32/CE, le lampade a vapori di mercurio sono in fase di ritiro dal mercato e perderanno la Certificazione CE a partire dal 2015; le ditte produttrici ne hanno ridotto quindi la quantità, ma rimane una sostanza da controllare in fase di dismissione o fine vita del prodotto. [N17] [N18] A proposito di sostenibilità ambientale, sono già stati condotti i primi studi che confrontano gli impatti prodotti dall'illuminazione a LED durante l'intero ciclo di vita con quelli prodotti da altre tecnologie di illuminazione.[40]

Negli apparecchi illuminanti a LED sono pressoché assenti le emissioni di raggi ultravioletti (UV) e infrarossi (IR).

A favore dei LED sono le dichiarazioni della durata di vita degli apparecchi di illuminazione a LED da parte dei costruttori che si attestano tra le 50.000 ore e le 100.000 ore.

A tale proposito, è bene aprire una parentesi per fare alcune precisazioni tecniche: sebbene non esista ancora uno standard industriale sulla base del quale è possibile misurare la "vita" del singolo LED, i produttori più importanti fissano il termine della vita quando il LED raggiunge l'80% dell'emissione di luce iniziale.

Per "vita media" di una lampada, invece, si intende il periodo di tempo dal momento dell'accensione in cui il 50% delle lampade di quel tipo smette di funzionare (mortalità del 50%).

In realtà, negli apparecchi illuminanti a LED, rispetto alle sorgenti tradizionali, un guasto non necessariamente interrompe la produzione del flusso luminoso, ma può semplicemente portare ad una riduzione dello stesso, a seconda delle caratteristiche costruttive dell'apparecchio, generalmente costituito da sorgenti multiple.

Il gruppo industriale produttore di Power LED "ASSIST (Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies)" ha determinato che il mantenimento del 70% del flusso iniziale corrisponde al limite inferiore al di sotto del quale l'occhio umano percepisce una riduzione della luce emessa; per questo motivo viene definita come vita utile di un LED il tempo medio trascorso prima che venga raggiunto questo limite (indicato generalmente come L70 che sta per "lumen maintenance 70%). A questo proposito, è stato introdotto dalla "Illuminating Engineering Society" (IES) il parametro di "vita utile" per un apparecchio LED attraverso il quale si considera un apparecchio a LED funzionante finché non raggiunge un abbattimento del flusso luminoso del 30%.

Ad oggi, nell'illuminazione stradale, sono usate lampade con LED di potenza (Power LED) che vengono alimentate con correnti di pilotaggio costante per garantire il funzionamento in un regime in cui è massima l'efficienza, compatibilmente con una bassa probabilità di bruciare il dispositivo a fronte di una modesta variazione dei parametri. Se si mantiene la stessa corrente di pilotaggio, anche la tensione all'interno del diodo è costante e quindi è costante il flusso di particelle cariche positive e negative trasportate attraverso la giunzione e, quindi, è costante il numero di fotoni emesso.

I produttori, in genere, indicano il flusso luminoso emesso relativamente ad una corrente di riferimento (generalmente pari a 350 mA) e ad una temperatura di giunzione di laboratorio di 25°C. Teoricamente, un aumento delle correnti di pilotaggio aumenta il numero di fotoni emesso e quindi il flusso luminoso dei LED ma, in realtà, l'aumento delle correnti di pilotaggio comporta una maggiore dissipazione di potenza che fa aumentare la temperatura di giunzione con conseguente surriscaldamento della stessa e riduzione del flusso emesso.

Quindi, come già detto nel precedente paragrafo, la temperatura di giunzione è un parametro fondamentale da tenere sotto controllo per la progettazione di un efficace apparecchio illuminante a LED, insieme alla corrente di pilotaggio e alla capacità dissipativa della piastra su cui sono saldati i LED. Per quanto riguarda il prolungamento della durata dei LED, inoltre, è essenziale che il driver, ovvero l'alimentatore a commutazione che ha il compito di convertire la corrente alternata della rete elettrica in una corrente continua di valore costante, protegga i diodi luminosi da sovratensioni e surriscaldamento.

Alla luce di quanto illustrato, la valutazione della prestazione di un apparecchio a LED sulla base dei lumen emessi può essere riduttiva. Per valutare appieno un prodotto LED occorre esaminare l'efficienza complessiva del sistema, il controllo dell'ottica utilizzato, la gestione della dispersione termica dei LED e sapere dopo quanto tempo l'apparecchio raggiungerà un decadimento del 30% dei lumen. I prodotti con efficienza ottica e gestione termica ottimale produrranno, in media, a parità di corrente fornita, più lumen dei prodotti HID (lampade a scarica ad alta intensità) tradizionali. Come ha affermato il Dipartimento dell'Energia Americano (DOE) a conclusione del Programma di test sui sistemi illuminanti a stato solido commerciali (Solid-State Lighting - SSL): "Finché il settore delle tecnologie SSL e le conoscenze su cui si basa non matureranno, ogni valutazione concernente le prestazioni degli apparecchi di illuminazione SSL deve fondarsi sull'efficacia complessiva dell'apparecchio (vale a dire dell'intero apparecchio di illuminazione compresi i LED, i dissipatori di calore, le lenti ottiche e il corpo) per evitare di fuorviare gli acquirenti causando danni nel lungo periodo al mercato degli SSL".

Rispetto ad altre tipologie di lampade, quali le lampade ad incandescenza o altre sorgenti di impiego più recente, come le lampade alogene e le lampade fluorescenti compatte (anche dette "a basso consumo"), le lampade a LED presentano alcune caratteristiche particolari che potrebbero comportare un

impatto dal punto di vista dei possibili impatti sulla visione e conseguentemente sulla sicurezza e la salute.

In particolare, l'elevata radianza dei LED, o la corrispondente elevata *luminanza* delle sorgenti a LED, aumenta la probabilità di abbagliamento (consistente in una riduzione della funzionalità visiva), che può essere di due tipi: "debilitante" o "fastidioso". L'abbagliamento debilitante, dovuto all'elevata luminanza di tali sorgenti, può rendere istantaneamente difficoltosa la visione degli oggetti, ma la condizione risulta essere transitoria perché il riflesso naturale di avversione all'esposizione ad una luce intensa, che comporta la chiusura delle palpebre e il movimento della testa volto ad allontanare l'occhio dal fascio di luce incidente, tutela il recettore. La natura transitoria e reversibile di questo tipo di abbagliamento fa sì che esso, anche se non costituisce un rischio per la salute, possa rappresentare un rischio per la sicurezza. L'abbagliamento fastidioso, dato dall'eccessivo contrasto tra sorgenti e superfici riflettenti di differente luminosità, produce una sensazione sgradevole, pur non ostacolando totalmente la visione degli oggetti; tale condizione, se protratta per lunghi periodi, può essere causa di stress, difficoltà di concentrazione, affaticamento visivo.

Oltre all'elevata radianza, dovuta alle dimensioni molto ridotte della superficie emissiva del singolo LED⁴, l'impatto sulla visione più importante da considerare è senza alcun dubbio quello legato allo spettro di emissione dei LED bianchi per illuminazione, che per alcune tipologie di LED può risultare fortemente sbilanciato nella componente blu dell'intervallo spettrale del visibile. Infatti, quest'ultima caratteristica espone l'occhio a maggiore probabilità di danni retinici di natura fotochimica ("danno da luce blu") in quanto questo tipo di danno è indotto prevalentemente dalla radiazione visibile di colore blu-violetto (lunghezze d'onda comprese tra circa 380 nm e 490 nm con massima efficacia a 440 nm).

Quindi, un aspetto centrale nella discussione sulle lampade a LED è certamente quello sanitario, che sarà l'argomento del prossimo paragrafo, anche se soltanto a livello di analisi delle problematiche generali, come già detto in premessa.

1.3 I LED ed il loro impatto sanitario

A differenza del caso delle lampade che emettono radiazione UV per l'abbronzatura artificiale, classificate dalla IARC come cancerogene per l'uomo, generalmente la luce emessa dalle lampade per l'illuminazione non presenta problemi sanitari per quanto riguarda la cute quando utilizzate ed

⁴ Si osservi come la radianza di un LED, o più in generale di una sorgente, possa essere modificata nel verso di una diminuzione o di un aumento a seguito di aggiunta di componenti ottiche capaci di distribuire o focalizzare il flusso. Ai fini della valutazione del rischio, tale parametro va considerato tenendo conto, nella stima o nelle misurazioni della radianza, dell'eventuale presenza di ottiche secondarie, di pannelli diffondenti o opalini, montati di fronte al LED.

installate correttamente⁵. Infatti, la radiazione visibile caratterizzata da lunghezze d'onda maggiori di quelle che compongono la radiazione ultravioletta, può danneggiare la cute con effetti di tipo termico, solo per valori di *irradianza* estremamente elevati, molto superiori a quelli relativi all'emissione delle lampade per l'illuminazione artificiale. Invece, sono possibili effetti sanitari a carico dell'occhio nelle sue diverse strutture (principalmente la cornea, il cristallino e la retina) e, in particolare, per il visibile 400 nm-780 nm, solo la retina.

Di particolare importanza sono i danni alla retina, sulla quale la luce viene focalizzata dall'apparato diottrico dell'occhio (cornea, umor acqueo, cristallino, corpo vitreo), aumentando di diversi ordini di grandezza la densità di potenza incidente rispetto a quella incidente a livello della cornea. In particolare, il danno retinico di natura fotochimica, la cui entità è funzione dello spettro di emissione, del tempo di esposizione e delle dimensioni dell'immagine retinica (a sua volta dipendente dalle dimensioni della sorgente e della distanza di osservazione), viene comunemente definito "danno da luce blu" in quanto indotto prevalentemente dalla radiazione visibile di colore blu-violetto (lunghezze d'onda comprese tra circa 380 nm e 490 nm con massima efficacia a 440 nm).

Nel paragrafo 1.1 è stata introdotta la curva del coefficiente di sensibilità $V(\lambda)$, anche detta curva $V(\lambda)$ di *visione fotopica*. In figura 7 sono riportate le curve di visione fotopica $V(\lambda)$, di *visione mesopica* $V_{eq}(\lambda)$ e di *visione scotopica* $V'(\lambda)$, per le quali i corrispondenti valori di soglia della luminanza sono:

- visione fotopica pura $\rightarrow L > 10^{-2} \text{ cd m}^{-2}$ (nella pratica $L > 10^{-1} \text{ cd m}^{-2}$)
- visione mesopica $\rightarrow L \approx 10^{-2} \text{ cd m}^{-2}$
- visione scotopica $\rightarrow L < 10^{-5} \text{ cd m}^{-2}$ (nella pratica $L < 10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$).

Nella successiva figura 8, si evidenzia come il "picco da luce blu", presente più o meno intensamente nello spettro di emissione della maggior parte dei LED bianchi, ricada in una zona della curva $V(\lambda)$ dove è minima la risposta visiva dell'occhio: in sostanza, pur contribuendo poco allo stimolo visivo, deposita una elevata energia sulla retina, energia capace di dar luogo ad un danno fotochimico.

⁵ Si noti che, anche le lampade tradizionali espongono ad UV, come ad esempio le lampade alogene, se non si aggiunge un vetro di protezione o quelle ad alogenuri metallici o fluorescenti se il coating, ovvero il rivestimento di fosfori non è ben steso.

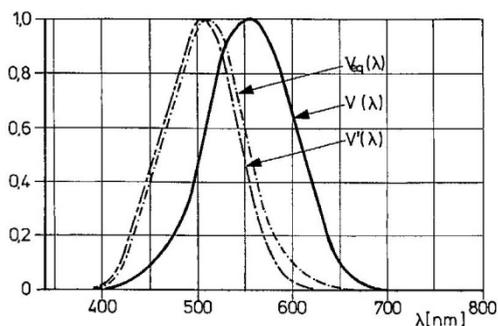


Figura 7 Curve di visione fotopica $V(\lambda)$, visione mesopica $V_{eq}(\lambda)$ e scotopica $V'(\lambda)$

La Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP) ha emanato delle linee guida [47] in cui sono stati fissati i limiti di esposizione per la prevenzione dei rischi per la salute connessi alle esposizioni alle radiazioni ottiche, compresi i danni da luce blu. I limiti fissati dall'ICNIRP sono stati recepiti nella direttiva 2006/25/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 5 aprile 2006 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli Agenti Fisici (radiazioni ottiche artificiali) e sono stati, di conseguenza, recepiti a livello nazionale nel D.Lgs. 81/2008 noto come "Testo unico sulla sicurezza sul lavoro". [N15]

Le linee guida dell'ICNIRP sono inoltre alla base della norma tecnica nazionale CEI EN 62471:2010 (traduzione dalla norma europea EN 62471:2008) "Sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampade", che descrive le modalità di misura e di classificazione secondo quattro classi di rischio e che, seppur non strettamente vincolante, rappresenta attualmente l'unico riferimento tecnico per la normativa vigente per quanto riguarda le informazioni che il costruttore può fornire relativamente alla sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampade (comprese le lampade a LED).

La problematica specifica dell'impatto sanitario delle lampade LED è stata esaminata nel 2010 da un gruppo di lavoro dell'ANSES (Agenzia francese nazionale per la sicurezza sanitaria dell'alimentazione, dell'ambiente e del lavoro). Tra i risultati ottenuti dal gruppo di lavoro, pubblicati in un rapporto nell'ottobre 2010 ([41][42]), di particolare interesse sono alcune osservazioni sui rischi connessi ad una luminanza troppo elevata, sui rischi connessi alla luce blu, sulla popolazione particolarmente a rischio.

Il gruppo di lavoro, analizzando alcuni dei LED disponibili sul mercato per l'utilizzo domestico, di un solo watt di potenza, ha evidenziato che danno luogo a luminanze importanti. Per questo motivo, secondo il gruppo di lavoro, non è accettabile la commercializzazione per l'illuminazione domestica di dispositivi a LED che non siano tali da schermare la vista diretta degli stessi singoli elementi LED.

Il suddetto gruppo, inoltre, ha eseguito presso i propri laboratori misure sperimentali di alcuni dispositivi a LED comunemente disponibili sul mercato, al fine di classificarli secondo la già citata norma europea EN 62471:2008 che prevede i seguenti gruppi di rischio: gruppo 0 (esente da rischi), gruppo 1 (rischio basso), gruppo 2 (rischio moderato), gruppo 3 (rischio elevato). Il risultato è che alcuni dispositivi LED utilizzati molto comunemente, anche per l'illuminazione, appartengono al gruppo 2 a causa degli elevati valori di radianza efficace blu, ovvero ponderata secondo lo spettro d'azione del danno da luce blu (grandezza che tiene conto della diversa efficacia biologica nell'indurre il danno da luce blu) da parte delle varie componenti spettrali dello spettro visibile). Il gruppo di lavoro conclude: "l'arrivo su mercato dei LED per l'illuminazione rappresenta una svolta senza precedenti: è la prima volta che sorgenti classificate nel gruppo di rischio 2 sono accessibili al grande pubblico, in vista di applicazioni domestiche e per di più senza indicazioni dei rischi".

Dallo studio ANSES sono state inoltre identificate categorie di persone particolarmente a rischio: i bambini nei quali il cristallino, soprattutto prima degli 8 anni di età, filtra poco la luce blu; le persone prive del cristallino naturale; quelle affette da alcune patologie retiniche e alcune tipologie di lavoratori, come ad esempio gli installatori di impianti per l'illuminazione, i lavoratori dell'industria dello spettacolo, gli addetti ai controlli di qualità in particolari industrie, il personale di sala operatoria, gli addetti alla fototerapia, gli addetti a particolari trattamenti estetici.

Il rapporto ANSES si chiude con alcune indicazioni emerse dal lavoro del gruppo. Si sottolinea che dovrebbero essere definiti criteri e metodologie, anche in ambito di normativa tecnica, che limitino la possibilità di immettere sul mercato lampade LED ad uso domestico (o comunque accessibili alla maggioranza della popolazione) soltanto per i LED appartenenti ai gruppi di rischio 0 e 1, limitando quindi l'utilizzo di LED appartenenti ai gruppi di rischio superiori agli usi professionali; che i fabbricanti dovrebbero ideare dei sistemi che non permettano la visione diretta del fascio luminoso emesso dai LED, al fine di evitare i rischi connessi all'abbagliamento; che bisognerebbe sensibilizzare la popolazione alla protezione dei bambini e delle altre categorie particolarmente sensibili al rischio, per esempio vietando l'utilizzo di sorgenti di luce emittenti una forte componente blu nei luoghi frequentati dai bambini o nei giocattoli; che andrebbero definiti i mezzi di protezione adeguati per i lavoratori particolarmente esposti; che dovrebbe essere prevista un'etichettatura dove vengano riportate le caratteristiche dei LED, in particolare il gruppo di rischio, anche ai fini dell'informazione per i consumatori. Il rapporto suggerisce inoltre che, per i LED classificati in un gruppo di rischio superiore a 0, andrebbe indicata la distanza di sicurezza oltre la quale non è presente un rischio fotobiologico, per poi notificarla in maniera leggibile ai consumatori.

Dopo la pubblicazione del rapporto ANSES, nel nostro Paese, è stata presentata un'interrogazione parlamentare, nella cui risposta il Ministero della Salute sottolineava che la problematica emergente legata alla diffusione

delle lampade LED, in relazione ai possibili rischi per la salute e la sicurezza delle persone, fosse rilevante, e che pertanto si intendeva promuovere un approfondimento tecnico anche a fini regolatori.

Nel 2012, anche per rispondere all'esigenza di approfondire l'argomento, emersa in seguito agli eventi suddetti, è stato avviato, da parte di alcuni soggetti istituzionali, un Tavolo tecnico-scientifico i cui lavori sono attualmente ancora in corso, con lo scopo di analizzare lo stato dell'arte della tecnologia LED rispetto a tutti gli aspetti critici tra i quali, soprattutto, quello relativo alla valutazione dei rischi relativamente ai possibili effetti sulla salute. I partecipanti sono: l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) - Servizio Agenti Fisici, l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) - Dipartimento Tecnologie e Salute, l'Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro INAIL (ex-ISPEL) - Dipartimento Igiene del Lavoro, l'Università degli Studi "La Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica. Il GDL ha accentrato l'attenzione sugli aspetti della valutazione dei rischi finalizzata alla verifica del rispetto dei limiti di esposizione ICNIRP per quanto attiene gli array di LED, i LED multi chip, con e senza ottiche secondarie, tematica rispetto alla quale non sono ancora stati definiti con precisione protocolli condivisi. Gli aspetti tecnici della valutazione impongono di coniugare aspetti legati alla fisiologia della visione, alle caratteristiche geometriche delle sorgenti, con aspetti più propriamente tecnici legati alla misura di grandezze radiometriche. Un passo verso una visione più chiara del problema è stato percorso dall'IEC⁶ con la IEC/TR 62778 [N29] che ha fornito elementi nuovi per una gestione metodologica del problema senza tuttavia concludere il report per quanto attiene gli aspetti della valutazione degli array di LED (situazione assai ricorrente).

Tra gli altri aspetti che possono interessare gli effetti sulla salute dell'uomo in relazione alla luce LED certamente da valutare, ma sul quale le conoscenze ancora non si possono considerare consolidate, vi è quello sull'alterazione dei *ritmi circadiani*. L'esposizione eccessiva alla luce durante le ore notturne può provocare vari effetti, tra i quali: disturbi del sonno e della veglia e disordini metabolici. La luce interferisce con la biosintesi della melatonina, ormone fondamentale nel regolare i ritmi circadiani, ovvero l'orologio biologico interno, e l'esposizione alla luce ne sopprime o ne diminuisce la produzione. La melatonina è anche un oncostatico e di conseguenza una riduzione del suo livello nel sangue può far accelerare la crescita di alcuni tipi di tumore. La curva di sensibilità circadiana [33] ha il picco di efficacia nel sopprimere la produzione di melatonina nel blu, attorno a 460 nm, come si vede in figura 8; quindi, il picco di emissione nel blu dei LED usati per illuminazione esterna coincide proprio con il massimo della curva di efficacia biologica della luce visibile per la soppressione della melatonina. Per tale motivo, le sorgenti LED

⁶ The International Electrotechnical Commission (IEC) è l'organizzazione leader a livello mondiale che prepara e pubblica Standard Internazionali per tutte le tecnologie elettriche ed elettroniche.

vanno indagate, dal punto di vista del loro impatto sanitario, anche per quanto riguarda questi ultimi aspetti.

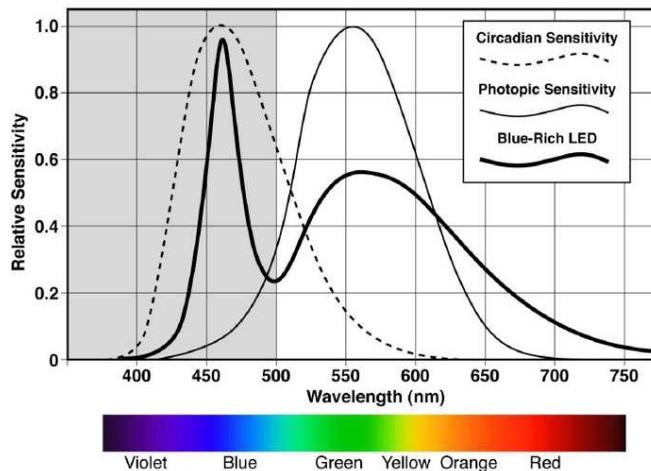


Figura 8: immagine tratta dal comunicato stampa dell'International Dark-Sky Association

L'“orologio circadiano” nei mammiferi è collocato nel nucleo soprachiasmatico (SCN), un gruppo definito di cellule situato nell'ipotalamo. La distruzione di questo nucleo causa la completa assenza di un regolare ritmo sonno-veglia. Il SCN riceve informazioni sull'illuminazione attraverso gli occhi. La retina degli occhi non contiene solo i “classici” fotorecettori, ma anche cellule gangliari retinali fotosensibili. Queste cellule, che contengono un pigmento chiamato melanopsina, seguono un tragitto chiamato tratto retinoipotalamico, che collega l'SCN. È interessante notare che, se le cellule provenienti dall'SCN sono rimosse e coltivate in laboratorio, mantengono il loro ritmo in assenza di stimoli esterni. Sembra che il nucleo SCN prenda le informazioni sulla durata del giorno dalla retina, le interpreti e le invii alla ghiandola pineale che secreta l'ormone melatonina in risposta allo stimolo. Il picco di secrezione della melatonina si raggiunge durante la notte.

Di notte, l'illuminazione artificiale continua ad attivare il nucleo SCN e a disturbare il rilascio naturale di melatonina, che annuncia di solito la comparsa della notte biologica. Ma non tutta la luce stimola ugualmente il nucleo. Alcuni ricercatori [36], osservando un picco di sensibilità alla luce alle lunghezze d'onda di circa 460 nm - 480 nm, hanno dimostrato che queste specifiche lunghezze d'onda, corrispondenti ad un blu profondo, sono particolari segnali di veglia, ed hanno invece evidenziato che la luce rossa ha solo un debole impatto sui recettori di melanopsina ed è meno incline a stimolare la veglia. Quindi, regolando i livelli relativi di luce blu e rossa ai quali le persone sono esposte per tutto il giorno, si potrebbe preservare la normale tempistica del circadiano, anche durante l'esposizione prolungata

alla luce artificiale. A Philadelphia, in Pennsylvania, si sta testando questo approccio in una situazione estrema: la Stazione Spaziale Internazionale. Infatti, l'isolamento protratto in spazi ristretti pone molti problemi per gli astronauti, che sono anche sottoposti all'esperienza disorientante dei cicli giorno-notte risultanti dal momento orbitale della stazione di 90 minuti. In questi casi, l'orologio biologico inizia a correre libero, proprio come per i non vedenti. Studi recenti [2] hanno dimostrato che la luce blu potrebbe aiutare a sincronizzare gli equipaggi terrestri con il *giorno marziano (SOL)* nella missione Phoenix Mars Lander. I ricercatori stanno ora testando l'utilizzo di LED programmabili, sistemi che cambiano dinamicamente la luce bianca dal bianco maggiormente arricchito di blu al bianco arricchito di rosso, su un ciclo di 24 ore. Questa tecnologia può essere molto preziosa in luoghi estremi come veicoli spaziali, sottomarini o strutture di ricerca in Antartide, ma il potenziale più ampio prevede applicazioni per la progettazione di sistemi di illuminazione dinamici per case, scuole e uffici che amplificano lunghezze d'onda verso il blu nelle prime ore del giorno e nelle ore di calo d'attenzione post-prandiale e con lo spostamento a lunghezze d'onda verso il rosso più tardi, verso sera.

Per quanto concerne, invece, l'affaticamento visivo, in uno studio recente [24] si è cercato di individuare gli effetti sulla fatica visiva delle diverse distribuzioni spettrali degli apparecchi di illuminazione in ambiente di ufficio. L'esperimento è stato condotto in due camere sperimentali con diversi tipi di corpi illuminanti a soffitto: LED e lampade fluorescenti. L'affaticamento visivo dei soggetti è stata valutata da tre metodi, ART (Accommodation Response Time) e CFF (Critical Fusion of Flicker), come prova oggettiva, e questionari per la valutazione dei sintomi soggettivi di stanchezza, come prova soggettiva. I risultati hanno mostrato che sia la valutazione oggettiva, sia quella soggettiva della fatica, non sono significativamente differenti tra i diversi tipi di sorgente luminosa.

CAPITOLO 2- Illuminazione a LED e risparmio energetico

di Valeria Canè, Giuseppe Marsico, Luisa Vaccaro

2.1 Strategie per il risparmio energetico nell'illuminazione

L'illuminazione rappresenta il 19% del consumo di elettricità nel mondo e il 14% nell'Unione europea. Nel 2010 le entrate complessive del mercato dell'illuminazione generale in tutto il mondo si sono attestate attorno ai 52 miliardi di euro, di cui quasi il 30% in Europa. Entro il 2020 il mercato mondiale dovrebbe raggiungere, in base alle proiezioni, 88 miliardi di euro, mentre la quota rappresentata dall'Europa dovrebbe scendere sotto il 25%. Le lampade a incandescenza, di cui è in corso in Europa il ritiro dal mercato, saranno soppiantate da nuove tecnologie di illuminazione più ecocompatibili e maggiormente efficienti sotto il profilo energetico. L'illuminazione a LED è la tecnologia più innovativa che si sta imponendo sul mercato, ma la sua attuale penetrazione in Europa è assai ridotta: la quota di mercato dei LED (in valore) ha raggiunto il 6,2% nel 2010. Vari studi prevedono che, entro il 2020, la tecnologia SSL rappresenterà più del 70% del mercato europeo dell'illuminazione generale. [45]

Il DOE (Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America) ha individuato le applicazioni a LED per l'illuminazione come quelle attualmente più efficienti in termini di risparmio energetico. [48,49,50]. ENERGY STAR, il programma congiunto dell'EPA e del Dipartimento per l'Energia degli Stati Uniti per la valutazione delle pratiche per il risparmio energetico e la salvaguardia ambientale, ha qualificato, dal punto di vista del risparmio energetico, l'illuminazione a LED individuando queste qualità: riduce i costi energetici utilizzando il 75% in meno di energia rispetto alle lampade a incandescenza, risparmiando sui costi operativi; riduce i costi di manutenzione; riduce i costi di raffreddamento.

Il McKinsey Global Institute, organo di ricerca economica e gestionale americano, ha cercato di mettere in evidenza, con una ricerca svolta nel 2011, i motivi alla base della lentezza di inserimento sul mercato dei LED e le possibili soluzioni a tale problematica. In primo luogo è stato individuato il costo troppo elevato delle unità LED che comporta un maggiore costo degli apparati di illuminazione e la generale valutazione nei progetti illuminotecnici del costo iniziale d'impianto piuttosto che del TCO (Total Cost Ownership), cioè i benefici in termini di risparmio a lungo termine compresi anche i costi di gestione. Inoltre, questo studio ha messo in luce che, in fase di progettazione illuminotecnica, in genere ci si affida a sorgenti di tipo tradizionale per la mancanza di informazioni e di esperienza su queste nuove sorgenti. In questo studio si evidenzia che, per tenere in considerazione i vari aspetti di costo, è necessario valutare la manutenzione preventiva che si ripercuote sul valore del fattore di manutenzione, il ciclo di sostituzione degli apparecchi (parti non sostituibili), l'indice di costo iniziale e il periodo di

payback (rientro economico dell'investimento). Inoltre, per i LED, l'elevata durata di vita dei prodotti potrebbe far pensare che i costi di manutenzione siano trascurabili, anche se, per le applicazioni in esterno, la manutenzione preventiva va sempre prevista, valutando anche l'ottica dell'apparecchio. Alcuni miglioramenti nella tecnologia di installazione, con un approccio modulare, fanno sì che non sia necessario cambiare l'intero apparecchio quando i LED o i loro driver smettono di funzionare. Per quanto riguarda l'indice di costo iniziale, i sistemi LED sono fino a 5 volte più costosi dei sistemi ai vapori di sodio ad alta pressione (HPS) con potenza e flusso comparabili. I sistemi LED presentano variabilità nel periodo di payback (8-15 anni).[51]

Gli obiettivi per una crescita intelligente, sostenibile e solidale, della strategia Europa 2020 riguardano la riduzione delle emissioni di gas serra del 20% rispetto al 1990, 20% del fabbisogno di energia ricavato da fonti rinnovabili e aumento del 20% dell'efficienza energetica. Nel settembre 2012 è stata emanata la Direttiva 2012/27/EU [N16] sulle nuove norme in materia di efficienza energetica. La nuova direttiva, che di per sé non contiene un obiettivo vincolante ma solo misure da adottare, ha l'obiettivo di aumentare l'uso efficiente dell'energia al fine di ridurre del 20% i consumi energetici al 2020. È di gennaio 2014 un accordo sottoscritto in Commissione Europea dagli Stati Membri, e che sarà preso in considerazione dal Consiglio Europeo entro la primavera di quest'anno, con il quale gli stessi si impegnano a ridurre le emissioni di gas serra (GHG) del 40% rispetto al 1990 entro il 2030. Conseguentemente la Commissione valuterà l'eventuale necessità di modificare la Direttiva 2012/27/UE.

L'adozione su larga scala della tecnologia LED potrebbe contribuire in misura sostanziale al conseguimento degli obiettivi suddetti. I sistemi di illuminazione a LED, infatti, hanno un'efficienza energetica pari a quella dei prodotti omologhi più avanzati (lampade alogene o fluorescenti) che però, a differenza dei primi, hanno ormai raggiunto il loro limite tecnologico di rendimento. Nei prossimi anni è molto probabile che la tecnologia LED supererà, sul piano dell'efficienza energetica, qualunque tecnologia di illuminazione esistente. Essa permetterà un consistente risparmio energetico nell'ambito di impianti di illuminazione intelligente opportunamente progettati, installati e gestiti, e contribuirà in maniera significativa a ridurre le emissioni di CO₂ a livello europeo [45]. Infatti, i LED bianchi hanno già raggiunto un'efficienza energetica pari al 30-50%, con un'efficacia luminosa che va da 100 lm/W a 150 lm/W e un indice di resa cromatica (CRI) pari a 80. I valori-obiettivo previsti per i LED bianchi caldi nei prossimi 10 anni sono: un'efficienza del 50-60%, un'efficacia luminosa superiore a 200 lm/W e un IRC superiore a 90. (cfr. fig. 6, pag. 8).

In figura 9 si evidenzia che, confrontando le emissioni di CO₂ relative a tre tipi di corpi illuminanti diversi ma con lo stesso *flusso luminoso* di 900 lm, durante un ciclo di 25000 ore di esercizio, una lampada LED con una efficienza di 150 lm/W, (che cominciano ad essere già disponibili, come da

previsioni riportate in fig.6, pag.8), risulta sicuramente quella con minore emissione.

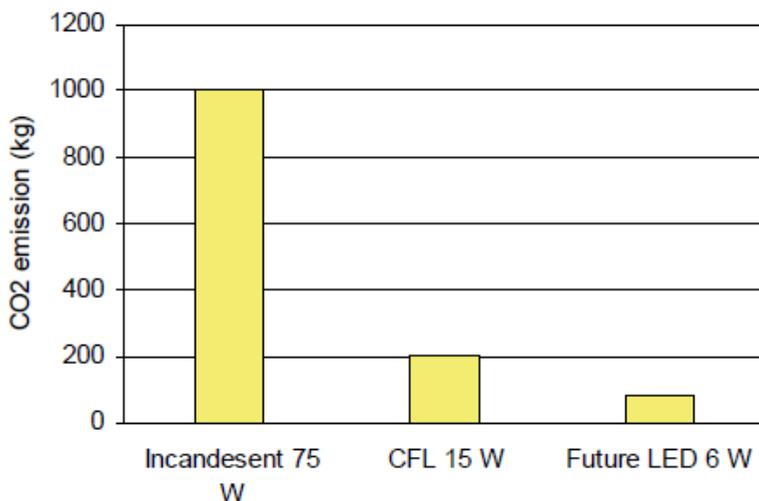


Figura 9 - Emissioni di CO2 durante un ciclo di vita di 25000 ore di una lampada ad incandescenza (12 lm/W), di una CFL(60 lm/W) e di una sorgente LED di prossima generazione(150 lm/W). [46]

C'è da osservare che, accanto all'utilizzo delle nuove tipologie di lampade, gli "alimentatori intelligenti", al posto di quelli tradizionali elettromagnetici, consentono di ottenere ulteriori risparmi di energia, con benefici riguardanti anche la durata delle lampade stesse. Come già evidenziato (cfr. nota 3 pagina 9), nei prossimi anni le sorgenti LED potranno consentire risparmi energetici fino al 50% e, se abbinate a sistemi intelligenti di gestione dell'illuminazione, fino al 70% rispetto ai consumi odierni.

2.2 La nuova etichettatura energetica delle lampade

La direttiva 2010/30/UE [N20] , recepita dal D.Lgs. 28/06/2012, n. 104 [N21], istituisce un quadro per l'armonizzazione delle misure nazionali sull'informazione degli utilizzatori finali, realizzata in particolare mediante l'etichettatura e informazioni uniformi sul consumo di energia del prodotto, in modo da promuovere una scelta più consapevole dei prodotti più efficienti. Il successivo Regolamento delegato n. 874/2012 della Commissione Europea del 12/07/2012 [N22] ha fissato i requisiti in materia di etichettatura e di presentazione di informazioni di prodotto supplementari relativamente a lampade elettriche, comprese quelle a tecnologia LED, stabilendo sei nuove classi energetiche comprese tra A++ ed E. Il citato Regolamento, tra l'altro, specifica che per utilizzatore finale si intende "una persona fisica che acquista, o che ci si aspetta che acquisti, una lampada elettrica o un apparecchio di illuminazione per scopi che non rientrano tra quelli di una sua

attività commerciale, industriale, artigianale o professionale” (art. 2, comma 28). Sono, pertanto, esclusi dal campo di applicazione della direttiva gli apparecchi destinati alla pubblica illuminazione.

Le nuove classi di efficienza energetica sono state identificate tramite la definizione dell'Indice di Efficienza Energetica – IEE che confronta la potenza, corretta per le eventuali perdite dell'unità di alimentazione, con una potenza di riferimento. La potenza di riferimento è ottenuta dal *flusso luminoso* utile, che corrisponde al *flusso luminoso* totale per le lampade non direzionali e al flusso in un cono con angolo di 90° o 120° per le lampade direzionali.

In figura 10 è riportata la tabella riportata nell'All. 6 del Regolamento n. 874/2012, che fornisce la scala di efficienza energetica secondo l'indice IEE.

Classe di efficienza energetica	Indice di efficienza energetica (IEE) per le lampade non direzionali	Indice di efficienza energetica (IEE) per le lampade direzionali
A++ (efficienza massima)	$IEE \leq 0,11$	$IEE \leq 0,13$
A+	$0,11 < IEE \leq 0,17$	$0,13 < IEE \leq 0,18$
A	$0,17 < IEE \leq 0,24$	$0,18 < IEE \leq 0,40$
B	$0,24 < IEE \leq 0,60$	$0,40 < IEE \leq 0,95$
C	$0,60 < IEE \leq 0,80$	$0,95 < IEE \leq 1,20$
D	$0,80 < IEE \leq 0,95$	$1,20 < IEE \leq 1,75$
E (efficienza minima)	$IEE > 0,95$	$IEE > 1,75$

Figura 10 – Classi di efficienza energetica delle lampade (Regolamento delegato n. 874/2012)

L'IEE è calcolato con la formula seguente e arrotondato al secondo decimale:

$$IEE = P_{cor} / P_{ref}$$

P_{cor} è la potenza nominale (P_{rated}) per i modelli privi di unità di alimentazione esterna e la potenza nominale (P_{rated}) corretta in conformità con la tabella seguente per i modelli con unità di alimentazione esterna.

In figura 11 è riportata la tabella del già citato regolamento dove P_{ref} rappresenta la potenza di riferimento ottenuto dal *flusso luminoso* utile del modello (Φ_{use}) mediante le seguenti formule:

$$\text{Per i modelli con } \Phi_{use} < 1300 \text{ lumen: } P_{ref} = 0,88 \sqrt{\Phi_{use}} + 0,049 \Phi_{use}$$

$$\text{Per i modelli con } \Phi_{use} \geq 1300 \text{ lumen: } P_{ref} = 0,07341 \Phi_{use}$$

Ambito della correzione	Potenza corretta per le perdite dell'unità di alimentazione (P_{cor})
Lampade funzionanti con l'unità di alimentazione esterna di una lampada alogena	$P_{rated} \times 1,06$
Lampade funzionanti con l'unità di alimentazione esterna di una lampada LED	$P_{rated} \times 1,10$
Lampade fluorescenti con diametro di 16 mm (lampade T5) e lampade fluorescenti ad attacco singolo a 4 pin funzionanti con l'unità di alimentazione esterna della lampada fluorescente	$P_{rated} \times 1,10$
Altre lampade funzionanti con l'unità di alimentazione esterna di una lampada fluorescente	$P_{rated} \times \frac{0,24\sqrt{\Phi_{use}} + 0,0103\Phi_{use}}{0,15\sqrt{\Phi_{use}} + 0,0097\Phi_{use}}$
Lampade funzionanti con l'unità di alimentazione esterna di una lampada a scarica ad alta densità	$P_{rated} \times 1,10$
Lampade funzionanti con l'unità di alimentazione esterna di una lampada a vapori di sodio a bassa pressione	$P_{rated} \times 1,15$

Figura 11 – Correzione della potenza se il modello richiede un'unità di alimentazione esterna (Regolamento delegato n. 874/2012)

Il flusso luminoso utile (Φ_{use}) è definito come segue, a norma della tabella in figura 12.

Modello	Flusso luminoso utile (Φ_{use})
Lampade non direzionali	Flusso luminoso nominale totale (Φ)
Lampade direzionali con un angolo del fascio di luce $\geq 90^\circ$ diverse dalle lampade a filamento che riportano sull'imballaggio un'indicazione testuale o grafica secondo cui non sono adatte per l'illuminazione di accento	Flusso luminoso nominale in un cono a 120° (Φ_{120°)
Altre lampade direzionali	Flusso luminoso nominale in un cono a 90° (Φ_{90°)

Figura 12 – Definizione del flusso luminoso utile (Regolamento delegato n. 874/2012)

La nuova etichettatura, per quanto attiene ai LED, dispone (All. 1, Regolamento n. 874/2012) che, se l'apparecchio di illuminazione contiene moduli LED non destinati ad essere sostituiti dall'utilizzatore finale, le lettere "LED" siano disposte verticalmente a fianco delle classi A, A+ e A++ e che sia apposta una crocetta sulle classi da B a E.



Figura 13 – Etichettatura prevista per le lampade LED non sostituibili dall'utilizzatore finale (Regolamento delegato n. 874/2012)

2.3 Illuminazione pubblica a LED e risparmio energetico

Nell'ambito della pubblica illuminazione, le applicazioni LED sembrano offrire molteplici vantaggi, sia in termini economici (minori costi di manutenzione, minore costo energetico, possibile alimentazione con micro pannelli solari, etc.), sia in termini gestionali (maggiore affidabilità e maggiore durata). Sono, pertanto, sistemi molto promettenti per l'illuminazione di zone pedonali e ciclabili, per le aree verdi, per il patrimonio architettonico e per tutto quello che richiede una prestazione di illuminazione il più costante possibile. Per quanto riguarda l'illuminazione stradale, vera e propria, occorre dire che, essendo un ambito estremamente tecnico e vario, richiede apparecchi molto performanti e adatti al singolo caso. Per questo motivo l'aspetto progettuale, anche nel caso di applicazioni con tecnologia LED, riveste un carattere di predominante importanza: gli apparecchi per illuminazione stradale devono soddisfare requisiti molto vincolanti dal punto di vista fotometrico. Infatti, il *flusso luminoso* prodotto deve essere indirizzato con precisione nelle direzioni ottimali per la visibilità sulla strada e deve essere schermato nelle direzioni che possono procurare fastidio ai conducenti.

Molte sono le città che hanno scelto di dotarsi in parte, o totalmente, di apparecchi di illuminazione a LED nell'illuminazione pubblica di strade, parcheggi e monumenti, anche nell'ottica di riduzione delle emissioni di CO₂.

La metropoli australiana di Sydney, per esempio, ha adottato un protocollo per lo sviluppo sostenibile, chiamato "Sydney 2030", che punta, proprio per il 2030, alla riduzione del 70% delle emissioni di anidride carbonica nell'intera regione metropolitana attraverso il risparmio energetico ottenibile mediante un utilizzo combinato di armature stradali a LED, di programmi di efficienza energetica delle abitazioni e con l'aumento di pannelli fotovoltaici. A questo scopo, la città si è già dotata di oltre 6500 impianti di illuminazione a LED, cioè più del 75% del totale [43].

Nella città di Toronto sono stati utilizzati sistemi che uniscono l'illuminazione a LED a sistemi di controllo intelligenti che permettono di tagliare i costi energetici anche dell'80% e, quindi, parallelamente, il *flusso luminoso* emesso di una percentuale altrettanto elevata, riducendo l'impatto in termini di inquinamento luminoso ed ottico (cfr. cap.3), fermo restando il mantenimento delle necessarie condizioni di sicurezza pubblica [54]. Questo tipo di controllo dinamico del livello di luminosità permette di mantenere al minimo richiesto la luce in un ambiente, per aumentarne poi l'intensità quando è rilevata, da appositi sensori, la presenza o il movimento di auto o di persone. Ciò permette anche di migliorare la longevità dei dispositivi a LED che, comunque, come tutte le altre tipologie di sorgenti, andando incontro ad invecchiamento, tendono a diminuire il *flusso luminoso*. Allo stesso tempo, il controllo dinamico consente di controllare costantemente, ed eventualmente tamponare, questa diminuzione. Si deve, pertanto, considerare anche il risparmio associato alla minore necessità di manutenzione.

La città di Amsterdam ha scelto di dotare l'autostrada A44 con illuminazione a LED e "smart controls" (controlli elettronici informatizzati), ottenendo un risparmio di 180.000 kWh per 8 chilometri di strada [48]. Il controllo dinamico del *flusso luminoso*, prodotto dagli impianti adottati, permette la riduzione dell'intensità luminosa ad un livello pari al 20% dell'intensità massima registrata durante l'ora di punta. In caso di pioggia o di incidente, il sistema permette un rapido adattamento della luce necessaria a garantire la sicurezza del guidatore.

Queste tipologie di controlli, che permettono un adattamento flessibile della luminosità in base alle reali necessità, sono sicuramente promettenti anche ai fini del contenimento *dell'inquinamento luminoso* (cfr. cap 3) e, pertanto, sono da ricercare tutte le migliorie possibili per perfezionare e standardizzare l'adozione delle stesse a livello internazionale.

In ambito risparmio energetico e pubblica illuminazione, lo sviluppo del modello "Smart Cities" è senza dubbio un obiettivo da perseguire: le città vengono riprogettate attraverso l'uso della rete e di nuove soluzioni digitali, consentendo di migliorare la vita nelle aree metropolitane, di ottenere un'efficienza energetica più spinta, mantenendo inalterata la sicurezza. In queste "nuove" città, gli impianti di illuminazione sono in grado di dialogare tra di loro al fine di ridurre i consumi, massimizzando l'efficienza. I lampioni, in particolar modo, potranno variare autonomamente l'intensità luminosa in base alla programmazione permettendo di adattarsi alle varie condizioni di

traffico, all'orario e alle condizioni di luminosità, come già avviene in molte parti del mondo.

A livello di normativa comunitaria, la Commissione Europea, nella Comunicazione 2003/302 sulla "Politica Integrata dei Prodotti – Sviluppare il concetto di "ciclo di vita ambientale" [N23], ha fissato l'obiettivo di incoraggiare gli Stati membri a dotarsi di piani d'azione per l'integrazione delle esigenze ambientali negli appalti pubblici. Tali piani devono stabilire obiettivi di ampia portata da conseguire entro tre anni, specificando chiaramente le misure da adottare a tal fine. L'Italia ha adottato il "Piano d'azione nazionale per il General Public Procurement (PAN GPP)" con il Decreto Interministeriale dell'11 aprile 2008 [N24], aggiornato in seguito con D.M. del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) del 10 aprile 2013 [N25]. Il PAN, che contempla anche l'utilizzo di tecnologie a LED nell'ambito dell'illuminazione pubblica, fornisce un inquadramento generale sul GPP, definisce degli obiettivi nazionali, identifica categorie di beni, servizi e lavori, considerate prioritarie per gli impatti ambientali e i volumi di spesa, per cui definisce "criteri minimi ambientali", stabiliti appunto con l'Allegato 3 del D.M. 22/02/2011 [N26].

In Italia, i consumi energetici dovuti all'illuminazione pubblica ammontano a 6 TWh/anno (dati TERNA 2011-2013) e rappresentano circa il 2% dell'intero fabbisogno energetico nazionale annuo. Attualmente, a livello nazionale, i principi tecnici e gestionali volti al risparmio energetico possono essere implementati nell'ambito della redazione del PRIC (Piano Regolatore dell'Illuminazione Comunale) che rappresenta uno strumento operativo indispensabile, seppur non obbligatorio, che unisce insieme diverse esigenze, dall'illuminazione corretta e funzionale dell'intero tessuto urbano, fino al soddisfacimento degli obiettivi di risparmio energetico.

2.4 Metodologia per la valutazione dell'efficienza energetica di apparecchi e impianti per l'illuminazione pubblica

Nell'ambito degli impegni sottoscritti in sede comunitaria, e vista anche la necessità da parte delle amministrazioni comunali di contenere i consumi energetici, è necessario disporre di strumenti tecnici di valutazione che consentano di individuare l'efficienza effettiva delle tecnologie disponibili sul mercato.

A tal proposito, il citato decreto D.M. 22/02/2011, che fissa i criteri minimi ambientali da inserire nelle gare della pubblica amministrazione, stabilisce che i sistemi LED per l'illuminazione pubblica devono raggiungere, in funzione della temperatura di colore della luce emessa, almeno i requisiti di efficacia luminosa riportati nella tabella in figura 14.

Temperatura di colore [K]	Criteri minimi
	Efficacia luminosa [lm/W]
$K \leq 3000$	≥ 42
$3000 < K \leq 4000$	≥ 57
$K > 4000$	≥ 62

Figura 14 – Criteri minimi ambientali di efficacia luminosa per sorgenti luminose a LED previsti dal D.M. 22/02/2011.

Nell'ambito delle gare di appalto, vengono assegnati punteggi tecnici premianti agli apparecchi equipaggiati con sorgenti luminose LED che, in relazione alla temperatura di colore della luce emessa, qualunque sia la potenza nominale di alimentazione, soddisfano i seguenti requisiti di efficacia luminosa, come evidenziato in figura 15.

Temperatura di colore [K]	Criteri premianti
	Efficacia luminosa [lm/W]
$K \leq 3000$	≥ 48
$3000 < K \leq 4000$	≥ 65
$K > 4000$	≥ 75

Figura 15 – Requisiti minimi di efficacia luminosa per sorgenti luminose a LED previsti dal D.M. 22/02/2011 al fine del conseguimento di punteggi tecnici premianti.

Il Gruppo HERA Luce ha proposto [50] due criteri energetici per valutare l'efficienza delle apparecchiature e delle lampade utilizzate nella pubblica illuminazione, da non confondersi con le classi energetiche definite dal Regolamento delegato n. 874/2012. Infatti, i criteri energetici utili ad una valutazione dell'efficienza energetica dei sistemi di illuminazione pubblica possono essere distinti in due ambiti: il primo grado di valutazione riguarda il singolo apparecchio illuminante, mentre il secondo si occupa dell'intero impianto di illuminazione.

Per quanto riguarda gli apparecchi illuminanti, i parametri da considerare fanno riferimento alle prestazioni delle componenti principali che contribuiscono a definire l'efficienza: la sorgente luminosa (lampada), le caratteristiche dell'ottica, il tipo di alimentazione. In questo modo è possibile avere una prima valutazione, non direttamente riferita alla particolare installazione impiantistica, ma correlata all'efficienza complessiva dell'apparecchio illuminante.

Relativamente agli impianti di illuminazione, è necessario considerare sia l'apparecchio di illuminazione utilizzato, che le caratteristiche geometriche

dell'impianto installato, in modo da valutare l'efficacia globale del sistema nel suo complesso.

Si definisce efficienza globale di un apparecchio illuminante il rapporto:

$$\eta_a = \frac{\Phi_{sorgente} \cdot BLF \cdot Dlor}{P_{reale}} = \frac{\Phi_{sorgente} \cdot BLF \cdot Dlor}{P_{sorgente} / \eta_b} = \eta_{sorgente} \cdot \eta_b \cdot BLF \cdot Dlor \quad [lm/W]$$

in cui si definiscono:

$\Phi_{sorgente}$: *flusso luminoso* nominale emesso dalle sorgenti nude presenti all'interno dell'apparecchio, espresso in lumen;

BLF: (*Ballast Lumen Factor*) rapporto fra i lumen emessi dal sistema considerato (alimentatore effettivamente installato con lampada di riferimento) e i lumen emessi dal sistema di riferimento (alimentatore di riferimento con lampada di riferimento);

Dlor (Downward light output ratio): rapporto fra *flusso luminoso* emesso dall'apparecchio e rivolto verso l'emisfero inferiore e *flusso luminoso* originariamente emesso dalle lampade nude presenti in esso ed operanti con lo stesso impianto di alimentazione;

P_{reale} : reale potenza assorbita dall'apparecchio, espressa in W, intesa come somma delle potenze assorbite dalle sorgenti e dalle componenti presenti all'interno dello stesso (accenditore, alimentatore/reattore, condensatore, ecc.). Tale potenza è quella che l'apparecchio assorbe dalla linea elettrica durante il suo normale funzionamento (comprensiva quindi di ogni apparecchiatura in grado di assorbire potenza elettrica dalla rete);

$P_{sorgenti}$: potenza nominale della sorgente, espressa in W;

$\eta_{sorgente}$: 'efficienza nominale della sorgente luminosa, espressa in lm/W, intesa come rapporto fra flusso emesso dalla lampada e potenza nominale assorbita dalla stessa in condizioni normali;

η_b : rendimento dell'alimentatore, espresso in percentuale, inteso come rapporto fra la potenza nominale delle sorgenti e la potenza in entrata del circuito lampada-alimentatore con possibili altri carichi ausiliari.

In caso di apparecchio illuminante a LED, in relazione a quanto espresso dalla nuova norma UNI 11356-2010, è possibile calcolare l'efficienza globale dell'apparecchio tramite la seguente formula:

$$\eta_a = \eta_{sistema} \cdot Dlor = \eta_{app} \cdot Dff \quad [lm/W]$$

in cui si definisce:

$\eta_{sistema}$: quoziente del flusso luminoso emesso dal modulo LED diviso la potenza elettrica impegnata dal modulo LED completo del suo dispositivo di alimentazione, comprensivo di componenti meccanici, espresso in lm/W;

napp: rapporto tra flusso luminoso dell'apparecchio e potenza elettrica assorbita dall'apparecchio, espresso in lm/W;

Dff: percentuale di flusso emesso dall'apparecchio rivolta verso la semisfera inferiore dell'orizzonte (calcolata come rapporto fra flusso luminoso diretto verso la semisfera inferiore e flusso luminoso totale emesso), cioè al di sotto dell'angolo di 90°.

Si può notare che la formula di efficienza viene ridotta alla valutazione delle singole componenti installate all'interno degli apparecchi illuminanti (la sorgente attraverso il parametro η_{sorgente} , l'alimentatore attraverso il parametro η_b e l'ottica attraverso il parametro D_{lor}) e, pertanto, si conferma quanto detto nell'introduzione.

Questo parametro, quindi, non indica in maniera diretta il risparmio conseguibile attraverso l'adozione di un particolare apparecchio illuminante (a questo fine si faccia riferimento all'indice di efficienza di un impianto descritto in seguito), ma la potenzialità di questo a conseguire questo genere di risparmi.

Per realizzare gli obiettivi di risparmio energetico è necessario, quindi, definire l'efficienza di un impianto di pubblica illuminazione in base all'energia utilizzata per soddisfare i requisiti illuminotecnici fissati dalle norme tecniche di settore sulla sicurezza stradale.

È utile, a tal fine, fare riferimento al criterio di efficienza energetica SLEEC (Street Lighting Energy Efficiency Criterion), differenziato in SL per la progettazione illuminotecnica in luminanza e SE per la progettazione illuminotecnica in illuminamento.

Per tratti prevalentemente motorizzati, in cui viene richiesto dalla normativa UNI 11248 un calcolo in luminanza, occorre considerare lo SLEEC per luminanza; il valore di SL viene definito come:

$$SL = \frac{P_{\text{reale}}}{L_m \cdot i_{\text{rif}} \cdot l_{\text{media}}} \left[\frac{W}{cd/m^2 \cdot m^2} \right]$$

Per tratti misti, in cui viene richiesto dalla normativa UNI 11248 un calcolo in *illuminamento*, occorre considerare lo SLEEC per *illuminamento*; il valore di SE viene definito come:

$$SE = \frac{P_{\text{reale}}}{E_m \cdot i_{\text{rif}} \cdot l_{\text{media}}} \left[\frac{W}{lux \cdot m^2} \right]$$

in cui si definiscono:

P_{reale} : reale potenza assorbita dall'apparecchio, intesa come somma delle potenze assorbite dalle lampade e dalle componenti presenti all'interno dello stesso. Tale potenza può venire espressa come $P_{\text{sorgente}}/\eta_b$ in cui P_{sorgente} è la potenza nominale della sorgente e η_b è il rendimento dell'alimentatore;

l_{media} : larghezza media della carreggiata o della zona illuminata;

L_m : *luminanza* media mantenuta calcolata secondo le direttive UNI EN 13201, calcolata adottando un coefficiente di manutenzione pari a 0,80 ed un manto stradale di classe C2;

E_m : *illuminamento* medio mantenuto, calcolato secondo le direttive UNI EN 13201, adottando un coefficiente di manutenzione pari a 0,80;

i_{rif} : interdistanza di riferimento in un impianto di pubblica illuminazione fra un punto luce e l'altro, computata secondo la tabella di seguito riportata.

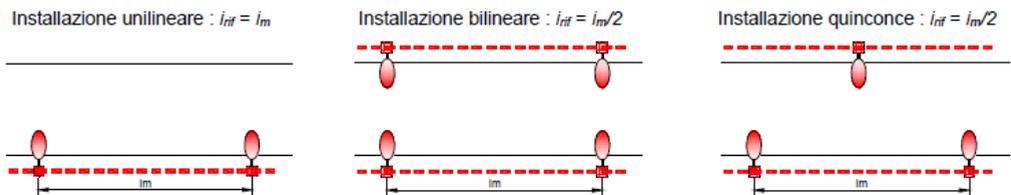


Figura 16 – Schema per l'assegnazione del valore i_{rif} a seconda delle modalità di installazione dei corpi illuminanti.

In tutti i casi, è importante considerare come la luminanza e l'illuminamento medio mantenuti devono essere riferiti sempre alla classe illuminotecnica di progetto, definita sulla base dell'analisi dei rischi effettuata sull'impianto considerato, e calcolati utilizzando un coefficiente di manutenzione $MF=0,80$ e un manto stradale di classe C2: il calcolo considera, infatti, non la situazione contingente in cui può venirsi a trovare un impianto (relativa quindi a fattori esterni, come la frequenza di manutenzione o la frequenza del traffico a differenti ore), ma valori assoluti confrontabili fra loro.

Questo non esula dal considerare, quando possibile, potenze ridotte del sistema (dovute ad esempio al funzionamento di regolatori in cabina o punto-punto) qualora la riduzione di flusso possa limitare l'eventuale surplus di *luminanza/illuminamento* emerso dal calcolo illuminotecnico; la potenza ridotta può venire considerata unicamente nel caso in cui l'impianto, fin dall'accensione, presenti costantemente tali valori.

Analizzando le formule presentate è possibile rilevare come, all'interno di queste, sia comunque presente il consumo per metro, indicato come P_{reale}/l_{media} , e pertanto viene confermato il fatto che lo SLEEC rappresenta un termine di confronto più accurato in quanto introduce anche una valutazione sull'area illuminata e sulla quantità di luce emessa.

Nell'ambito dei criteri minimi ambientali stabiliti dal D.M. 22/02/2011, la classificazione energetica degli impianti è stata classificata attraverso l'Indice di Certificazione Energetica – ICE, definito come rapporto tra il valore di SLEEC di progetto (SE o SL) dell'impianto e del SLEEC di riferimento (SL_R o

SE_R], quest'ultimo stabilito in All. 3 in base alla categoria illuminotecnica della strada. In particolare, come già detto, per tratti stradali prevalentemente motorizzati, in cui viene richiesto dalla normativa UNI 11248 un calcolo che tenga conto della *luminanza*, occorre considerare lo SLEEC per *luminanza* SL; per tratti misti, in cui viene richiesto dalla normativa UNI 11248 un calcolo che tenga conto dell'*illuminamento*, occorre considerare lo SLEEC per illuminamento SE.

La figura 17 mostra la classificazione energetica individuata dall'ICE così come riportata nell'All. 3 al citato decreto.

Tab. C - CLASSIFICAZIONE ENERGETICA	
Indice di consumo energetico ICE = SE/SE _R per calcolo in illuminamento oppure ICE = SL/SL _R per calcolo in luminanza	
ICE < 0,91	
0,91 ≤ ICE < 1,09	
1,09 ≤ ICE < 1,35	
1,35 ≤ ICE < 1,79	
1,79 ≤ ICE < 2,63	
2,63 ≤ ICE < 3,10	
ICE ≥ 3,10	BASSA EFFICIENZA

Figura 17 – Tabella della Classificazione energetica degli impianti di illuminazione pubblica secondo i criteri ambientali minimi previsti dal D.M. 22/02/2011.

In figura 18, le tabelle mostrano i valori di SLEEC di riferimento per le categorie illuminotecniche individuate dalla norma UNI 11248, riportati nell'All. 3 del citato decreto.

Tab. A	
Illuminazione stradale Classi illuminotecniche ME ed MEW	
Classe illuminotecnica	Sleec di riferimento SL_R [W/cdm ² /m ²]
ME1 / MEW1	0,55
ME2 / MEW2	0,58
ME3a	0,74
ME3b / MEW3	0,77
ME3c	0,79
ME4a / MEW4	0,83
ME4b	0,87
ME5 / MEW5	0,93
ME6	1,00

Tab. B	
Illuminazione intersezioni, centri storici Classi illuminotecniche CE	
Classe illuminotecnica	Sleec di riferimento SE_R [W/lx/m ²]
CE0	0,039
CE1	0,045
CE2	0,048
CE3	0,056
CE4	0,062
CE5	0,070

Illuminazione marciapiedi, piste ciclopedonali, parcheggi Classi illuminotecniche S	
Classe illuminotecnica	Sleec di riferimento SE_R [W/lx/m ²]
S1	0,09
S2	0,11
S3	0,14
S4	0,16
S5	0,18
S6	0,19
S7	0,20

Figura 18 – Tabelle dei valori di SLEEC di riferimento per gli impianti di illuminazione pubblica secondo i criteri ambientali minimi previsti dal D.M. 22/02/2011.

CAPITOLO 3- Illuminazione a LED e inquinamento ottico e luminoso

a cura di Valeria Canè, Maria Logorelli, Luisa Vaccaro

3.1 Inquinamento ottico e luminoso: il quadro normativo

La definizione di inquinamento luminoso ed i relativi limiti di emissione delle sorgenti di luce artificiale non sono univoci e ciò è naturale conseguenza del fatto che in Italia non esiste una normativa a livello nazionale.

Spesso si fa coincidere, abbastanza genericamente, il concetto di inquinamento luminoso con l'alterazione della quantità di luce presente naturalmente nell'ambiente notturno, prodotta da un'immissione di luce artificiale di origine antropica fuori dagli spazi che necessitano di illuminazione e che provoca fastidi alle persone, agli animali e all'ambiente. Questo tipo di problematica è particolarmente significativa nelle aree densamente urbanizzate.

Più precisamente, possiamo distinguere l'inquinamento luminoso e l'inquinamento ottico mutuando le definizioni date dalla Legge Regionale del Friuli Venezia Giulia del 18.06.2007 - "Misure urgenti in tema di contenimento dell'inquinamento luminoso, per il risparmio energetico nelle illuminazioni per esterni e per la tutela dell'ambiente e dell'attività svolta dagli osservatori astronomici".

Per **inquinamento luminoso** si intende ogni forma di irradiazione di luce artificiale che si disperda al di fuori delle aree cui essa è funzionalmente dedicata e, in particolare, oltre il piano dell'orizzonte. [N1]

Per **inquinamento ottico**, o luce intrusiva, si indica ogni forma di irradiazione artificiale diretta su superfici o cose cui non è funzionalmente dedicata o per le quali non è richiesta alcuna illuminazione. [N1]

In figura 19 uno schema esemplificativo per riassumere e visualizzare i due concetti.

Le principali sorgenti di inquinamento luminoso sono gli impianti di illuminazione esterna notturna, come ad esempio gli impianti di illuminazione stradale, l'illuminazione di monumenti, di stadi e dei complessi commerciali, i fari rotanti delle discoteche, le insegne pubblicitarie e le vetrine, gli impianti di illuminazione privati.

Azioni preventive devono essere attuate sia dalle amministrazioni locali, che dai privati cittadini, nella realizzazione di impianti di illuminazione esterni. Il contenimento dell'inquinamento luminoso consiste essenzialmente nell'illuminare razionalmente, senza disperdere luce verso l'alto, utilizzando impianti e apparecchi correttamente progettati e montati e nel dosare la giusta quantità di luce.



Figura 19 – Schema esplicativo inquinamento ottico e luminoso

Negli ultimi anni, come detto, il nostro Paese ha fatto un consistente sforzo legislativo, a livello regionale, mentre non esiste attualmente una normativa nazionale che disciplini tale fenomeno. A livello regionale, solo le Regioni Calabria e Sicilia non hanno una legislazione propria, le altre 17 regioni e le Province Autonome di Trento e Bolzano hanno normative locali che riguardano l'inquinamento luminoso.

La situazione attuale, in merito alla presenza di leggi regionali contro l'inquinamento luminoso in Italia, è riportata in tabella 19, in cui vengono anche riportati i limiti di emissione verso l'alto.

Le normative regionali sull'inquinamento luminoso in alcuni casi coniugano questo tema con quello del risparmio energetico; infatti, con il contenimento dell'inquinamento luminoso si ottiene il conseguente vantaggio di contenere le emissioni di CO₂ necessarie per l'energia elettrica destinata all'illuminazione.

Un riferimento normativo tecnico, condiviso fra i vari operatori di settore, è la norma tecnica UNI 10819/1999 "Luce e illuminazione - Impianti di illuminazione esterna - Requisiti per la limitazione della dispersione verso l'alto del *flusso luminoso*". [N2] La suddetta norma è applicabile solo nelle regioni in cui le leggi in materia fanno riferimento esplicito ad essa (Piemonte, Valle d'Aosta, Basilicata) o in quelle dove non ci sono leggi regionali di riferimento (Calabria e Sicilia) che specifichino i limiti di emissione verso l'alto.

Un riferimento normativo tecnico, condiviso fra i vari operatori di settore, è la norma tecnica UNI 10819/1999 "Luce e illuminazione - Impianti di illuminazione esterna - Requisiti per la limitazione della dispersione verso l'alto del *flusso luminoso*". [N2] La suddetta norma è applicabile solo nelle regioni in cui le leggi in materia fanno riferimento esplicito ad essa (Piemonte, Valle d'Aosta, Basilicata) o in quelle dove non ci sono leggi regionali di riferimento (Calabria e Sicilia) che specifichino i limiti di emissione verso l'alto.

Regione	Atti normativi	Limiti dei parametri di riferimento per l'emissione verso l'alto
Abruzzo	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 12 del 03/03/2005 "Misure urgenti per il contenimento dell'inquinamento luminoso e per il risparmio energetico" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Basilicata	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 14 del 10/04/2000 "Inquinamento luminoso e conservazione della trasparenza e stabilità atmosferica dei siti di ubicazione di stazioni astronomiche" 	Flusso luminoso medio verso l'alto a scalare sino al 23% (Riferimento norma UNI 10819/1999)
Campania	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 12 del 25/07/2002 "Norme per il contenimento dell'inquinamento luminoso e del consumo energetico da illuminazione esterna pubblica e privata a tutele dell'ambiente, e la tutela dell'attività degli Osservatori Astronomici Professionali, e non e per la corretta valorizzazione dei centri storici" 	fino a 35 cd/klm a 90° ed oltre
Emilia Romagna	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 19 del 29/09/2003 "Norme in materia di riduzione dell'inquinamento luminoso e di risparmio energetico" - D.G.R. n. 2263 del 29 Dicembre 2005 "Direttiva per l'applicazione della legge regionale 29 settembre 2003 n. 19 recante norme in materia di riduzione dell'inquinamento luminoso e di risparmio energetico" - Circolare Esplicativa L.R. 19/03 - Determinazione del Direttore Generale Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa n. 14096 del 12 ottobre 2006 - D.G.R. del 18 novembre 2013, n. 1688 Nuova direttiva per l'applicazione dell'art. 2 della Legge regionale 29 settembre 2003, n. 19 recante: "Norme in materia di riduzione dell'inquinamento luminoso e di risparmio energetico" 	0 cd/klm a 90° ed oltre

Regione	Atti normativi	Limiti dei parametri di riferimento per l'emissione verso l'alto
Friuli Venezia Giulia	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 15 del 18/06/2007 "Misure urgenti in tema di contenimento dell'inquinamento luminoso, per il risparmio energetico nelle illuminazioni per esterni e per la tutela dell'ambiente e dell'attività svolta dagli osservatori astronomici" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Lazio	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 23 del 13/04/2000 Norme per la riduzione e per la prevenzione dell'inquinamento luminoso - Modificazioni alla L.R. n. 14 del 6/08/1999 - Regolamento attuativo n. 8 del 18/04/2005 della L.R. 23/2000 - Regolamento Regionale n. 22 del 2/11/2009, "Modifiche al Regolamento regionale 18/04/2005, n. 8 (Regolamento regionale per la riduzione e prevenzione dell'inquinamento luminoso)" - D.G.R. n. 447 del 28/06/2008, "Aggiornamento dell'elenco degli osservatori della regione Lazio e delle zone particolari da proteggere contro l'inquinamento luminoso" 	fino a 25 cd/klm a 90° ed oltre
Liguria	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 22 del 29/05/2007 "Norme in materia di energia - Titolo I, III e V" - Regolamento Regionale n. 5 del 15/09/2009 "Regolamento per il contenimento dell'inquinamento luminoso ed il risparmio energetico ai sensi dell'articolo 2, comma 1, lett. b) della legge regionale 29/05/2007, n.22 (Norme in materia di energia)" 	0 cd/klm a 90° ed oltre

Regione	Atti normativi	Limiti dei parametri di riferimento per l'emissione verso l'alto
Lombardia	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 17 del 27/03/2000 "Misure urgenti in tema di risparmio energetico ad uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso" e Allegato A - D.G.R. n. 2611 del 11/12/2000 "Aggiornamento dell'elenco degli osservatori astronomici in Lombardia e determinazione delle relative fasce di rispetto" - D.G.R. n. 7/6162 del 20/09/2001 "Criteri di applicazione della L.R. n. 17 del 27/03/01" - L.R. n. 38 del 21/12/2004 "Modifiche e integrazioni alla L.R. n.17/00" - L.R. n. 19 del 20/12/2005 "Integrazione L.R. 17/00" - L.R. n. 5 del 27/02/2007 "Integrazione L.R. n.17/00" - D.G.R. n. 8950 del 3/08/2007 "Linee guida per la realizzazione dei piani comunali dell'illuminazione" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Marche	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 10 del 24/07/2002 "Misure urgenti in materia di risparmio energetico contenimento dell'inquinamento luminoso" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Molise	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 2 del 22/01/2010 "Misure in materia di contenimento dell'inquinamento luminoso" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Piemonte	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 31 del 24/03/2000 - D.G.R. n. 15 - 2779 del 17/04/2001 - Linee Guida per la limitazione dell'inquinamento luminoso e del consumo energetico - L.R. n. 8 del 23/03/2004 	Flusso luminoso medio verso l'alto a scalare sino al 23% (Riferimento norma UNI 10819/1999)

Regione	Atti normativi	Limiti dei parametri di riferimento per l'emissione verso l'alto
Provincia Autonoma di Bolzano	<ul style="list-style-type: none"> - L.P. n.4 del 21/06/2011 "Misure di contenimento dell'inquinamento luminoso ed altre disposizioni in materia di utilizzo di acque pubbliche, procedimento amministrativo ed urbanistica" - D.G.P. n. 2057 del 30/12/2011 "Approvazione dei criteri per le misure di contenimento dell'inquinamento luminoso e per il risparmio energetico" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Provincia Autonoma di Trento	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 16 del 3/10/2007 "Risparmio energetico e inquinamento luminoso" - D.P.P. 20/01/2010 n°2-34/Leg "Regolamento di attuazione della legge provinciale 3 ottobre 2007, n. 16 "Risparmio energetico e inquinamento luminoso" e del piano provinciale di intervento per la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento luminoso di cui all'art. 4 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Puglia	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 15 del 23/11/2005 "Misure urgenti per il contenimento dell'inquinamento luminoso e per il risparmio energetico" - D.G.R. n. 13 del 22/08/2006 "Regolamento di attuazione della L.R.15/05" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Sardegna	<ul style="list-style-type: none"> - D.G.R. n.48/31-1 del 29/11/2007 Linee guida e modalità tecniche d'attuazione per la riduzione dell'inquinamento luminoso e acustico e il conseguente risparmio energetico - D.G.R. n.48/31-2 del 29/11/2007 Linee guida e modalità tecniche d'attuazione per la riduzione dell'inquinamento luminoso e acustico e relativo risparmio energetico 	0 cd/klm a 90° ed oltre

Regione	Atti normativi	Limiti dei parametri di riferimento per l'emissione verso l'alto
Toscana	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 37 del 21/03/2000 "Norme per la prevenzione dell'inquinamento luminoso" - D.G.R. n. 815 del 27/08/2004 "Linee Guida per la progettazione, l'esecuzione e l'adeguamento degli impianti di illuminazione esterna" - L.R. n.39 del 24/02/2005 "Disposizioni in materia di energia" - Allegato A (art.37) 	Flusso luminoso del 3% verso l'alto
Umbria	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 20 del 28/02/2005 "Norme in materia di prevenzione dall'inquinamento luminoso e risparmio energetico" - D.G.R. n. 2 del 5/04/2007 "Regolamento di attuazione della L.R. n.20 del 28/02/2005 - Norme in materia di prevenzione dall'inquinamento luminoso e risparmio energetico" 	0 cd/klm a 90° ed oltre
Valle d'Aosta	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 17 del 28/04/1998 	Flusso luminoso medio verso l'alto a scalare sino al 23% (Riferimento norma UNI 10819/1999)
Veneto	<ul style="list-style-type: none"> - L.R. n. 17 del 07/08/2009 (che sostituisce la abrogata legge n. 22/97) "Nuove norme per il contenimento dell'inquinamento luminoso, il risparmio energetico nell'illuminazione per esterni e per la tutela dell'ambiente e dell'attività svolta dagli osservatori astronomici" - D.G.R. n. 2301 del 22/06/1998 "L.R. n. 22/97 - Prevenzione dell'inquinamento luminoso. Comuni i cui territori ricadono nelle fasce di rispetto previste" - D.G.R. n. 2410 del 29 dicembre 2011 "Primi indirizzi per la predisposizione del Piano dell'illuminazione per il contenimento dell'inquinamento luminoso (PICIL). Art. 5, comma 1, lettera a), legge regionale 7 agosto 2009, n. 17. 	0 cd/klm a 90° ed oltre

Figura 20 - Normativa Regionale sull'inquinamento luminoso

La normativa regionale più recente è quella dell'Emilia Romagna, con la D.G.R. del 18 novembre 2013, n. 1688 "Nuova direttiva per l'applicazione dell'art. 2 della Legge regionale 29 settembre 2003, n. 19" recante "Norme in materia di riduzione dell'inquinamento luminoso e di risparmio energetico", nata anche dall'esigenza di integrare la normativa preesistente, con riferimenti e parametri tecnici che permettano di disciplinare in modo adeguato anche l'utilizzo di nuove tecnologie emergenti per l'illuminazione esterna come i LED. In particolare, con l'art. 5 della D.G.R. suddetta si richiede, quale requisito per i nuovi impianti di illuminazione esterna pubblica, se si prevede l'utilizzo di tipi di sorgenti diverse dal sodio ad alta pressione, quali sorgenti LED o moduli LED, che la Temperatura di Colore Correlata (CCT) certificata deve essere $CCT \leq 4000K$. L'utilizzo di sorgenti o moduli LED con $CCT > 4000K$ è consentito, sulla base di contenuti di cui all'ALLEGATO C della stessa legge "Rischi connessi all'utilizzo di luce artificiale e *Fattore di effetto circadiano a_{cv}* ", solo se il *Fattore di effetto circadiano a_{cv}* $\leq 0,60$. Lo spettro in forma numerica su cui determinare il fattore a_{cv} ed il valore di CCT devono essere certificati da laboratori accreditati o che operano sotto regime di sorveglianza da parte di un ente terzo indipendente. Il fattore a_{cv} deve essere calcolato e dichiarato dal progettista in una relazione corredata della pertinente documentazione tecnica.

A livello internazionale la CIE, Commission Internationale de l'Eclairage, si è occupata di inquinamento luminoso e di illuminazione urbana nelle seguenti raccomandazioni:

- 1/1980 "Guidelines for Minimizing Urban Sky Glow near Astronomical Observations with the International Astronomical Union";
- 126/1997 "Guidelines for minimizing Sky Glow";
- 136/2000 "Guide to the lighting of urban areas";
- 150/2003 "Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations";
- Standard CIE S 015/E:2005 "Lighting of outdoor work places";
- CIE CEN (European Committee for Standardization) draft prEN12464-2 "Light and lighting. Lighting of work places. Part 2: Outdoor work places".

Il 13 marzo 2003 è stata approvata dal Parlamento italiano la Risoluzione sull'inquinamento luminoso, che impegna il governo a proporre, in sede UNESCO, il cielo notturno non solo come patrimonio dell'umanità (come già dichiarato nel 1992), ma ad agire, in ogni sede internazionale, affinché il cielo notturno venga dichiarato e considerato un bene ambientale da tutelare.

Paesi europei che hanno legiferato sull'argomento sono la Spagna (Isole Canarie, Catalogna), la Repubblica Ceca, la Slovenia, la Croazia e, dal luglio 2013, la Francia.

Il Regolamento francese per ridurre l'inquinamento luminoso si applica a negozi, uffici e facciate degli edifici. In particolare, le luci dei negozi vengono spente tra le ore 01:00-07:00, ovvero un'ora dopo la chiusura e un'ora prima dell'apertura; le luci degli uffici sono spente entro un'ora dal momento in cui gli impiegati lasciano i locali; l'illuminazione delle facciate degli edifici è spenta entro le ore 01,00 e non può essere riaccesa prima del tramonto. Eventuali eccezioni e deroghe sono autorizzate dalle Prefetture. Inoltre, entro i prossimi 2 anni, saranno introdotte norme che limiteranno l'illuminazione dei cartelloni pubblicitari. Il Regolamento francese è finalizzato principalmente alla riduzione di 250.000 tonnellate di anidride carbonica l'anno, cioè ad un risparmio di energia pari a quella consumata ogni anno da 750.000 famiglie, nonché ad un taglio della bolletta energetica complessiva del Paese per 200 milioni di euro. Inoltre, il Ministero dell'Ambiente francese sottolinea che il provvedimento contribuisce a "ridurre l'impronta della luce artificiale sull'ambiente notturno", riconoscendo implicitamente che l'uso eccessivo di illuminazione è fonte di significative perturbazioni sia per gli ecosistemi, sia per la salute umana.

Oltre la Francia, anche la Germania e la Gran Bretagna si apprestano ad emanare provvedimenti simili, mentre in Italia, lo scorso anno, era stato inserito nella Legge di Stabilità la proposta di emanare un Decreto "finalizzato alla razionalizzazione e all'ammodernamento dei sistemi di illuminazione pubblica", ma l'iniziativa è stata bocciata alla Commissione Ambiente della Camera dei Deputati, probabilmente a causa dalle preoccupazioni dei Sindaci che intravedevano nello spegnimento e nell'affievolimento dei lampioni, almeno in alcune ore della notte e in determinate strade, un pericolo per la sicurezza del territorio.

Il 3 luglio 2013, sul "Position Paper" [49] di Lighting Europe, associazione che raggruppa, a livello europeo, oltre una trentina di produttori di impianti di illuminazione esterna e non, si è posto l'accento su quella che sembra essere la soluzione ottimale per illuminare le strade: l'illuminazione adattiva. Oggi, infatti, la tecnologia ci propone delle soluzioni progettuali inimmaginabili fino a qualche anno fa: apparecchi che incorporano specifici sensori in grado di valutare le condizioni ambientali (luminosità naturale, condizioni meteorologiche, etc.) del tratto di strada su cui sono posizionati, al fine di variare autonomamente la quantità di luce da indirizzare verso la sede stradale, soprattutto durante le ore notturne nelle quali solitamente si verifica la minore intensità di traffico. In questo senso, la prospettiva che si presenta sembra assicurare maggior tutela al cielo notturno.

3.2 L'inquinamento luminoso e il suo impatto sull'ambiente

Per capire l'entità dell'inquinamento luminoso, vengono elaborati i dati provenienti direttamente dai satelliti e relativi alla luce inviata verso l'alto dalle città durante la notte, oppure si valuta la luminosità del cielo mediante osservazioni astronomiche con telescopi professionali [15][32]. Attualmente la *brillanza* rappresenta l'indicatore ambientale più affidabile e preciso per

descrivere quantitativamente l'inquinamento luminoso, gli effetti sugli ecosistemi e il degrado della visibilità stellare.

Alla luminosità naturale del cielo, dovuta a varie componenti (aurora, luce galattica diffusa, luce integrata delle stelle, etc.), si devono sommare i contributi dovuti alla luce proveniente direttamente dalla sorgente artificiale e quelli della luce che ha subito diffusione (diffusioni multiple, *scattering*). La luce proveniente da una sorgente luminosa si propaga nell'ambiente e nell'atmosfera in maniera complessa e disomogenea, in dipendenza delle caratteristiche dell'ambiente circostante (presenza di alberi, topografia, coefficiente di riflessione della pavimentazione, etc.), della concentrazione e composizione di aerosol intorno all'impianto, della presenza di un cielo nuvoloso o meno.

L'aumento di luminosità del cielo notturno provoca effetti negativi sulla qualità dell'ambiente, sulla vita dell'uomo e sulla ricerca astronomica. Studi recenti hanno chiarito che le alterazioni indotte da un eccesso di luminosità dell'ambiente nelle ore notturne portano a diversi effetti negativi, ad esempio sulla flora (come la riduzione della fotosintesi clorofilliana, squilibri ai processi fotosintetici delle piante e al fotoperiodismo), sulla fauna (disorientamento delle specie migratorie, alterazioni delle abitudini di vita e di caccia degli animali, disturbi alla riproduzione e alterazioni dei ritmi circadiani), sull'uomo (abbagliamento, alterazioni della vista, alterazioni dei ritmi circadiani e possibili alterazioni della produzione di melatonina). Quindi, l'aumento della *brillanza* del cielo notturno ha effetti negativi quali l'alterazione del ciclo naturale "giorno-notte" (*ritmo circadiano*) con conseguenze su specie animali e vegetali. Sull'uomo le conseguenze sono di tipo fisiologico e psichico: troppa luce o la sua diffusione in ore notturne destinate al riposo può provocare vari disturbi (es. minore produzione di melatonina, ormone per la difesa immunitaria) in persone che lavorano la notte con forte illuminazione artificiale. [1]

Da alcuni decenni, gli osservatori astronomici di tutto il mondo hanno iniziato ad osservare solo le stelle di magnitudine più elevata a causa degli impianti di illuminazione delle città che diffondevano, anche al di fuori del tessuto urbano, una parte considerevole di *flusso luminoso* verso il cielo, rendendo di fatto meno osservabili i corpi celesti che fino a pochi anni prima si riuscivano ancora a scorgere. I primi segnali di questo problema sono nati nei maggiori osservatori astronomici degli U.S.A., quando anche quelli situati in cima a montagne o nei deserti risentivano dell'inquinamento luminoso prodotto dalle città poste anche a centinaia di chilometri di distanza. Il caso del famoso osservatorio astronomico di Monte Palomar è esemplificativo: la sua attività risente della presenza della città di Los Angeles, situata a più di duecento chilometri di distanza. Anche in Europa, per questo motivo, i più grandi telescopi sono posizionati negli osservatori delle isole Canarie o dei siti più isolati [14] [27].

Nel 2001 è stato pubblicato il primo atlante della *brillanza* del cielo notturno. [6] Le figure 13 e 14 di seguito, tratte dalla versione del 2007 dell'annuario

dei dati ambientali APAT (ora ISPRA), sono frutto di elaborazioni di questo lavoro.

La figura 21 rappresenta le Regioni italiane nelle quali le stelle deboli, ossia poco luminose, sono ancora visibili. Le Regioni evidenziate in blu (Sardegna, Valle D'Aosta, le provincie autonome del Trentino Alto Adige, Molise, Basilicata, Calabria) sono quelle in cui le stelle deboli sono ancora visibili da più del 60% del territorio regionale. Parte di queste regioni non sono ancora dotate di una legge a tutela del cielo stellato.

La figura 22 descrive, invece, il numero di stelle visibili in una notte limpida, numero che permette di valutare meglio il grado dell'inquinamento luminoso nel territorio italiano. Sono evidenziate in rosa le zone dove un osservatore di circa 40 anni e di media esperienza e capacità, osservando con entrambi gli occhi, adattati al buio, osservi la volta celeste riuscendo ad individuare non più di 200 stelle con certezza (probabilità di individuazione del 98%). Si nota che tali zone, che sono quelle più interessate dall'inquinamento luminoso, coincidono con le parti del territorio dove sono presenti i più grandi insediamenti abitativi e industriali. In nero sono evidenziate le rare zone di cielo completamente buio: alpine, montuose e appenniniche, da cui è possibile contare oltre 1300 stelle.



Figura 21 – fonte Annuario dei dati ambientali - ISPRA

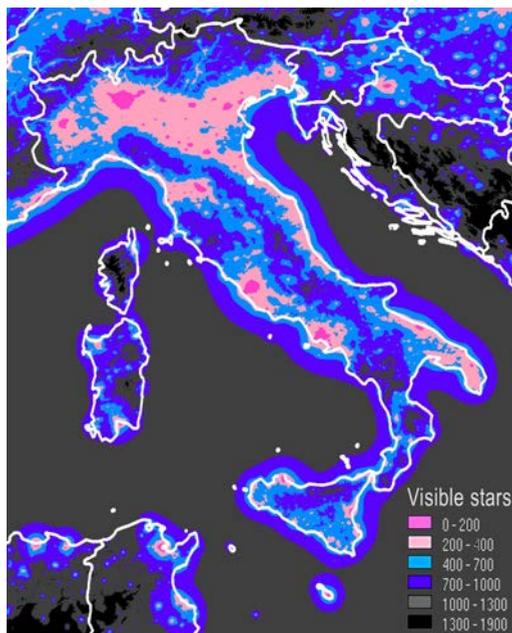


Figura 22– fonte Annuario dei dati ambientali - ISPRA

3.3. L'inquinamento luminoso e l'illuminazione stradale: lo specifico caso dei LED.

Diversi studi evidenziano che l'inquinamento luminoso è generalmente prodotto dall'illuminazione stradale, dalle insegne dei negozi, dall'illuminazione di monumenti o edifici e, soprattutto, da quegli impianti che non sono dotati di sistemi di riduzione dei flussi luminosi dispersi verso l'alto (corpi illuminanti disperdenti, come i globi o i lampioni sferici).

In particolare, per quanto riguarda l'illuminazione stradale, illuminare nella misura strettamente necessaria per l'utente della strada, senza venir meno ai requisiti connessi alle esigenze di sicurezza e senza sperperi energetici, non è un'impresa impossibile. Infatti, proprio per rispondere correttamente a queste necessità, ci si può riferire alle normative europee ed italiane che regolamentano l'illuminazione stradale: in primo luogo, la norma italiana UNI 11248 [N4] e le norme europee UNI EN 1320-2-3-4 [N7][N8][N9][N10]. Il quadro normativo impone valori di *luminanza* che garantiscono un buon discernimento degli ostacoli e, contemporaneamente, un'uniformità d'illuminazione della sede stradale e dei dintorni. La *luminanza*, si rammenta, è una grandezza che esprime la densità con cui un'intensità luminosa viene emessa da una certa sorgente, rappresentando corrispondentemente la sensazione visiva prodotta sull'occhio umano; da ciò discende che una sorgente che emette una certa intensità da una superficie molto piccola

(come un *diodo* LED) produce sull'occhio una sensazione molto più forte di una sorgente distribuita su una superficie molto più ampia (come una lampada tradizionale): questo fattore già rende conto di uno dei problemi principali degli apparecchi illuminanti a LED e, cioè, il pericolo relativo al possibile abbagliamento. Questa grandezza, inoltre, si distingue dall'*illuminamento* perché non definisce la componente "reale" di luce che arriva a terra ma, piuttosto, una componente "soggettiva" che appare all'osservatore in funzione dell'angolo dal quale sta osservando l'oggetto e della capacità della superficie illuminata (in questo caso l'asfalto stradale) di riflettere la luce. I LED, per loro natura, quindi, sono sorgenti luminose molto direzionali e presentano un fascio di luce molto forte e concentrato. Questa luce viene distribuita attraverso l'utilizzo di ottiche secondarie per garantire la giusta uniformità sulla sede stradale e ridurre l'abbagliamento che, altrimenti, potrebbe provocare; in questo modo, però, si riduce notevolmente la loro efficienza luminosa. Per le applicazioni stradali l'adozione della *luminanza* come parametro di riferimento significa definire la luminosità del manto stradale, come questa viene percepita dagli automobilisti e come questa può aiutare l'automobilista a distinguere gli ostacoli e a guidare facilmente. Si può ottenere una buona visibilità degli ostacoli aumentando il contrasto di *luminanza* fra il manto stradale e gli ostacoli stessi, cercando di massimizzare la *luminanza* del manto stradale nella direzione di vista di un osservatore, senza però creare degli effetti di riflessione del *flusso luminoso* verso l'alto (che si ottiene, ad esempio, impiegando innovativi sistemi di chiusura delle lampade a vetro piano) e per non abbagliare lo stesso conducente dell'auto. Un buon compromesso tra le due esigenze si ottiene facilmente grazie all'utilizzo, nella fase progettuale, dei software previsionali che permettono di valutare, tra diversi tipi di armature stradali, quelle che soddisfano al meglio i requisiti strettamente richiesti, senza "sovra-illuminare" la strada. In sintesi, se il progetto illuminotecnico di una strada viene eseguito con scrupolo e rispettando le normative di riferimento, l'utilizzo degli apparecchi di illuminazione a LED nell'illuminazione stradale, avendo un'elevata direzionalità (direttività) del *flusso luminoso*, risultano meno d'impatto sull'inquinamento luminoso rispetto alle sorgenti tradizionali.

Ma non c'è solo da considerare l'aspetto legato all'intensità del *flusso luminoso* e alla sua densità, bensì anche lo spettro della luce generata dal tipo di illuminazione stradale. Si constata, infatti, soprattutto dai grandi osservatori astronomici, che l'illuminazione notturna produce un aumento di luminosità nella porzione di spettro avente lunghezza d'onda di circa 400 nm (porzione blu dello spettro); soprattutto in prossimità delle città, la luminosità artificiale sovrasta anche di 20 volte la luminosità naturale del cielo notturno. Inoltre, le sorgenti luminose a prevalente componente blu-bianca fredda (aventi temperature di colore maggiori di 3500K), come alcune sorgenti LED, se non appropriatamente schermate dalle ottiche secondarie, producono una luce che inquina maggiormente dal punto di vista astronomico andando ad illuminare una porzione dello spettro che è naturalmente più scura. [29]

La luce prodotta dalle lampade delle armature stradali, anche se diretta unicamente verso la zona da illuminare, lungo il suo percorso (che può

essere più o meno lungo a seconda dell'altezza del palo su cui è installata) incontra molecole e particelle atmosferiche che la riflettono verso l'emisfero superiore producendo un alone luminoso al di sopra della sorgente stessa, che si può propagare anche a grandi distanze. Inoltre, la luce che raggiunge la troposfera viene riflessa nuovamente verso il terreno, rimanendo intrappolata nello strato sottostante dell'atmosfera. [16]

Le particelle dell'atmosfera incontrate dai fotoni si comportano, infatti, come sorgenti secondarie di luce, producendo il fenomeno dello *scattering* luminoso nell'atmosfera [3]. Oltre a ciò, si aggiunge il contributo di riflessione da parte del terreno sul quale va ad incidere il fascio luminoso ed il contributo dovuto al contenuto di umidità dell'aria che, aumentando, tende a far aumentare lo *scattering*.

In particolare, lo scattering atmosferico si distingue in due tipologie:

- lo *scattering* di Rayleigh per le particelle di dimensioni molto più piccole di quelle della lunghezza dell'onda incidente;
- lo *scattering* di Mie per le particelle più grandi (vapori di acqua, particelle di sabbia e di sali).

Entrambe le tipologie contribuiscono in maniera importante a diffondere la luce tanto verso l'emisfero superiore delle lampade, facendola disperdere nel cielo, tanto nell'emisfero inferiore, facendola ricadere verso il suolo. Vale la pena di evidenziare, inoltre, che l'atmosfera riflette molto più facilmente emissioni luminose dalle minori lunghezze d'onda, più precisamente, proporzionalmente alla quarta potenza dell'inverso della lunghezza d'onda. Da ciò consegue che le sorgenti luminose con forti componenti bluastre o con temperatura di colore superiore ai 3000K-3500K, come i primi LED apparsi sul mercato (con temperature di colore di 6000K, quasi non più commercializzate, e/o con ottiche secondarie di vecchia generazione), tendono ad avere un impatto ambientale ancora più forte rispetto ad altre sorgenti di pari intensità [4].

È possibile, però, tutelare il cielo da emissioni luminose in eccesso semplicemente adottando delle regole basilari nella fase di progettazione di impianti di illuminazione stradale o regolamentando correttamente l'installazione dei punti luce sul territorio. In Italia, grazie alle attività di sensibilizzazione delle organizzazioni che si impegnano in questo campo da ormai molti anni, come già detto, sono state approvate leggi regionali contro l'inquinamento che coprono più di due terzi della popolazione italiana e le principali città (Milano, Roma, Venezia, Firenze, Bologna, Napoli).

Punti fermi di quasi tutte queste normative sono riconducibili all'adempimento dei seguenti aspetti principali:

- la minimizzazione delle emissioni luminose degli impianti verso l'alto (Ulor), massimizzando nel contempo le emissioni verso il basso (Dlor);
- la *luminanza* o l'*illuminamento* non devono superare il valore minimo richiesto dalle normative tecniche applicabili e devono garantirlo a

lungo termine, evitando ogni possibile sovra-illuminazione, nonché l'illuminazione di superfici non richieste;

- la distribuzione spettrale delle lampade dovrebbe essere tale da produrre, a parità di *flusso luminoso*, il minore impatto dal punto di vista ambientale, limitando le emissioni con lunghezza d'onda inferiore a 500 nm;
- utilizzare tutte le nuove tecnologie disponibili necessarie ai fini del risparmio energetico (controlli dinamici, dimmers, etc.) che, oltre a garantire la sicurezza delle infrastrutture, assicurino anche il minor inquinamento luminoso possibile.

CAPITOLO 4- L'illuminazione e l'impatto sulla flora e sulla fauna: approfondimenti sull'illuminazione a LED

a cura di Cristina Farchi

4.1 L'impatto dell'illuminazione sulla fauna

La luce per la maggior parte dei sistemi biologici è un fattore vitale, così come l'alternarsi tra il dì e la notte che ha accompagnato l'evoluzione di animali e vegetali per centinaia di milioni d'anni.

Nel momento in cui si altera quest'equilibrio con l'irraggiamento di luce artificiale sugli ecosistemi, in cui vivono e si riproducono gli animali, vi è il rischio di creare danni irreversibili. Oggi è ben noto che l'inquinamento luminoso può recare danni al mondo animale non solo a livello di individuo, ma anche a livello di popolazione, comunità e di ecosistema, mediante abbagliamento diretto, illuminazione cronica e fluttuazioni transitorie di illuminazione [20]. Tra gli effetti maggiormente noti dell'inquinamento luminoso si annoverano il disorientamento, l'aumento di mortalità e l'interferenza con i cicli vitali di molte specie fotosensibili. In letteratura si riportano modifiche comportamentali dovute all'illuminazione artificiale che riguardano un ampio range di *taxa*, quali uccelli ([17],[19],[31]) anfibi e rettili ([30];[39]), piccoli mammiferi [5] e insetti ([8], [38]).

Per quanto concerne l'avifauna in particolare, esiste una particolare sensibilità nei confronti della luce. In questa classe di vertebrati, la ghiandola pineale (piccola ghiandola a secrezione endocrina) situata nel cervello e particolarmente sviluppata, riesce a percepire la presenza di luce che penetra attraverso le pareti del cranio e secerne melatonina in risposta alla comparsa e scomparsa della luce del giorno. Questo ritmo circadiano è il regolatore delle ghiandole endocrine e degli organi del corpo che determinano l'aumento del tasso di glucosio nel sangue, il volume di urina, la variare della pressione arteriosa, quello della temperatura corporea, la variabilità dei valori proteinici, degli elettroliti e del valore di ionizzazione dei fluidi corporei.

Un recente studio mette in evidenza come l'inquinamento luminoso sia capace non solo di modificare bioritmi e abitudini, ma anche di alterare i comportamenti riproduttivi dei volatili. Alcuni ricercatori, analizzando gli effetti dell'illuminazione artificiale su alcune specie di uccelli, hanno potuto verificare come tutti i maschi posizionati a distanze sufficientemente limitate da una intensa fonte luminosa tendevano a cantare molto prima di quelli che si trovavano più lontani dalla stessa. Conseguentemente le femmine, stimolate da questi canti, arrivavano in numero maggiore rispetto a quanto normalmente accade nelle parti più buie di foresta e, spesso, indipendentemente dalla qualità riproduttiva dei maschi interessati; tutto ciò a

scapito del principio di selezione naturale e a vantaggio dei soggetti più deboli. [17]

Uno studio sulle piattaforme offshore nel Mare del Nord ha evidenziato come la luce a diverse lunghezze d'onda possa influenzare l'orientamento degli uccelli migratori notturni e, quindi, anche la loro sopravvivenza. È noto che molti uccelli, tra cui i Germani reali e alcuni Passeriformi (come Capinere, Beccafichi, Bigiarelle, Sterpazzole), usano l'orientamento astronomico, luna e stelle fisse, come riferimento per mantenere la rotta durante i voli nelle loro migrazioni notturne e, pertanto, possono essere disturbati dalla presenza di fonti luminose artificiali. Quando gli astri sono superati in intensità da fonti luminose artificiali il volo di migrazione può essere radicalmente deviato. Basandosi sul presupposto che la luce artificiale delle piattaforme interferisca con la navigazione dei volatili, gli autori hanno verificato come gli uccelli siano disorientati e attratti dalla luce rossa e bianca (radiazioni di lunghezza d'onda lunga), piuttosto che da quella verde e blu (contenente un numero inferiore o nessuna radiazione di lunghezza d'onda lunga) per la quale non si sono evidenziate particolari conseguenze. Lo studio suggerisce la possibilità di sviluppare un tipo di luce "bird-friendly" che possa da una parte soddisfare le esigenze dei nostri mercati e dall'altra rispettare l'ecosistema in generale, senza recare danni alla fauna potenzialmente fotosensibile.[31]

Per quanto attiene l'illuminazione a LED, nonostante il suo utilizzo si stia rapidamente diffondendo, a oggi risultano ancora scarsi gli studi volti a valutare gli eventuali impatti ecologici di tale tecnologia. Mentre si conoscono gli effetti biologici dannosi dovuti alla luce blu che possono verificarsi sull'uomo, rimangono per lo più ignoti gli effetti sulla fauna. Certo è che le lunghezze d'onda basse si propagano più lontano in atmosfera e, quindi, questo tipo di luce ha il massimo potere di attrazione per uccelli, insetti ed altri animali fotosensibili.

Uno studio condotto dall'Università di Haifa su alcuni ratti esposti alla luce blu dei LED nelle ore notturne ha dimostrato come tale illuminazione possa provocare negli animali esposti danni al sistema metabolico, a quello ormonale, alla massa corporea, nonché una riduzione significativa nella produzione di melatonina, possibile causa di tumori.

Ciononostante, diverse agenzie governative per la protezione della fauna selvatica raccomandano l'utilizzo dell'illuminazione a LED, evidenziandone alcune caratteristiche che la renderebbero meno nociva di quella tradizionale nei confronti di varie specie animali.

Alle Hawaii, il Kauai Seabird Habitat Conservation Program ha sviluppato, negli ultimi anni, un piano che prevede la sostituzione del sistema tradizionale di illuminazione stradale con un'illuminazione a LED, ritenuta maggiormente ecocompatibile. In particolare, allo scopo di limitare la quantità di luce che potrebbe nuocere agli uccelli marini autoctoni, si evidenzia la possibilità di montare luci a LED con variatori di potenza e sensori di movimento, nonché l'opportunità di sfruttare coni di luce direzionata evitando così il diffondersi di luce in direzioni inutili. Il piano prevede lo spegnimento delle luci quando non ci

sono persone nell'area interessata e la loro accensione una volta che i sensori rilevano movimento umano.

Uno studio condotto nel 2009 dalla Federal Aviation Administration [28], volto ad identificare possibili soluzioni per ridurre la mortalità di uccelli migratori notturni negli aeroporti americani, dovuta a disorientamento e collisione con le torri di comunicazione, ha messo in evidenza indiscussi benefici nell'utilizzo dei LED per l'illuminazione delle torri di comunicazione. Lo studio ha ampiamente dimostrato che l'illuminazione a LED non solo sarebbe maggiormente visibile ai piloti rispetto a quella tradizionale, garantendo così una maggiore sicurezza del traffico aereo, ma sembrerebbe anche meno nociva per gli uccelli migratori che non hanno mostrato segni di disorientamento correlati, registrando un evidente calo della mortalità dei volatili.

È ormai noto da diversi anni come l'illuminazione notturna in aree prossime a spiagge, dove sono solite nidificare le tartarughe marine, possa compromettere la sopravvivenza dei nuovi nati in quanto disorientati e incapaci di trovare la via verso il mare. La Florida Fish and Wildlife Conservation Commission (FWC) e la Sea Turtle Conservancy sono dunque intervenute a protezione delle specie e hanno cominciato a sperimentare nelle aree più sensibili diversi tipi di illuminazione, tra cui quella a LED, ottenendo risultati alquanto promettenti. In particolare, si riporta che nelle aree in cui sono state montate luci a LED rosse e ambrate vi è stata una riduzione del 100% dei casi riportati di piccoli di tartaruga che si sono persi senza più raggiungere il mare. Oggi sono disponibili le Sea Turtle Lighting Guidelines che riportano tra le luci approvate dalla FWC anche quelle a LED.

Tuttavia, nel 2011, uno studio ha evidenziato come l'illuminazione a LED sia in grado di sopprimere la produzione di melatonina a un tasso ben cinque volte superiore rispetto alle lampade al sodio ad alta pressione (HPS). Nonostante sia considerato più eco friendly rispetto alle lampade tradizionali, alcuni ricercatori affermano che l'utilizzo sempre più diffuso del LED porterà inevitabilmente ad un aumento significativo della soppressione di melatonina nell'uomo e negli animali.[9]

Uno studio che tratta specificatamente l'impatto dei LED sui chiroteri [37] evidenzia come tale illuminazione possa ridurre le attività di alcune specie di pipistrelli (*Rhinolophus hipposideros* e *Myotis* spp.), in particolare gli usuali spostamenti aerei e le attività di foraggiamento (ricerca e cattura delle prede). Lo studio mette in luce le potenziali conseguenze a lungo termine che potrebbero verificarsi sullo stato di conservazione, dinamica di popolazione e, in ultima analisi, sulla biodiversità, dal momento che le specie di chiroteri maggiormente sensibili alla luce potrebbero essere scalzate da specie competitive più tolleranti o subire una diminuzione della fitness e del tasso di riproduzione.

Un altro lavoro interessante riporta gli effetti dell'illuminazione a LED negli impianti di acquacoltura del salmone atlantico *Salmo salar* [23]. Al fine di verificare la possibilità di implementare tale tecnologia nell'industria del

salmone atlantico, gli obiettivi dello studio sono stati quelli di determinare gli effetti di intensità crescenti di luce blu a LED sulla percezione luminosa del pesce (produzione di melatonina) e sull'eventuale risposta da stress acuto e cronico (produzione di cortisolo e glucosio nel sangue) ed esaminare potenziali danni alla retina del salmone. I risultati hanno mostrato la capacità del salmone di percepire la luce blu a prescindere dalla sua intensità (i livelli di melatonina basali risultano gli stessi) e un incremento nella concentrazione di cortisolo e glucosio nel sangue dei pesci esposti ad una elevata intensità di luce blu entro tre ore dall'esposizione. In particolare, questa ultima risposta da stress acuto non è stata registrata nei pesci esposti alla luce bianca, a indicazione di una diversa sensibilità dei pesci a lunghezze d'onda diverse. Infine, i pesci esposti all'illuminazione a LED non hanno evidenziato alcun tipo di danno alla retina.

Sebbene l'illuminazione artificiale abbia per certi aspetti sicuramente migliorato la nostra qualità di vita, urge la necessità di effettuare ulteriori studi volti a valutare la reale portata dell'influenza di questo impatto antropico sul mondo animale. In particolare, la moderna illuminazione a LED, che per certi versi sembrerebbe più "ecologica" di quella tradizionale, potrebbe, fra le altre cose, introdurre un cambiamento nel colore dell'illuminazione urbana. Infatti, come già detto nel capitolo precedente, il maggior contenuto "in blu" dell'illuminazione a LED è più soggetto a scattering in atmosfera, specialmente in caso di copertura nuvolosa, e quindi sarebbe responsabile dell'aumento dell'inquinamento luminoso (cfr. cap. 3). Questo tipo di illuminazione dovrà essere attentamente studiata per migliorarne l'efficacia e per colmare le molte lacune oggi esistenti circa il suo impatto sui sistemi biologici.

4.2 L'illuminazione e l'impatto sulla flora: approfondimenti sull'illuminazione a LED

Nell'affrontare il tema dell'impatto dell'illuminazione sul mondo vegetale, si deve partire dall'ovvio presupposto che per una normale crescita e un adeguato sviluppo, le piante dipendono fortemente dalla luce. Pertanto, esse hanno sviluppato, nel corso dell'evoluzione, un numero consistente di fotorecettori in grado di percepire e rispondere ai segnali luminosi nelle diverse regioni dello spettro elettromagnetico. Questi fotorecettori permettono alla pianta di misurare e reagire in maniera più o meno sensibile a quattro parametri fondamentali dell'ambiente luminoso in cui vivono: qualità della luce (lunghezza d'onda e colore), intensità (luminosità), direzione e durata della luce nell'arco delle 24 ore (fotoperiodo). Fra i vari processi influenzati dall'illuminazione, si annoverano: la germinazione dei semi, l'allungamento dello stelo, la crescita delle foglie, la conversione dallo stato vegetativo alla fase di fioritura, lo sviluppo del fiore, lo sviluppo del frutto, la cessazione della produzione fogliare, l'invecchiamento e l'escissione fogliare.

È facile dunque capire come l'inquinamento luminoso possa recare disturbo al mondo vegetale e comprometterne l'accrescimento. A titolo di esempio, le piante che fioriscono in autunno, quando le giornate sono più brevi (le

cosiddette short-day plants), hanno bisogno di lunghe notti e brevi periodi di illuminazione per portare a termine la fase di fioritura. Ne consegue che l'illuminazione artificiale notturna può seriamente compromettere il loro sviluppo e metabolismo. [34]

Nella Raccomandazione CIE 150/2003 "Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations", si evidenziano i possibili effetti della luce artificiale sulla fotosintesi, sulla crescita e sui cicli stagionali, sulla germogliazione e sull'impollinazione da parte di insetti.

Lungo un viale alberato cittadino illuminato artificialmente è facile notare come le chiome degli alberi ubicati in prossimità dei lampioni stradali si protendano verso le fonti luminose. In aggiunta al fototropismo positivo, che è sicuramente l'effetto più evidente dell'illuminazione artificiale stradale, esistono altre alterazioni della fisiologia delle piante cittadine. Le lampade che emettono lunghezze d'onda dai 350 agli 800 nm possono influenzare in modo significativo l'attività biologica delle piante, prolungando la fase luminosa della fotosintesi durante la notte e generando così una marcata situazione di stress nella pianta. Inoltre, la radiazione termica emessa dalle lampade produce nelle sue immediate vicinanze un microclima che riscalda le foglie provocando ritardi nella fase di riposo o anticipi del periodo vegetativo e di fioritura. Questo riscaldamento può anche essere in grado di creare l'habitat favorevole ai parassiti dei vegetali che, nel tempo, possono nuocere alla vita stessa della pianta.

In molti alberi, la caduta ritardata delle foglie dovuta all'inquinamento luminoso può avere conseguenze anche per le moltissime specie animali che negli alberi trovano il loro habitat ideale. Alcuni uccelli, per esempio, possono evitare alberi prossimi a fonti luminose e decidere di nidificare altrove [7].

Per quanto concerne l'utilizzo dei LED nell'illuminazione stradale (e.g. LED bianchi), ulteriori studi dovranno approfondire gli effetti dello spettro da luce blu sulla crescita e sviluppo delle piante per garantirne l'eco-compatibilità. A oggi sappiamo che la luce blu determina effetti significativi sulla morfogenesi delle piante. Il fototropismo, la chiusura stomatica e lo sviluppo fiorale, sono tutti processi che dipendono fortemente dalla luce blu e che potrebbero essere compromessi da una eccessiva illuminazione artificiale, in particolare quella notturna.

Anche il processo di fotosintesi è indotto da lunghezze d'onda specifiche. In particolare, lo spettro d'azione della fotosintesi (photosynthesis action spectrum-PAS) mostra due picchi: uno nella regione del blu (circa 450 nm) e l'altro nella parte rossa dello spettro (circa 660 nm). Ciò significa che una luce artificiale che emette tali lunghezze d'onda è in grado di interferire con la normale fotosintesi, specialmente nelle ore in cui viene a mancare la luce solare. Ne consegue che i LED, emettendo luce blu che corrisponde quasi perfettamente al picco di sensibilità per il blu del PAS, possono determinare uno sviluppo anomalo nelle piante.

Tuttavia, la tecnologia a LED non è da ritenersi la più critica dal punto di vista ambientale, per quanto concerne ad esempio la fotosintesi. In un lavoro recentissimo [1], in cui sono stati sviluppati indici specifici per stimare il potenziale impatto dello spettro di diversi tipi di luce artificiale sulla soppressione di melatonina, sulla fotosintesi e sulla visibilità delle stelle, è scaturito che i LED, almeno per quanto concerne la fotosintesi, possono arrecare danni minori rispetto alle lampade al sodio ad alta pressione.

È doveroso, infine, ricordare alcune caratteristiche intrinseche della tecnologia LED che la rendono maggiormente ecocompatibile rispetto ad altri tipi di illuminazione. I LED, infatti, possono contribuire all'abbassamento dell'inquinamento luminoso sfruttando fasci di luce con un ridotto raggio d'azione, tale da non permettere il diffondersi di luce verso il cielo. Un'altra loro caratteristica di pregio è la mancanza di sostanze tossiche e nocive (mercurio, piombo, etc.) alla salute dell'uomo, degli animali e alla conservazione dell'ambiente naturale, la cui presenza invece nelle lampade tradizionali (fluorescenti, al sodio, al mercurio) è indispensabile al corretto funzionamento. Infine, la tecnologia LED vanta la possibilità di regolare il flusso luminoso anche in determinate direzioni e non solo in intensità.

Utilizzo dei LED in agricoltura.

Se l'impatto della luce artificiale sulla vegetazione può essere significativo in ambiente naturale, diverso è il discorso per l'orticoltura [22]. I LED in particolare possono rappresentare una valida fonte luminosa per la crescita delle piante ed il loro impiego nelle serre, come fonte integrativo-sostitutiva dell'illuminazione artificiale tradizionale, è in fase di valutazione presso diversi centri di ricerca. Questo sistema di illuminazione, per le sue caratteristiche intrinseche (piccole dimensioni, lunga durata, basse temperature di emissione e possibilità di selezionare lunghezze d'onda specifiche a seconda della pianta target), risulta assai vantaggioso rispetto ad altri sistemi più tradizionali. L'emissione in bande cromatiche definite le rende ad esempio particolarmente indicate per l'illuminazione interchioma di colture orticole in verticale in serra.

Una società di ricerca olandese ha messo a punto un metodo di coltura che, sfruttando l'elevata efficienza energetica dei LED rispetto alle tradizionali lampade a incandescenza, è riuscita a garantire un taglio del 95% del bisogno di acqua per l'irrigazione. La stessa società, associata all'Università di Den Bosch, è riuscita a far crescere piante decorative utilizzando solo LED a luce rossa e blu. I LED infatti, producendo luce in bande ben specifiche dello spettro, possono essere costruiti in maniera tale da emettere un voluto output di lunghezze d'onda quale quello più favorevole alla crescita delle piante. L'impiego del "near far red" (690 nm), ad esempio, favorisce l'incremento dell'area fogliare su foglie in crescita, qualora tale luce venga utilizzata sulla coltura negli stadi precoci del ciclo produttivo [13]. È nota l'importanza della luce rossa nello stimolare la fioritura delle piante e quella della luce blu per il fototropismo e l'apertura degli stomi. Si capisce, dunque, come i LED possano essere utilizzati per esaltare le caratteristiche desiderate delle piante orticolo-ornamentali.

È stato inoltre dimostrato come certe lunghezze d'onda possano essere utilizzate per ridurre o eliminare la proliferazione di funghi o di altri patogeni e parassiti delle piante [22]. L'utilizzo della luce, piuttosto che di prodotti chimici come pesticidi, rappresenta sicuramente una tecnologia alquanto promettente, sebbene i risultati di alcuni studi sembrano dimostrare come alcuni effetti siano esclusivamente specie/coltivazione specifici. Sebbene oggi la ricerca abbia ampiamente dimostrato la possibile applicazione della tecnologia a LED anche in agricoltura, ulteriori studi sono ancora necessari per comprendere, fra le altre cose, l'economicità del metodo. In ogni caso si è ormai consolidata la consapevolezza dell'enorme potenzialità e dei possibili usi futuri di questa tecnologia.

CAPITOLO 5- Rapporto di misura delle sorgenti LED – Indagine svolta sull’armatura stradale iGuzzini “Archilede”

a cura di Valeria Canè, Giuseppe Marsico

5.1. Introduzione

Le misure svolte dal gruppo di lavoro sono state finalizzate a dimostrare che le sorgenti LED per l’illuminazione stradale, in relazione ai requisiti previsti dalle norme tecniche UNI sulla progettazione illuminotecnica, possono essere considerate con gli strumenti e procedure di uso comune per le sorgenti di tipo tradizionale. L’indagine ha messo in evidenza i limiti e la validità di queste procedure nella loro applicazione alle sorgenti LED, grazie all’utilizzo di strumentazione di misura e modelli di calcolo automatico che sono attualmente di largo impiego nel settore dell’illuminazione stradale.

5.2. Sorgente luminosa sotto indagine

La sorgente LED sotto indagine è un’armatura stradale modello “Archilede” (Figura 23) prodotta da iGuzzini illuminazione S.p.A., le cui principali caratteristiche tecniche di interesse, ai fini delle applicazioni di natura illuminotecnica, sono di seguito riportate:

- Modello: Archilede BGO9 LH89 – 98 x 1W cool white 6000K – street optic
- Flusso luminoso: 7.742 lm
- Potenza lampada: 117 W



Figura 23 - Armatura stradale iGuzzini Archilede utilizzata per le misure.

Oltre alle già citate caratteristiche tecniche, la figura 24 mostra le curve fotometriche fornite dal costruttore, utilizzate come dato di input delle emissioni delle sorgenti luminose ai fini delle simulazioni numeriche.

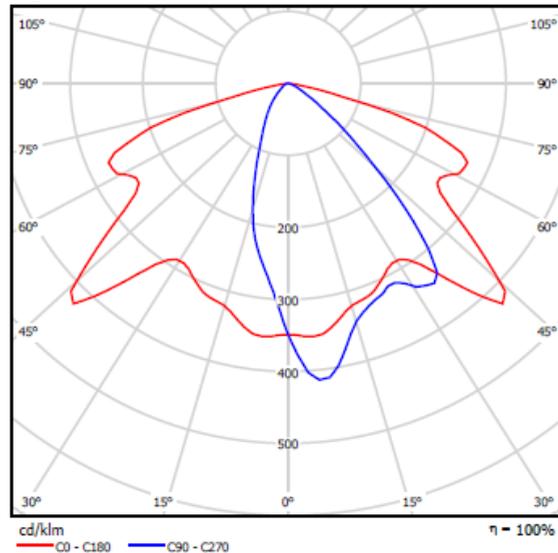


Figura 24: Curve fotometriche della sorgente sotto indagine (fornite dal produttore).

5.3 Misure in esterno

Le misure in esterno sono state eseguite al fine di caratterizzare l'emissione della sorgente LED, mediante l'applicazione delle procedure di misura comunemente utilizzate ai fini della verifica dei requisiti di progetto, previste dalle norme UNI 11248 [N4], UNI EN 13201-3 [N9] e UNI EN 13201-4 [N10]. Parallelamente alle misure strumentali, sono state condotte anche delle simulazioni numeriche tramite il software di simulazione Dialux al fine di verificare l'applicabilità delle metodologie previsionali previste dalle norme UNI citate al caso delle sorgenti LED.

Nell'ambito delle misure e dei relativi calcoli previsionali, sono stati valutati esclusivamente i valori di illuminamento orizzontale, in quanto la misura della luminanza secondo le citate norme tecniche risultava di non agevole realizzazione. E' da precisare che tale scelta, prevista esplicitamente dalla norma UNI EN 13201-4 [N10], consente anche di trascurare le differenze di luminanza originate dalla variazione del coefficiente di riflessione della superficie stradale, la cui valutazione risulta alquanto non agevole.

La sorgente luminosa è stata collocata ad un'altezza pari a 5,6 m sulla superficie stradale. L'area di valutazione dell'illuminamento presenta una forma rettangolare di dimensione 9 m x 6 m; su di essa, in accordo alle citate norme tecniche, sono stati individuati n. 12 punti di misura, posizionati

alla quota della superficie stradale al centro di un'area di forma quadrata di 3 m di lato, secondo lo schema in pianta riportato in figura 25.

1*	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12

*la lampada è stata installata in corrispondenza del punto 1 ad una quota di 5,6 m dal suolo

Figura 25 - Schema in pianta della collocazione dei punti di misura.

Per le misure strumentali è stato utilizzato un luxmetro comunemente impiegato ai fini delle verifiche dei livelli di illuminamento nei luoghi di lavoro. Tale strumento consente solamente la misura del livello istantaneo di illuminamento orizzontale sulle superfici illuminate. Pertanto, la precisione delle misure effettuate risulta dell'ordine di 1 lux.

In figura 26 sono riportati i risultati ottenuti in termini di illuminamento orizzontale, relativamente alle misure strumentali e ai calcoli previsionali effettuati.

In essa sono stati evidenziati in giallo i punti in corrispondenza dei quali sono stati riscontrati degli scarti percentuali, tra i valori di illuminamento misurati e calcolati, superiori al 10%.

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
E misurato (lux)	81	46	29	9
E calcolato (lux)	79	43	23	7,4
Scarto %	-2,5	-6,5	-20,7	-17,8
	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
E misurato (lux)	50	65	34	26
E calcolato (lux)	48	52	36	24
Scarto %	-4,0	-20,0	5,9	-7,7
	PUNTO 9	PUNTO 10	PUNTO 11	PUNTO 12
E misurato (lux)	10	8	6	5
E calcolato (lux)	7,5	6,5	4,5	3,6
Scarto %	-25,0	-18,8	-25,0	-28,0

Figura 26 - Risultati delle misure e delle simulazioni numeriche e relativo scarto percentuale.

Riguardo i risultati ottenuti, si osserva in primo luogo che il modello di simulazione tende a sottostimare, in accordo alla necessità di natura progettuale di sovradimensionare cautelativamente gli impianti.

Si nota, inoltre, che con l'eccezione dei punti 3 e 6, lo scarto tra i valori misurati e calcolati si attesta a valori compresi tra 2 lux e 3 lux. Tale scarto, dovuto anche alla suddetta precisione dello strumento di misura utilizzato, comporta uno scarto inferiore al 10% per i punti in cui l'illuminamento è superiore ai 10 lux, mentre per valori di illuminamento inferiori a 10 lux lo scarto risulta superiore al 10%. Quindi, con l'eccezione dei suddetti punti 3 e 6, lo scarto percentuale tende in definitiva ad aumentare con la distanza dalla sorgente.

La figura 27 mostra il confronto tra i parametri di progetto richiesti dalle norme UNI: valori di illuminamento medio, massimo e minimo e i loro rapporti che tengono conto dell'uniformità dell'illuminazione, ovvero tra i valori di illuminamento minimo e medio e quelli minimi e massimi.

	E m	E min	E max	E min/E m	E min/E max
E misurato (lux)	30,8	5	81	0,16	0,06
E calcolato (lux)	27,9	3,6	79	0,13	0,05
Scarto %	-9,3	-28,0	-2,5	-20,6	-26,2

Figura 27 - Valori di illuminamento minimo E min, massimo E max e medio E m, e relativi rapporti, con i loro scarti percentuali.

In accordo con le considerazioni già esposte a proposito della figura 26 e della figura 27 si osserva che il valore massimo (corrispondente al punto 1, il più vicino alla sorgente) mostra lo scarto percentuale più contenuto, mentre il valore minimo pur avendo un scarto in valore assoluto inferiore (1,4 lux) è affetto da uno scarto percentuale considerevolmente maggiore. In definitiva, il valore di illuminamento medio calcolato risulta percentualmente inferiore del 10% rispetto al valore misurato.

Come considerazione conclusiva per queste misure effettuate in esterno, si può osservare che questa tipologia di misure ha una finalità rivolta alla verifica dei valori di soglia minimi prescritti dalla norme UNI e utili principalmente al dimensionamento degli impianti, e pertanto scarti di pochi lux tra i valori calcolati e misurati rappresentano il livello di precisione generalmente accettato nell'ambito della progettazione, tanto più che i valori calcolati dal modello di simulazione tendono cautelativamente a sottostimare.

5.4 Misure in interno

In aggiunta alle misure in esterno, condotte secondo le procedure normalizzate dall'UNI, sono state eseguite ulteriori misure in ambiente interno, investigando il comportamento della sorgente per distanze dalla

sorgente inferiori a 6 metri. Tale studio ha avuto come scopo quello di valutare le caratteristiche di emissione di questa sorgente. Infatti, essendo costituita da 98 lampade LED, per distanze ravvicinate essa non risulta modellizzabile come una sorgente puntiforme.

Questa indagine ha consentito di eseguire anche una prima stima dell'impatto sanitario da luce blu della sorgente, che comunque non costituisce un risultato conclusivo ma rappresenta un'ipotesi di lavoro per eventuali e successivi approfondimenti. E' stata quindi misurata anche l'irradianza da luce blu (EB) della sorgente, che ha consentito di calcolare il tempo di osservazione massimo (t_{max}) mediante la formula fornita dall'Allegato XXXVII del D.Lgs. 81/2008 [N15] per angoli di osservazione inferiori a 11 mrad e tempi di osservazioni inferiori a 10.000 s:

$$t_{max} = \frac{100}{E_B}$$

Per tale valutazione è stato ipotizzato un osservatore che staziona in corrispondenza alla normale al terreno passante per il centro della lampada. Considerando, quindi, che l'altezza di installazione tipicamente è compresa tra 5 m e 6 m, cautelativamente è stato misurato il contributo dell'irradianza per distanze dalla sorgenti comprese tra 2 m e 5 m.

L'ambiente in cui sono state eseguite le misure presenta una forma a parallelepipedo (figura 28). Le dimensioni dell'ambiente e il posizionamento della sorgente al suo interno sono riportati nella figura seguente. Viene indicata anche la direzione di propagazione dell'emissione luminosa, lungo la normale alla superficie emittente della lampada, in corrispondenza della quale sono stati scelti i punti di misura a diverse distanze.

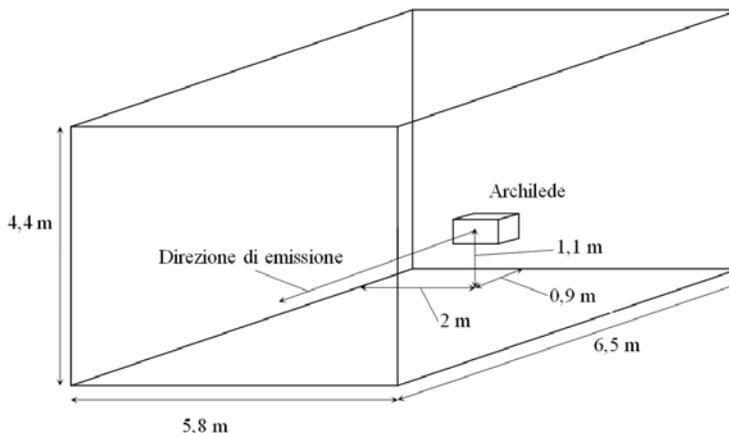


Figura 28 - Dimensioni dell'ambiente di misura, posizionamento della sorgente e direzione delle emissioni.

Le misure sono state eseguite con l'ausilio di un radiometro digitale che, essendo sprovvisto di limitatore, ha tenuto conto sia della componente diretta dell'emissione luminosa sia del contributo delle riflessioni fornite dall'ambiente di misura.

Parallelamente alle misure sono state condotte anche delle simulazioni numeriche, ricostruendo il modello 3D dell'ambiente di misura tramite il software di calcolo Dialux. La figura 29 mostra i coefficienti di riflessione delle superfici dell'ambiente di misura inseriti nel modello come dati di input.

<i>Superficie</i>	<i>Coefficiente di riflessione</i> %
Pavimento	70
Soffitto	70
Pareti laterali	70
Parete opposta alla direzione di emissione	50
Parete affacciata alla direzione di emissione	0

Figura 29 - Valori dei coefficienti di riflessione assegnati al modello 3D dell'ambiente di misura.

La figura 30 mostra invece il rendering 3D relativo all'emissione luminosa della sorgente all'interno della sala, calcolato attraverso i suddetti parametri illuminotecnici.

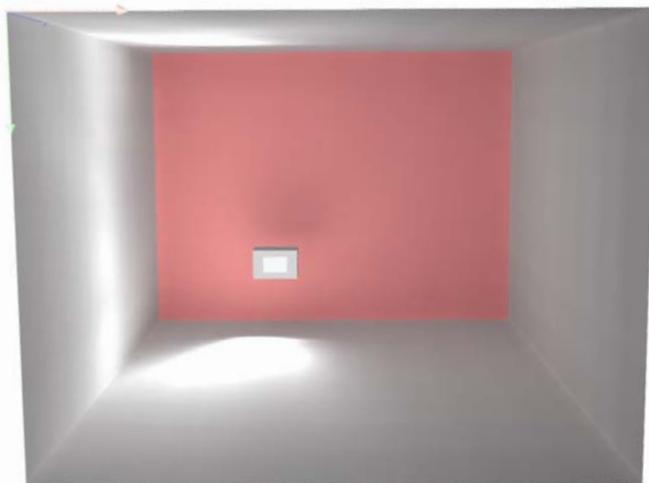


Figura 30 - Rendering 3D dell'ambiente di misura con la sorgente LED attiva.

IN figura 31 sono riportati i risultati delle misure e delle simulazioni eseguite con il software Dialux, assieme ai valori dei tempi di esposizione massima calcolati.

DISTANZA DALLA LAMPADA (m)	ILLUMINAMENTO VERTICALE MISURATO (lx)	ILLUMINAMENTO VERTICALE CALCOLATO (lx)	SCARTO %	IRRADIANZA DA LUCE BLU MISURATA (W/mq)	t max (s)
0,8	3400	4123	21,26	-	-
0,9	3055	3243	6,15	-	-
1	2620	2619	-0,04	-	-
1,1	2210	2160	-2,26	-	-
1,2	1765	1817	2,95	-	-
2	639	640	0,16	0,518	193
3	313	335	7,03	0,248	403
4	202	220	8,91	0,157	637
5	148	164	10,81	0,113	885

Figura 31 - Valori di illuminamento verticale calcolato e misurato, scarto medio percentuale, irradianza da luce blu misurata e tempi di esposizioni ex Allegato XXXVII del D.lgs. 81/2008

Riguardo le simulazioni numeriche, si osserva che lo scarto percentuale tra i valori di illuminamento misurati e calcolati risulta più contenuto per distanze comprese tra 1 m e 2 m. Infatti, il modello 3D fornisce una sovrastima sia allontanandosi per oltre 2 m dalla sorgente sia avvicinandosi ad essa per distanze inferiori a 1 m.

Per quanto riguarda le distanze superiori a 2 m, il modello non riesce a simulare correttamente il contributo delle riflessioni, che evidentemente risulta più importante all'aumentare della distanza. Per quanto riguarda le distanze dalla sorgente inferiori a 1 m, la sovrastima nei calcoli è dovuta al fatto che al diminuire della distanza la sorgente non è più modellizzabile come puntiforme, risultando bensì come una sorgente estesa. E' intuitivo, infatti, che la sorgente LED è costituita da 98 lampade LED che vengono distinte singolarmente a distanze ravvicinate, mentre per distanze maggiori esse sono percepite come un'unica sorgente luminosa.

Per distanze comprese tra 1 m e 2 m, infine, lo scarto percentuale risulta più basso in quanto la componente predominante dell'emissione luminosa è quella diretta, che viene correttamente simulata, e al contempo la sorgente è anche modellizzabile con buona approssimazione come puntiforme.

Infine, dal calcolo del tempo di esposizione massimo si evince che già per distanze di osservazione pari a 4 m il tempo massimo in cui si può fissare la sorgente risulta pari quasi a 10 minuti (637 s), che appare come

un'eventualità assai poco plausibile. E' evidente che per distanze di osservazione maggiori, corrispondenti peraltro a condizioni di osservazioni più realistiche, tale valore massimo di esposizione risulta ancor più elevato. Come già accennato sopra, questo risultato va inteso comunque come un primo approccio che dovrà essere approfondito da eventuali studi successivi.

Conclusioni

E' stata investigata la caratterizzazione della sorgente LED per illuminazione stradale, con riferimento alle metodologie e agli strumenti software e hardware di comune impiego nell'ambito della progettazione illuminotecnica.

E' stato riscontrato che tale sorgente può essere modellizzata e misurata come le altre, non presentando caratteristiche differenti rispetto alle tecnologie di tipo tradizionale nelle condizioni tipiche di esercizio.

E' stata altresì effettuata una prima valutazione di tipo sanitario, la quale tenderebbe in prima istanza a considerare tempi di esposizione massimi piuttosto elevati, ma che comunque deve essere corroborata da ulteriori indagini e studi più approfonditi.

Bibliografia (articoli, testi):

- [1] Aubè M., Roby J., Kocifaj M. (2013). Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility, *PLOS ONE* 8.7.
- [2] Barger L.K. et al. (2012). Learning to Live on a Mars Day: Fatigue Countermeasures during the Phoenix Mars Lander Mission, *SLEEP*;35, 10,1423-1435
- [3] Bellver C. (1988). Estimation of the influence of particulate pollution on the degree of polarization of the sky-light scattered by the atmospheric aerosol, *Atmospheric Environment*, 22, 10, 2323-2328.
- [4] Bierman A. (2012). Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow?, *Lighting Res. Technol.*; 44, 449-458.
- [5] Bird B.L., Branch L.C., Miller D.L. (2004). Effects of coastal lighting on the foraging behavior of beach mice, *Conservation Biology*, 18, 1435-1439.
- [6] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D. (2001). The first world atlas of the artificial night sky brightness, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328, 689-707.
- [7] Deda P., Elbertzhagen I., Klussmann M. (2007). Light pollution and the impacts on biodiversity, species and their habitat, *Starlight, a common heritage*, International Conference in Defence of the Quality of the Night Sky and the Right to Observe the Stars. Starlight Initiative, Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), C. Marin e J. Safari (eds.) La Palma, Canary Islands, Spain, aprile 19-20, 2007.
- [8] Eisenbeis G. (2006). Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany, *Ecological Consequences of Artificial night lighting* (eds. Rich C., Longcore T.), 281-304. Island Press, Washington.
- [9] Falchi F., Cinzano P., Elvidge C. D., Keith D.M., Haim A. (2011). Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility, *Journal of Environmental Management*.
- [10] Forcolini G. (2008). Illuminazione LED, Hoepli.
- [11] Forcolini G. (2012). Nuovi LED per illuminare ambienti interni ed esterni, *Speciale Tecnico Qualenergia.it*.
- [12] Gallaway T., Olsen R.N., David M.M. (2010). The economics of global light pollution, *Ecological Economics*, 69, 658-665.
- [13] Goins G.D. (2002). Growth, stomatal conductance and leaf surface temperature of Swiss chard grown under different artificial lighting technologies. Society of automotive engineers Tech. Paper 2002-01-2338.
- [14] Hamidi Z.S., Abidin Z.Z, Ibrahim Z.A., Shariff N.N.M. (2011). Effect of Light Pollution on Night Sky Limiting Magnitude and Sky Quality in Selected Areas in Malaysia, 3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment (ISESEE).
- [15] Isobe S., Hamamura S. (2000). Light pollution and its energy loss, *Astrophysics and Space Science*, 273, 289-294.
- [16] Joseph J.H., Kaufman Y.J., Mekler Y. (1991). Urban light pollution: the effect of atmospheric aerosols on astronomical observations at night, *Applied Optics*, 30, 21, 3047-3058.

- [17] Kempenaers B., Borgstrom P., Loes P., Schlicht E., Valcu M. (2010). Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in song birds, *Current Biology*, 20, 1735-1739.
- [18] Kuechly H.U., Kyba C.C.M., Ruhtz T., Lindemann C., Wolter C., Fischer J., Hölker F. (2012). Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany, *Remote Sensing of Environment*, 126, 39-50.
- [19] Le Corre M., Ollivier A., Ribes S., Jouventin P. (2002). Light-induced mortality of petrels: a 4 year study from Reunion Island (Indian Ocean), *Biological Conservation*, 105, 93-102.
- [20] Longcore T., Rich C. (2004). Ecological light pollution, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 4, 191-198.
- [21] Lyttimäkiä J., Tapiob P., Assmuth T. (2012). Unawareness in environmental protection: The case of light pollution from traffic, *Land Use Policy*, 29, 3, 598-604.
- [22] Massa G.D., Hyeon-Hye K., Wheeler R.M., Mitchell C.A., (2008). Plant Productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43, 7, 1951-1956.
- [23] Migaud H., Cowan M., Taylor J., Ferguson H.W. (2007). The effect of spectral composition and light intensity on melatonin, stress and retinal damage in post-smolt Atlantic salmon, *Salmo salar*, *Aquaculture*, 270, 390-404.
- [24] Mochizuki E., Kimura H. (2010). Effects of difference of spectral power distribution on visual fatigue, *Journal of Environmental Engineering*, 75, 647; 35-41
- [25] Narukawa Y. et al. (2010). White light emitting diodes with super-high luminous efficacy, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43.
- [26] Olle M., A. Virsile (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22, 223-234.
- [27] Patat F. (2010). The effects of improper lighting on professional astronomical observations presented in CIE Light and Lighting Conference, Vienna.
- [28] Patterson J.W. (2012). Evaluation of New Obstruction Lighting Techniques to Reduce Avian Fatalities, Technical Report of the Federal Avian Administration DOT/FAA/TC-TN12/9.
- [29] Pedani M. (2004) Light pollution at the Roque de los Muchachos Observatory, *New Astronomy*, 9, 641-650.
- [30] Perry G., Buchanan B.W., Fisher R.N., Salmon M., Wise S.E. (2008). Effects of artificial night lighting on amphibians and reptiles in urban environments. *Herpetological Conservation*, 3, 239-256.
- [31] Poot H., Ens B.J., de Vries H., Donners M.A.H., Wernand M.R., Marquenie J.M. (2008). Green light for nocturnally migrating birds, *Ecology and Society*, 13, 47.
- [32] Rabaza O. et al. (2010). All-Sky brightness monitoring of light pollution with astronomical methods, *Journal of Environmental Management*, 91, 1278-1287.
- [33] Rea M.S., Figueiro M.G., Bullough J.D., Bierman A. 2005. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research, Brain Research Reviews* 50, 2, 213-228.

- [34] Rich C., Longcore T. (2006). Ecological Consequences of Artificial Night Lighting, Rich C. and Longcore T. eds., Island Press.
- [35] Scullino D. (2007). Il LED e l'illuminazione, Editore Sandit Libri
- [36] Skene D. J. et al. (1999). Effects of light on human circadian rhythms, *Reproduction Nutrition and Development* 39:295–304
- [37] Stone E.L., Jones G., Harris S. (2012). Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats, *Global Change Biology*, 18, 2458-2465.
- [38] Svensson A.M., Rydell J. (1998). Mercury vapour lamps interfere with the bat defence of tympanate moths (Operophtera spp.; Geometridae), *Animal behavior*, 55, 223-226.
- [39] Wang J.H., Boles L.C., Higgins B., Lohmann K.J. (2007). Behavioral responses of sea turtles to lightsticks used in longline fisheries, *Animal Conservation*, 10, 176-182.

Bibliografia (Rapporti):

- [40] Anses-French Agency for food environmental and occupational health and safety (2010). Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) Rapport d'expertise collective "Comité d'Experts Spécialisés (CES) : Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements".
- [41] Anses-French Agency for food environmental and occupational health and safety (2010). Press Kit "Lighting systems using light-emitting diodes: health issues to be considered".
- [42] APAT-Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (2005). Guida relativa alla tecnica di illuminazione in funzione del contenimento dell'inquinamento luminoso e dei consumi energetici (RTI CTN_AGF 3/2005).
- [43] City of Sydney Green Environmental Sustainability Progress Report 2012/2013.
- [44] Commissione Europea (2005). MEEuP Methodology study Eco-design of Energy-Using Products, Cases Report.
- [45] Commissione Europea (2011). Libro verde: Illuminare il futuro. Accelerare la diffusione di tecnologie di illuminazione innovative, Bruxelles.
- [46] IAE-International Energy Agency (2010). Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings.
- [47] ICNIRP (2013). Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation.
- [48] Koninklijke Philips Electronics N.V., (2011). Case study A44 Highway.
- [49] Lighting Europe (2013). Position paper on lamp labeling under regulation (EU) No 874/2012 (Energy Label) Changes from the new energy labelling regulation on products labelled under 98/11/EC (old label).
- [50] Seraceni M. per Hera Luce (2011). Proposta per un modello condiviso di Certificati Energetici per apparecchi illuminanti e impianti di pubblica illuminazione.
- [51] Solid State Lighting Research and Development (2011): Multiyear Program Plan, U.S. Department of Energy.
- [52] Solid State Lighting Research and Development (2012): Multiyear Program Plan, U.S. Department of Energy.
- [53] Solid State Lighting Research and Development (2013): Multiyear Program Plan, U.S. Department of Energy.
- [54] Toronto Atmospheric Fund (2010). User Reactions to Advanced Lighting Pilot Installations in Toronto Community Housing Parking Garages, City of Toronto.

Normativa:

- [N1] UNI 10745 – Studi di impatto ambientale - Terminologia
- [N2] UNI 10819 – Luce ed illuminazione – Impianti di illuminazione esterna – Requisiti per la limitazione della dispersione verso l'alto del flusso luminoso
- [N3] UNI EN 10671 – Misure dei dati fotometrici
- [N4] UNI EN 11248 – Illuminazione stradale – Selezione delle categorie illuminotecniche
- [N5] UNI 11356 – Luce e illuminazione – Caratterizzazione fotometrica degli apparecchi di illuminazione a LED
- [N6] UNI EN 12464-2 – Luce e illuminazione – Illuminazione dei posti di lavoro – Parte 2:Posti di lavoro in esterno
- [N7] UNI EN 13201-1 – Illuminazione stradale –
- [N8] UNI EN 13201-2 – Illuminazione stradale – Requisiti prestazionali
- [N9] UNI EN 13201-3 – Illuminazione stradale – Calcolo delle prestazioni
- [N10] UNI EN 13201-4 – Illuminazione stradale – Metodi di misurazione delle prestazioni fotometriche
- [N11] UNI EN 13032-1:2005 – Luce ed illuminazione – Misurazione e presentazione dei dati fotometrici di lampade ed apparecchi di illuminazione
- [N12] CEI EN 62031:2009 – Moduli per l'illuminazione generale – Specifiche di sicurezza
- [N13] CEI EN 61347-2:2007 – Unità di alimentazione di lampada – Parte 2-13: Prescrizioni particolari per unità di alimentazione elettroniche alimentate in corrente continua o in corrente alternata per moduli LED
- [N14] CEI EN 62471 2010-01 Sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampada
- [N15] D. Lgs. 81/2008 noto come “Testo unico sulla sicurezza sul lavoro”
- [N16] Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012
sull'efficienza energetica
- [N17] D.Lgs. 25/07/2005, n.151 Attuazione delle direttive 2002/95/CE, 2002/96/CE e 2003/108/CE, relative alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche, nonché allo smaltimento dei rifiuti
- [N18] Direttiva 2002/95/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 27 gennaio 2003 sulla restrizione dell'uso di determinate sostanze pericolose
- [N19] Direttiva 2002/96/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 27 gennaio 2003 sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)
- [N20] Direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 concernente l'indicazione del consumo di energia e di altre risorse dei prodotti connessi all'energia, mediante l'etichettatura ed informazioni uniformi relative ai prodotti
- [N21] D.Lgs. 28/06/2012, n. 104 Attuazione della direttiva 2010/30/UE, relativa all'indicazione del consumo di energia e di altre risorse dei prodotti connessi all'energia, mediante l'etichettatura ed informazioni uniformi relativa ai prodotti

[N22] Regolamento delegato (UE) N. 874/2012 della Commissione del 12 luglio 2012 che integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura indicante il consumo d'energia delle lampade elettriche e delle apparecchiature d'illuminazione

[N23] COM(2003) 302 del 18/06/2003 Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento europeo - Politica integrata dei prodotti - Sviluppare il concetto di "ciclo di vita ambientale"

[N24] Decreto Interministeriale dell'11 aprile 2008 Approvazione del Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione

[N25] D.M. del 10 aprile 2013 Piano di azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione – Revisione 2013

[N26] D.M. del 22 febbraio 2011 Adozione dei criteri ambientali minimi da inserire nei bandi gara della Pubblica amministrazione per l'acquisto dei seguenti prodotti: tessili, arredi per ufficio, illuminazione pubblica, apparecchiature informatiche.

Standard

[N27] CIE 13.3-1995 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources

[N28] CIE 177:2007 Colour Rendering of White LED Light Sources

[N29] IEC/TR 62778 Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires

GLOSSARIO

Brillanza: la brillanza superficiale del cielo è misurata in magnitudini per secondo d'arco quadrato: La relazione tra flusso luminoso F e magnitudine è: $\text{mag} = -2,5 \cdot \log_{10}(F) + \text{costante}$. Valori numerici maggiori corrispondono a un cielo più buio. La brillanza naturale del cielo nella banda di maggiore sensibilità dell'occhio umano è di circa $21,5 \text{ mag/arcsec}^2$.

Corpo nero: oggetto teorico che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente (e quindi non ne riflette) ed il cui spettro dipende unicamente dalla temperatura.

Curva di sensibilità relativa $V(\lambda)$: la CIE ha codificato un occhio medio internazionale, avente una sensibilità media convenzionale, stabilito da una elaborazione statistica compiuta sulla scorta di rilievi condotti su un gran numero di esperienze campione. È stato così definito un fattore o coefficiente di visibilità relativa V , funzione di ciascuna λ , valido per la visione in condizioni fotopiche.

Diode: componente elettronico passivo non-lineare a due terminali con la funzione ideale di permettere il flusso di corrente elettrica in un verso e di bloccarla totalmente nell'altro.

Diode a giunzione p-n: è un diode realizzato mediante la diffusione di impurità di tipo accettore in cristalli di silicio drogati mediante atomi donatori (e viceversa).

Drogaggio: aggiunta di piccole percentuali di atomi non facenti parte del *semiconduttore* che vanno a modificare le proprietà elettriche ma non chimiche del materiale stesso

Fattore di effetto circadiano: ogni grandezza circadiana si ottiene dalla corrispondente fotometrica tramite la moltiplicazione con un fattore, detto fattore di effetto circadiano.

Flusso luminoso: grandezza fotometrica che misura la potenza percepita della luce; viene definito come viene definito come il prodotto tra la potenza emessa da una sorgente luminosa puntiforme ed il coefficiente di visibilità [unità di misura: lumen (lm)] Un lumen è definito come il flusso luminoso di luce prodotta da una sorgente luminosa che emette una candela di intensità luminosa su di un angolo solido di uno steradiano.

Irradianza: potenza incidente per unità di area [unità di misura: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Luminanza: grandezza fotometrica definita come il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente verso una superficie normale alla direzione del flusso e l'area della superficie stessa [unità di misura: $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$]

Radianza: grandezza fisica radiometrica connessa alla "brillantezza" della sorgente che esprime la quantità di luce (ovvero la potenza luminosa) emessa da una superficie di area unitaria, e diretta verso un angolo solido unitario in una direzione indicata [unità di misura: $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]

Ritmo circadiano: in cronobiologia e in cronopsicologia è un ritmo caratterizzato da un periodo di circa 24 ore. Il termine, coniato da Franz Halberg, viene dal latino *circa diem* ovvero "intorno al giorno". Esempi di ritmo circadiano sono: il ritmo veglia-sonno, il ritmo di secrezione del cortisolo e di varie altre sostanze biologiche, e di altri parametri come la temperatura corporea o legati al sistema circolatorio.

Scattering: la diffusione ottica (o dispersione), scattering in inglese, si riferisce ad un'ampia classe di fenomeni in cui onde o particelle vengono deflesse a causa della collisione con altre particelle o onde. La deflessione avviene in maniera disordinata e in buona misura casuale (il significato letterale di scattering è "sparpagliamento") e per questo la diffusione si distingue dalla riflessione e dalla rifrazione, che invece cambiano le traiettorie in maniera regolare e determinata. Sono considerati processi di scattering solo le interazioni elastiche o quasi elastiche, che cioè non comportino rilevanti cessioni o guadagni di energia.

Semiconduttore: materiale con resistività (o anche una conducibilità) intermedia tra i conduttori e gli isolanti, è alla base di tutti i principali dispositivi elettronici e microelettronici a stato solido (transistor, i diodi e i diodi ad emissione luminosa).

SOL: il termine è utilizzato dagli astronomi per indicare la durata del giorno solare medio sul pianeta Marte. In particolare, è utilizzato dalle sonde atterrate sul pianeta per contare i giorni trascorsi dall'inizio della loro missione. Il giorno marziano ha infatti una durata di poco differente da quello terrestre (24h 39m 35.244s ovvero 88775,244s).

Solido fotometrico: rappresentazione tridimensionale delle intensità luminose emesse da una sorgente nello spazio. Intersecando il solido con dei piani passanti per l'asse ottico si ottengono le "curve fotometriche". Il flusso luminoso globalmente emesso si ottiene integrando l'intensità luminosa a tutto lo spazio.

Spettro elettromagnetico: l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche

TCO (Total Cost Ownership): Il TCO è un'analisi statica dei costi di esercizio di una apparecchiatura non tenendo conto pertanto di eventuali ritorni dovuti all'investimento in innovazione, del risparmio operativo, delle nuove mansioni create. Il TCO, quindi, monitorando solamente i costi non può essere usato in fase di analisi strategica degli investimenti.

Visione fotopica, mesopica, scotopica: la visione fotopica ha luogo in presenza di intensità luminose differenti. Per intensità decrescenti la visione è chiamata mesopica e scotopica. In condizioni di visione mesopica o scotopica (notturna), con sempre decrescenti intensità luminose, cambia la curva del coefficiente di visibilità relativa.

Link utili:

<http://www.isprambiente.gov.it>
<http://www.minambiente.it>
<http://www.autorita.energia.it>
<http://www.energia.enea.it>
<http://ec.europa.eu/> http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html
<http://eur-lex.europa.eu>
<http://www.iss.it/>
<http://www.icnirp.org/>
<http://www.who.int/>
<http://www.energy.gov/>
<http://www.epa.gov/>
<https://www.energystar.gov/>
<http://www.anses.fr/fr>
<http://www.cityofsydney.nsw.gov.au/>
<http://www.iea-ebc.org/>
<http://www.lightsavers.ca/>
<http://www.lightingeurope.org/>
<http://www.cielobuio.org>
<http://www.darksky.org>
<https://www.uni.com/>
<http://www.cie.co.at/>
<http://www.iec.ch/>

QUADERNI

AMBIENTE e SOCIETÀ'
9/2014