



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Caratterizzazione di impianti di illuminazione ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto

Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi



Report RdS/2010/249

CARATTERIZZAZIONE DI IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE AI FINI DELLA VALUTAZIONE DELLA
LUCE DISPERSA VERSO L'ALTO

Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi (INRIM)

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi Finali

Tema: Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica

Responsabile Tema: Simonetta Fumagalli, ENEA

RIASSUNTO

Nell'ambito del contratto di ricerca "Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradali ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto" attivato dall'ENEA, l'INRIM ha individuato le specifiche esigenze di tipo fotometrico e metrologico per il piano di ricerca complessivo formulato dall'ENEA e svolto un'attività preparatoria al fine di adattare metodologie e strumentazione di misura, sviluppate precedentemente e già disponibili, alle specifiche esigenze individuate nel progetto. Inoltre sono stati integrati i programmi di calcolo per poter fornire risultati utili ad individuare parametri di riferimento per quantificare le conseguenze della luce dispersa verso l'alto dall'impianto sulla luminanza della volta celeste.

1. INTRODUZIONE

1.1. Obiettivo della ricerca

Gli obiettivi della ricerca sono:

- confrontare, a parità di caratteristiche prestazionali, l'impatto ambientale di diverse tipologie di impianti di illuminazione stradale;
- proporre parametri per la classificazione degli impianti riguardo alla luce dispersa verso l'alto (inquinamento luminoso) in base alle loro prestazioni normative e localizzazione sul campo;
- proporre un algoritmo di previsione dell'impatto ambientale di un impianto in base alle caratteristiche quantitative prima definite.

Seguendo le indicazioni della letteratura scientifica internazionale e in particolare quelle del comitato tecnico CIE TC4.21, un'analisi completa richiede lo studio di impianti di illuminazione non schermati da edifici (rurali) e impianti schermati dagli edifici (urbani). Per ragioni operative si è deciso di trattare, nel presente contratto, esclusivamente il primo caso.

L'attività relativa al contratto è svolta in sinergia tra INRIM, AIDI ed ENEA sotto il coordinamento e la supervisione di ENEA.

In particolare sono di specifica competenza INRIM:

- la definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura,
- la caratterizzazione campioni di apparecchi,
- la campagna di misura sulle installazioni prototipali (in ambiente rurale) allestite da ENEA

L'analisi del sito e la valutazione della magnitudo limite è svolta in collaborazione con AIDI e la valutazione complessiva dei risultati con AIDI ed ENEA.

2. SCELTA DEL SITO DI MISURA E DELLE TIPOLOGIE DI IMPIANTI

Sono state individuate tre diverse tipologie di apparecchi:

- con lampada al sodio alta pressione e vetro curvo ottimizzato
- con lampada al sodio alta pressione e vetro piano
- a LED modulare

Operare con gli impianti sperimentali in ambito extraurbano permette di sfruttare a pieno le metodologie di acquisizione dei parametri dell'inquinamento luminoso previste da INRIM.

Per questa ragione è stata individuata, nel comune di Marcallo, la strada che inizia dalla rotonda di via Lega Lombarda.

Si tratta di una strada extraurbana a doppio senso di marcia sufficientemente isolata dall'abitato, per evitare disturbi da luci estranee, e con la presenza di strade alternative che ne permettono la chiusura al traffico, per il periodo delle prove, senza causare disagi di rilievo.

La presenza di un tratto rettilineo permette l'installazione ad hoc di 5 apparecchi su pali telescopici mobili, di illuminazione e lo spegnimento dell'eventuale impianto esistente.



Figura 1 Sito oggetto delle prove (A: via Lega Lombarda) L'impianto prototipale sarà realizzato nella parte alta della strada, per non essere influenzati dalle case limitrofe.

3. PROCEDURA DI INDAGINE SPERIMENTALE

La procedura di indagine sperimentale consiste essenzialmente nei seguenti passi:

- 1) caratterizzazione in laboratorio degli apparecchi di illuminazione;
- 2) caratterizzazione sul campo delle caratteristiche dell'asfalto (limitatamente agli angoli di interesse);
- 3) caratterizzazione dell'impianto (limitatamente alle grandezze elettriche di alimentazione e geometriche di installazione);
- 4) calcolo dell'illuminamento e della luminanza del manto stradale;
- 5) misurazione dell'illuminamento e della luminanza del manto stradale;
- 6) misura dall'alto della luminanza e dell'illuminamento prodotto dall'impianto;
- 7) calcolo della ripartizione della luminanza dell'impianto;
- 8) individuazione dei contributi dovuti alla radiazione emessa direttamente dagli apparecchi di illuminazione, dalla superficie della strada, delle altre zone illuminate;
- 9) definizione dei parametri utili al modello matematico per la valutazione dell'inquinamento luminoso (descritto nella relazione AIDI).

I passi 1 e 2 sono indispensabili il calcolo dell'impianto e per stabilire l'accuratezza dei calcoli.

Il passo 3 permette di individuare le reali condizioni operative dell'impianto e di giustificare eventuali discrepanze tra i valori calcolati (al passo 4) e misurati (al passo 5).

Il passo 5 permette di conoscere le reali prestazioni dell'impianto e di avere indicazioni per i parametri del modello.

Il passo 6 permette di quantificare i parametri usati nei i passi successivi come descritto al §4.1.

Gli ultimi passi esauriscono la caratterizzazione dell'impianto fornendo i dati utili al modello.

4. DEFINIZIONE DELLE MISURE ILLUMINOTECNICHE E DELLE CONDIZIONI DI MISURA

4.1. Premessa

Modelli matematici per la descrizione dell'inquinamento luminoso e la stima dell'incremento della luminanza della volta celeste dovuta alla presenza di impianti di illuminazione sono stati sviluppati da INRIM e verificati in più occasioni con misurazioni specifiche [1], [2], [3], [4], [5].

4.2. Misure su città

In particolare INRIM ha, in passato, sviluppato metodologie atte a caratterizzare grandi estensioni (ad esempio città) con misure di luminanza a distanza prese da rilievi vicini associate al conteggio, automatico, degli apparecchi visibili.

A partire dai dati fotometrici acquisiti, con una opportuna metodologia di analisi è possibile ottenere le seguenti grandezze di interesse:

- luminanza della città nella direzione di osservazione;
- intensità luminosa emessa dalla città nella direzione di osservazione;
- luminanza del cielo nella direzione di osservazione;
- intensità luminosa emessa dal cielo nella direzione di osservazione.

Applicando l'ipotesi di assimilare l'emissione della città a quella di una sorgente isotropa [

6], [7] (detta anche Lambertiana, per la quale cioè la luminanza è uguale in tutte le direzioni di osservazione), è possibile calcolare l'intensità luminosa emessa verso l'alto.

Fondamentale per la validità dei calcoli è la conoscenza del fattore di trasmissione atmosferica nell'istante di misura. Infatti a causa della non completa trasparenza dell'aria, la luce irradiata dalle sorgenti e superfici della città giunge attenuata nel sito di misura. Questo effetto è tanto più rilevante, quanto più la postazione di misura è distante dalla zona di emissione della radiazione.

Questo parametro può essere ottenuto con misure della stessa superficie a distanze diverse (ad esempio campanile, piazza ecc.).

Per una sorgente lambertiana, l'intensità luminosa emessa I nella direzione θ risulta essere:

$$I = I_0 \cos \vartheta$$

ove:

I_0 è l'intensità emessa lungo la normale alla superficie della sorgente (allo Zenit nel nostro caso),

θ è l'angolo di emissione rispetto alla normale

Inoltre, per una superficie lambertiana, essendo la luminanza costante con l'angolo di osservazione, vale la relazione:

$$I_0 = L \, dA$$

ove, nel nostro caso:

L è la luminanza misurata della città,

A l'area della superficie della città.

I_0 rappresenta l'intensità luminosa emessa dalla città, considerata come puntiforme, nella direzione zenitale. Nelle applicazioni pratiche, il considerare la città come un'areola concentrata facilita il calcolo dell'influenza della luce dispersa a grande distanza. In fase di misura è invece necessario ricorrere a misure in termini di luminanza, grandezza definita su una superficie estesa.

Nota l'intensità luminosa emessa verso l'alto, nella direzione normale alla superficie della città, il flusso luminoso disperso verso l'alto vale:

$$\Phi = \int I \, d\Omega = \int L A \cos \vartheta \, d\Omega = \pi L A$$

ove:

Φ è il flusso luminoso associato alla luminanza L di una sorgente lambertiana avente estensione A , nel semispazio superiore.

Confrontando il valore ottenuto per il flusso luminoso disperso verso l'alto con il valore del flusso luminoso totale installato nella città, è possibile valutare il rapporto percentuale tra i due flussi.

Questo rapporto considera la dispersione verso l'alto della radiazione luminosa dell'intera città, quindi anche delle superfici illuminate e non solo quello diretto degli apparecchi di illuminazione.

Volendo calcolare il flusso luminoso disperso verso l'alto imputabile esclusivamente

all'emissione diretta degli apparecchi di illuminazione è necessario scorporare il contributo delle superfici illuminate. Per fare ciò è necessario conoscere il fattore di riflessione medio delle superfici illuminate. Il suo valore può essere ipotizzato utilizzando dati disponibili in letteratura, oppure classificando i materiali presenti in città e valutandone l'estensione territoriale percentuale.

Noto il flusso luminoso disperso verso l'alto imputabile alla sola emissione diretta verso l'alto degli apparecchi di illuminazione, è possibile, con gli opportuni modelli matematici, stimare l'impatto di eventuali modifiche sistematiche delle caratteristiche degli impianti.

4.3. Definizione delle grandezze utili ai fini della valutazione dell'inquinamento luminoso degli impianti sperimentali.

La metodologia di misura descritta nel paragrafo precedente presenta alcune approssimazioni che possono essere risolte esclusivamente con indagini approfondite di singoli impianti.

Una descrizione dettagliata del modello che si intende applicare nella presente indagine è presente nella relazione AIDI, alla quale si rimanda.

Per la simulazione di un impianto occorre conoscere:

- la ripartizione dell'intensità luminosa delle sorgenti in candele,
- le condizioni di installazione delle stesse,
- il coefficiente di luminanza q delle superfici illuminate, nelle direzioni di illuminazione e per ogni direzione di riflessione.

Mentre i primi dati sono facilmente reperibili, l'ultimo non è generalmente noto, con la necessaria completezza, per le superfici in gioco. Nel caso di superfici lambertiane può essere sostituito dal fattore di riflessione ρ .

Per caratterizzare l'impianto risulta pertanto preferibile individuare e misurare le frazioni di flusso coinvolte nel modello e le direzioni angolari ove queste frazioni sono indirizzate.

Eseguendo queste misure su un impianto tipo, è possibile ricavare i parametri specifici usati nel modello e procedere a semplificazioni che, combinando parametri facilmente misurabili a parametri calcolabili con adeguata accuratezza, permettano una realistica simulazione dell'impatto ambientale dell'impianto.

Con la metodologia che si propone l'impianto di illuminazione diventa, nel suo insieme, una sorgente di luce che può essere caratterizzata, in campo vicino, con la ripartizione della luminanza o a grande distanza, considerandola puntiforme, con la ripartizione dell'intensità luminosa.

Le misure devono coprire tutto l'emisfero superiore all'impianto e possono considerare l'illuminamento in una griglia di punti o la luminanza osservata da questi punti.

In particolare la misura dell'illuminamento in un punto permette di conoscere il flusso luminoso incidente nel punto prodotto da tutto l'impianto, ma a meno di operare a distanza proibitive, non permette di conoscere le direzioni di emissione di tale flusso.

La misura della luminanza eseguita con rivelatori a immagine (ILMD-Imaging Luminance Meter Device) permette invece di ottenere questa informazione indispensabile ai fini del modello. Si tratta pertanto di realizzare, sul campo, la caratterizzazione, denominata di campo vicino (near field), di un gigantesco apparecchio di illuminazione adattando le tecniche usate in laboratorio su apparecchi "normali" (Figura 2) ed usate da INRIM per la caratterizzazione degli apparecchi di illuminazione.

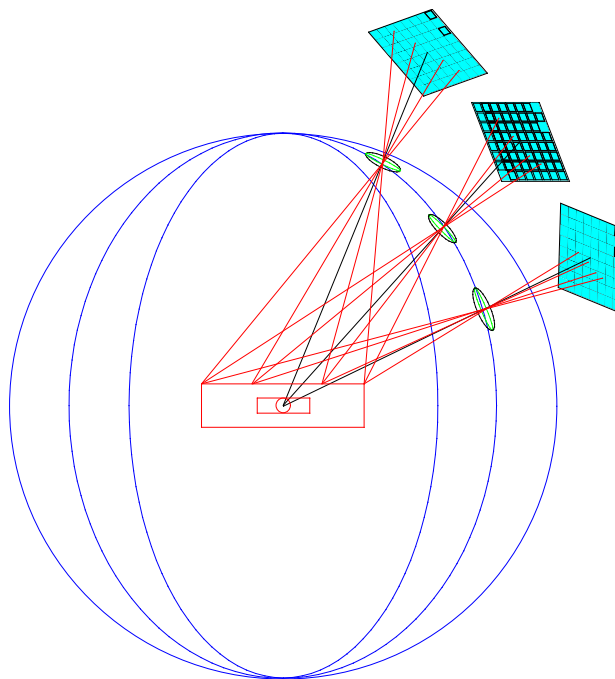


Figura 2 Misurazione in campo vicino di un apparecchio di illuminazione con ILMD. La superficie luminosa dell'apparecchio (in rosso al centro della sfera) viene misurata dall'ILMD (in turchese) preservando la conoscenza della direzione di emissione per via del sistema ottico (in verde).

Considerando le difficoltà operative sul campo, il metodo previsto da INRIM prevede in ogni caso la misurazione delle due grandezze contemporaneamente, usando le misure di illuminamento come verifica dell'accuratezza di quelle di luminanza e dei calcoli conseguenti.

4.4. Definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura

Per quanto le misure per la caratterizzazione delle prestazioni normative dell'impianto [8] INRIM dispone di un apposito sistema di misura in grado di operare in modo dinamico [9], [10]. Considerando le finalità della ricerca si ritiene opportuno operare in modo statico con la stessa strumentazione.

Inoltre accendendo un solo apparecchio sarà possibile misurare le caratteristiche in riflessione dell'asfalto, limitatamente alle condizioni angolari utili per la verifica dei calcoli illuminotecnici.

Per la valutazione del flusso luminoso disperso verso l'alto INRIM ha, in passato e come brevemente descritto al §4.2, sviluppato metodologie atte a caratterizzare grandi estensioni (ad esempio città) con misure a distanza prese da rilievi vicini. Per ovviare a quest'ultima limitazione era stato provato l'uso di elicotteri radiocomandati con carico utile di circa 5 kg, in volo stazionario a diverse quote.

Misure parziali su piccoli impianti sono state eseguite in passato con tecniche manuali e l'utilizzo di piattaforme aeree, comportando però lunghi tempi di acquisizione.

La possibilità di operare su un solo impianto di ridotte dimensioni completamente isolato permette una completa mappatura dell'illuminamento su una vasta area orizzontale sovrastante l'impianto e della luminanza da diverse direzioni angolari, parametro utile per individuare le direzioni di diffusione del flusso luminoso verso l'alto.

Si è pertanto deciso di eseguire misure su una superficie di circa 200 m di larghezza e di 100 di lunghezza (oltre la lunghezza dell'impianto) secondo lo schema di Figura 3.

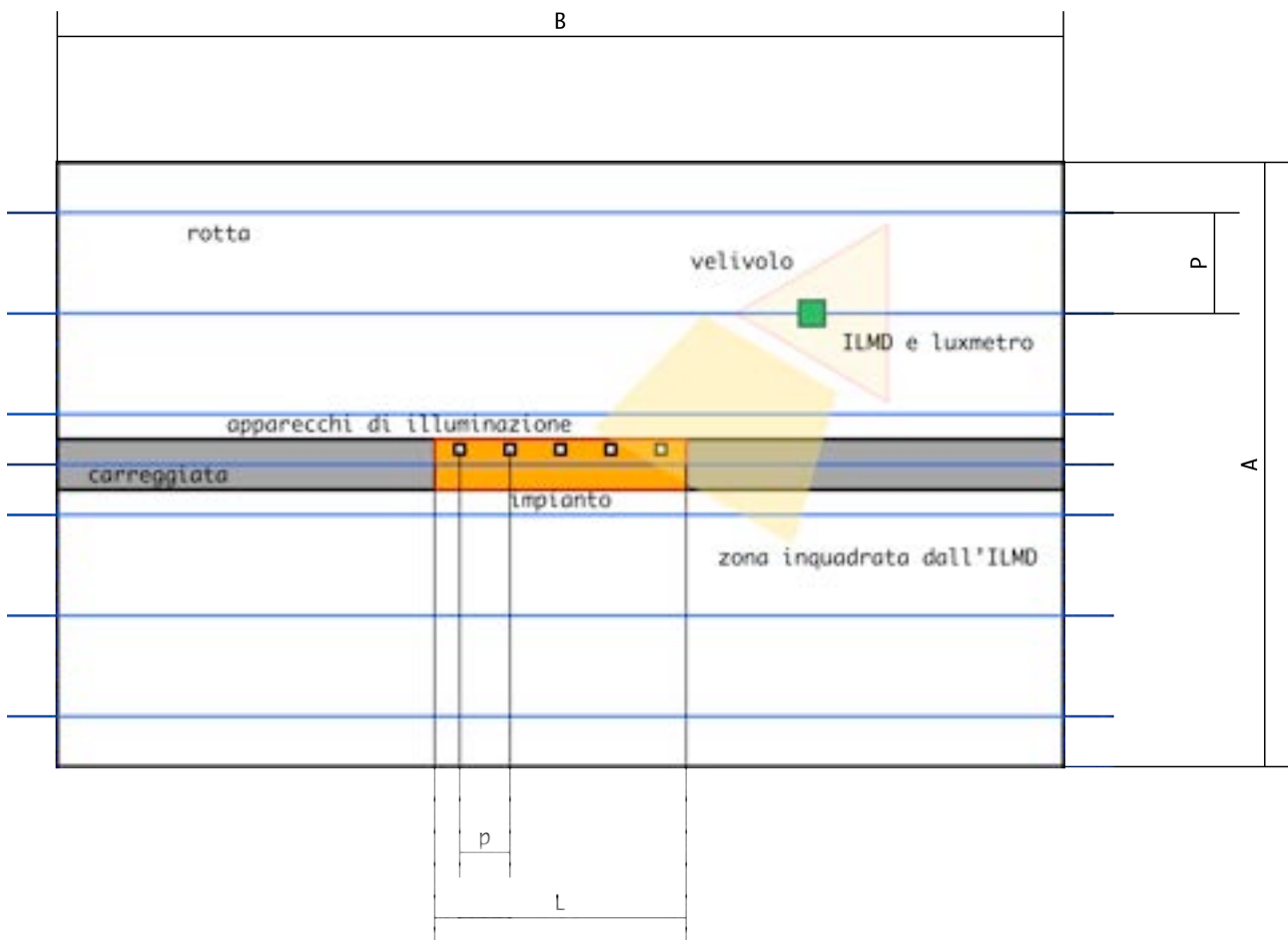


Figura 3 Visualizzazione delle condizioni di misura. A: altezza della zona misurata, B: lunghezza della zona misurata, L: lunghezza dell'impianto, p: interdistanza tra gli apparecchi di illuminazione, P: passo tra le rotte percorse dal velivolo.

IL sistema di misura viene ruotato durante la traslazione del velivolo in modo da coprire le direzioni angolari di interesse. La quota di misura è di circa 25 m in modo da limitare al minimo le direzioni angolari che non risultano coperte.

In queste condizioni l'uso dell'elicottero radiocomandato si è rilevato impossibile per le difficoltà di controllo della posizione e dell'assetto di un velivolo potenzialmente al buio e relativamente piccolo rispetto alla distanza di visione del pilota.

Per queste ragioni con la ditta Aerials Projects sono state valutate soluzioni alternative e si è deciso di utilizzare un prototipo a vela che permette basse velocità di movimentazione unite a una buona manovrabilità e controllo della quota.

Le misure secondo normativa dell'impianto, integrate dai rilievi dall'alto, permettono di quantificare le frazioni di flusso luminoso disperse dall'impianto verso l'alto e il comportamento energetico dello stesso come rapporto tra parametri relativi alle prestazioni illuminotecniche, parametri relativi all'inquinamento luminoso e/o il flusso luminoso installato e potenza elettrica assorbita.

I dati sperimentali, così ottenuti saranno utilizzati in simulazioni numeriche per individuare

il contributo dell'impianto alla magnitudo limite (vedere §3.6) e contemporaneamente per confermare il modello matematico che stima il contributo all'inquinamento luminoso dell'impianto.

4.5. Caratterizzazione campioni di apparecchi

Per ogni tipologia di apparecchio selezionata il campione fornito da ENEA viene sottoposto a verifiche fotometriche ed elettriche. Essendo necessaria una caratterizzazione esaustiva rispetto a quella richiesta dall'attuale normativa stradale, INRIM ha predisposto una metodologia di misura ad hoc per individuare tutti i parametri adatti alla sperimentazione, considerando le limitazioni previste dalla normativa [12].

Inizialmente l'apparecchio di illuminazione viene misurato in laboratorio alla temperatura ambiente di riferimento adottata in fotometria (25°C) e alla tensione di alimentazione nominale, determinando:

- il flusso luminoso emesso (in lumen),
- le frazioni di flusso luminoso emesse in definite direzioni,
- la ripartizione dell'intensità luminosa (in candele) con angolo γ tra 0° e 175°,
- la radianza spettrale (in unità relative)
- i parametri elettrici di alimentazione.
- la temperatura di colore correlata,
- l'indice di resa dei colori
- le efficienze luminose come rapporto del flusso luminoso emesso globalmente e in definite direzioni / potenza totale assorbita, intendendo con quest'ultima la potenza elettrica reale assorbita dall'apparecchio di illuminazione compresi tutti i suoi componenti.

Inoltre l'apparecchio sarà misurato a tensione ridotta del 10% rispetto a quella nominale (limite inferiore di variazione previsto dalla normativa) limitatamente a:

- flusso luminoso emesso;
- radianza spettrale;
- parametri elettrici di alimentazione.

I dati raccolti permettono di stimare con elevata accuratezza il comportamento reale dell'apparecchio sul campo. La temperatura ambiente presente sul campo sarà misurata, ma non è detto che corrisponderà a quella del laboratorio.

Non essendo possibile ricavare la funzione caratteristica temperatura ambiente – flusso luminoso in un ragionevole campo di possibili condizioni operative, verrà misurato l'illuminamento delle direzione $\gamma=0$ di ogni singolo apparecchio. Questo valore verrà usato come parametro di confronto sia per verificare la stabilità nel tempo dell'impianto sia per rapportare il flusso luminoso misurato in laboratorio con quello effettivamente emesso sul campo.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo, F. Serra, Misure in situ di luminanza artificiale del cielo, congresso Nazionale AIDI, Genova, 2004
- [2] P. Soardo, P. Iacomussi, G. Rossi, L. Fellin, Public lighting analysis of environmental and energy conservation, Proceedings of XXV CIE Session World congress 2003, San Diego (USA).

- [3] P. Soardo, G. Rossi, P. Iacomussi, Risparmio energetico e flusso luminoso verso l'alto, LUCE, n° 1, 2003.
- [4] P. Soardo, G. Rossi, P. Iacomussi, L. Fellin, Compatibility between public lighting and astronomical observations, Lighting Research and Technology
- [5] L. Fellin, P. Fiorentin, A. Scroccaro, P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo, Luminous Emission and Artificial Sky Luminance – The case of the North Italian Cities, Proceedings of 10th European Lighting Conference Lux Europa, 2005, Berlin (Deutschland).
- [6] Waldrum J.M., 1972, The calculation of sky haze luminance from street lighting, Lighting Research and Technology. 4: 21-26
- [7] CIE 126-1997 Guidelines for minimizing sky glow (under revision)
- [8] UNI 11248:2007, Illuminazione stradale: selezione delle categorie illuminotecniche
- [9] Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi, Mario Castellano, "The on site evaluation of performances of road lighting installations", Proceedings of Lux Europa, Berlin, 19/21-09-2005, pagg. 494-497.
- [10] IACOMUSSI, P., ROSSI, G., CASTELLANO, M., The Development of a New Mobile Photometric Laboratory, *Proceedings Congreso Internacional de Iluminación 2005.*, 12.05 – 21-05-2005 León.
- [11] UNI EN 13032-1:2005, Luce e illuminazione: Misurazione e presentazione dei dati fotometrici di lampade e apparecchi di illuminazione Parte 1: Misurazione e formato di file.
- [12] UNI 11356:2010, Luce e illuminazione: Caratterizzazione fotometrica degli apparecchi di illuminazione a LED.
- [13] UNI 11142:2004, Luce e illuminazione: Fotometri portatili: Caratteristiche prestazionali.
- [14] C. Gentile, ML Rastello, G. Rossi, P. Soardo, Luminous Flux measurement, Lighting Research and Technology 20(4),189-193, (1988).
- [15] CIE 15-2004, Colorimetry, 3rd Edition, CIE Vienna

6. SOMMARIO

1. Introduzione	1
1.1. Obiettivo della ricerca	1
2. Scelta del sito di misura e delle tipologie di impianti	1
3. Procedura di indagine sperimentale	4
4. Definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura	4
4.1. Premessa	4
4.2. Misure su città	4
4.3. Definizione delle grandezze utili ai fini della valutazione dell'inquinamento luminoso degli impianti sperimentali.	6
4.4. Definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura	7
4.5. Caratterizzazione campioni di apparecchi	9
5. Bibliografia	9
6. Sommario	10