

Università degli Studi di Roma

DOTTORATO DI RICERCA IN FISICA TECNICA AMBIENTALE
XII CICLO

L'ILLUMINAZIONE NEGLI AMBIENTI APERTI

*Affidabilità degli algoritmi di calcolo per una progettazione
razionale*

Dottorando: ing. Gianfranco Gencarelli

Docente guida: Prof. Ing. Andrea de Lieto Vollaro

Indice

Introduzione	4
Capitolo 1	
Progettazione illuminotecnica per ambienti esterni	
1.1 Finalità del progetto	8
1.2 Criteri generali di progettazione	12
1.3 Progettazione artistica e funzionale	16
1.4 Limiti e ripercussioni sulle finalità	19
1.4.1 Inquinamento luminoso e risparmio energetico: la UNI 10439	21
1.5 Soluzioni alle limitazioni	24
1.5.1 Progettazione locale ed estesa	28
1.6 Cenni ed applicativi di progettazione per esterni	30
1.6.1 Criteri per l'illuminazione della facciata	36
1.6.2 Disposizione dei proiettori	39
1.7 Considerazioni energetiche e razionali	43
1.7.1 Efficienza luminosa e resa cromatica	45
1.7.2 Vita media e decadimento del flusso luminoso	47
1.7.3 Altre misure per il risparmio energetico	49
1.7.4 Regolatori di flusso e stabilizzatori	53
Capitolo 2	
Il rilievo delle caratteristiche fotometriche ed ambientali	
2.1 La misura delle grandezze fotometriche	55
2.1.1 Principi generali per misure di illuminamento	57
2.1.2 Misure di luminanza	65
2.1.3 Misure colorimetriche	72
2.1.4 Uniformità	76
2.1.5 Misura del fattore di contrasto	78
2.1.6 Misura del fattore di riflessione	83
2.2 Cenni sulle indagini soggettive sulla qualità dell'ambiente	86
2.3 Influenza del microclima	89
2.4 Ambienti urbani periferici e centrali	93
Capitolo 3	
La simulazione nella progettazione in ambienti esterni	
3.1 Il software di simulazione illuminotecnica	95
3.2 La versione 7.1 di Lumen Micro	98
3.3 Il metodo adottato e la ricerca dell'attendibilità	100
3.3.1 Applicazione del metodo	102
3.3.2 La ricostruzione del fondo microclimatico	105
3.3.3 La ricostruzione del fondo complessivo	107

Capitolo 4

La simulazione dell'ambiente in studio

4.1	La geometria	110
4.2	La sorgente luminosa	113
4.3	Caratteristiche fotometriche del sito simulato	114

Capitolo 5

Confronto dei valori simulati e misurati

5.1	Il metodo del confronto	117
5.2	Gli errori nei risultati	122
5.2.1	Errori nell'immissione dati	125
5.2.2	Errori dell'algoritmo	129
5.3	Risultati delle simulazioni	132
5.4	Risultati dei confronti reali – simulati	152

Conclusioni

179

Bibliografia

181

INTRODUZIONE

La crescita notevole delle quantità di informazioni tecniche da gestire ha dato un notevole impulso ad una rapida introduzione di processi informatici soprattutto per quanto concerne la progettazione.

Al passo con le suddette necessità, la progettazione illuminotecnica ha ritenuto importante dotarsi di alcuni strumenti di notevole efficacia per poter far fronte al problema di progettare in tempi veloci e contemporaneamente con grande precisione.

La progettazione illuminotecnica computerizzata viene realizzata grazie a programmi che consentono di fare calcoli e verifiche su come si distribuisce la luce sia in termini di quantità che di qualità, avvalendosi di programmi di simulazione di studio.

Visualizzare in tempi brevi, con modalità semplificate e con grande precisione aree pedonali urbane, strade a traffico veicolare o altre regioni destinate al pubblico e richiedenti vincolanti requisiti illuminotecnici ed elettrici, richiede fedeltà di riproduzione dell'effetto realistico sotto entrambi i due punti di vista su accennati.

Le informazioni fornite dal progettista devono essere estremamente esatte, in quanto tali variabili incidono sull'attendibilità dell'elaborazione.

I dati tecnici riguardano l'ambiente (es: per un progetto stradale si considera la disposizione delle corsie, del marciapiede, delle aiuole spartitraffico; le caratteristiche del manto stradale); la tipologia dell'impianto (es: sapere se la tensione è stabilizzata o meno, poiché ciò incide sulla vita della lampada)

per calcolare, fin dall'inizio, il grado di deprezzamento progressivo (dovuto a fattori quali l'inquinamento ambientale) la geometria dell'impianto, la precisa disposizione, il numero degli apparecchi da installare ed il livello di illuminamento richiesto; le sorgenti luminose, considerando la potenza nominale e la potenza effettiva richiesta.

Ebbene lo scopo del presente lavoro é quello di fornire un criterio di stima dei limiti di validità di quei software destinati prevalentemente alla simulazione illuminotecnica di ambienti aperti ed in particolare di strade.

In particolare, considerando le limitazioni che provengono dall'utilizzare come dati di input per la simulazione detta quei dati fotometrici desunti in maniera approssimata da misure su campo, si affronta qui il problema dell'errore derivante dalla semplificazione di calcolo adottata da quei software destinati all'illuminazione di strade e per l'esattezza la non considerazione delle riflessioni dell'energia luminosa inviata sulle superfici e gli effetti di dette semplificazioni che si riscontrano quando detti software vengano applicati nell'illuminazione di grandi aree come strade (Illuminazione Pubblica).

Si comprende come una simulazione realizzata con le limitazioni citate divenga accettabile quanto più la regione considerata si trovi lontana da superfici verticali a lei adiacenti quali edifici (strade extraurbane), superfici per le quali risulta trascurabile o pressoché assente il contributo della radiazione riflessa.

In tutte le altre condizioni invece, la progettazione assistita dal calcolatore comporterebbe delle sovrastime, per certi versi inammissibili, dei flussi luminosi e delle relative potenze elettriche da installare.

In aggiunta c'è da dire che la normativa italiana in tema di impianti di illuminazione pubblica delle strade con traffico motorizzato, UNI 10439, non prevede vincoli miranti al risparmio energetico ed alla salvaguardia ambientale, per cui i requisiti illuminotecnici in essa riportati stabiliscono la *regola dell'arte* ai fini della realizzazione degli impianti ma non ne verificano anche la *conformità* tramite un confronto diretto con le normative equivalenti degli altri paesi della CEE. Ciò è del resto quanto appositamente stabilito dalla Direttiva 83/189/CEE (21 Giugno 86 n° 317).

Una progettazione illuminotecnica consistente nella messa in opera di quanto desunto da simulazioni effettuate con dei software che sovrastimano i flussi luminosi effettivamente necessari porterebbe, dunque, al mancato conseguimento di conformità dell'impianto d'illuminazione realizzato.

Quantunque poi tutto ciò venga esteso anche all'illuminazione artistica, si assisterebbe ad una progettazione razionale globale.

Infatti dal punto di vista artistico così come una "luce" ben applicata può creare effetti magici, un'illuminazione non adeguata o totalmente errata può dare effetti completamente opposti, fino ad essere, in senso ottico, addirittura nociva (inquinamento luminoso).

Va infatti ormai tramontando, almeno presso i progettisti più attenti, il vecchio criterio di usare "tanta luce" in maniera puntiforme per dar valore a singoli complessi architettonici, facciate, monumenti e reperti storici, superando così l'idea di disegnare l'immagine notturna della città attraverso una serie indefinita di "isole luminose" separate dal resto.

Si osserverebbe così, analogamente a quanto avviene nella conservazione dei centri storici, una ricerca di criteri d'intervento nel campo dell'illuminazione artistica miranti a dar sì risalto al singolo motivo artistico, mantenendo però la continuità della città notturna e della visione complessiva e non falsata dei suoi significati storici e culturali, il tutto contenendo i consumi energetici e limitando già all'origine della fase progettuale le cause di inquinamento luminoso.

- Capitolo 1 -

PROGETTAZIONE ILLUMINOTECNICA PER AMBIENTI ESTERNI

1.1 Finalità del progetto

L'importanza che è stata data storicamente alla definizione di progetto e delle sue singole fasi ha subito una evoluzione in parallelo con il progredire della tecnica e con la diversificazione delle destinazioni d'uso.

Il progetto illuminotecnico deve prevedere innanzitutto un'analisi dell'ambiente da illuminare e delle attività che in esso si svolgeranno: in base all'analisi vengono definiti gli obiettivi da raggiungere.

Oggi si svolgono con l'ausilio dell'illuminazione artificiale, sia per interni che per esterni, la maggior parte delle attività lavorative, sempre più diversificate.

Per questo motivo l'analisi propedeutica al progetto, non può prescindere dalle seguenti variabili:

- 1) destinazione d'uso dell'ambiente da illuminare;
- 2) tempi di permanenza delle persone;
- 3) età media degli utenti;
- 4) compiti visivi svolti nelle singole zone dell'ambiente;
- 5) *eventuali contributi di luce naturale o artificiale proveniente da altre regioni;*
- 6) *caratteristiche di illuminazione degli spazi contigui;*

- 7) caratteristiche geometriche dell'ambiente;
- 8) caratteristiche delle superfici interne di riflessione;
- 9) vincoli economici sull'installazione e sui consumi;
- 10) vincoli architettonici.

I punti 5 e 6 sono stati evidenziati poiché a questi si dedicherà particolare cura durante l'analisi del caso di studio.

In base ai risultati emersi dall'indagine vengono individuate le caratteristiche illuminotecniche dell'ambiente in termini di:

- a) illuminamento medio e coefficienti di disuniformità sulla superficie;
- b) illuminamento medio e coefficienti di disuniformità su altri piani di interesse;
- c) equilibrio delle luminanze;
- d) fattore di resa del contrasto (illuminazione artistica);
- e) tonalità della luce (temperatura di colore);
- f) resa cromatica.

Attualmente, per quel che concerne i valori d'illuminamento all'interno di un ambiente chiuso, la normativa prevede solo una verifica sui livelli d'illuminamento medio sul piano di lavoro, riguardo a cui fornisce una triade di valori per ogni destinazione d'uso. I tre valori sono relativi alla difficoltà del compito visivo e lasciano una notevole libertà di interpretazione al progettista.

Non vengono invece citati valori limiti d'illuminamento per quanto riguarda l'illuminazione di facciate di edifici, e si fa invece riferimento a valori di luminanza per quel che concerne l'illuminazione pubblica in

quanto, grandezza rappresentativa del fenomeno dell'abbagliamento, essa ha preso il ruolo di variabile guida della progettazione.

La normativa, quindi, con esclusione di progetti riferiti all'illuminazione stradale, tocca solo i punti "1" ed "a" sopracitati: tuttavia l'utilizzo del solo illuminamento come variabile di progetto e di verifica è assolutamente riduttivo ed i vincoli su di esso devono essere considerati condizioni necessarie ma non sufficienti alla definizione del comfort visivo.

1.2 Criteri generali di progettazione

Oggi il mercato ha messo a disposizione del progettista apparecchi e strumenti di misura sempre più sofisticati consentendogli di raggiungere risultati sempre più prossimi a quelli prefissati in fase di progetto.

L'attuazione dell'intero progetto si articola in più fasi, che possono essere ricondotte essenzialmente alle seguenti:

- analisi dell'ambiente da illuminare e definizione della destinazione d'uso
- definizione degli obiettivi illuminotecnici
- scelte progettuali finalizzate al raggiungimento degli obiettivi
- verifica in campo dei risultati

Ma per avere una visione quanto più completa di quelli che debbano essere i criteri di progettazione ai quali debbano attenersi il progettista attento, si può far riferimento a quelli che possono riassumere i principali parametri progettuali:

1) Completezza della progettazione

2) Accorgimenti progettuali per l'uso razionale dell'energia elettrica

1) Completezza della progettazione

Grande attenzione ed accuratezza deve essere posta nell'illuminazione delle regioni urbane, seguendo criteri che, soprattutto se applicati in città

medio-piccole e ricche di valenza artistica ed architettonica, sono particolarmente validi.

Le voci fondamentali sono:

- Elevato standard di qualità della luce
- Illuminazione dell'intero ambiente e non soltanto dei piani di calpestio
- Valorizzazione delle testimonianze storiche ed artistiche
- Contenimento dell'impatto ambientale

ELEVATO STANDARD DI QUALITÀ DELLA LUCE

Si adottano principalmente lampade ad elevata resa cromatica e adeguata tonalità di luce (vapori di alogenuri) e si controlla l'abbagliamento mediante proiettori di piccola potenza posizionati ad altezze elevate che rendono possibile calibrare la luce con precisione.

ILLUMINAZIONE DELL'INTERO AMBIENTE E NON SOLTANTO DEI PIANI DI CALPESTIO

Si illuminano anche le facciate degli edifici evitando l'isolamento delle realizzazioni storiche, che porta alla loro estrazione del contesto urbano, creando un quadro luminoso più ampio.

In genere tutte le aree del centro storico sono illuminate con lampade della stessa tonalità di luce, in modo da assicurare a tutto l'insieme un aspetto "naturale", evitando inutili sottolineature cromatiche che renderebbero artificioso l'intervento.

VALORIZZAZIONE DELLE TESTIMONIANZE STORICHE ED ARTISTICHE

I soggetti monumentali più importanti sono evidenziati con una illuminazione che conserva le forme nelle tre dimensioni, con direzioni della luce che creano angoli d'incidenza sufficienti a modellare le forme stesse ed i rilievi attraverso uno smisurato gioco di ombre.

Si evita l'illuminazione frontale che appiattisce il soggetto vanificando in gran parte gli effetti visti e sentiti dagli architetti dell'epoca e quindi il loro messaggio e significato.

CONTENIMENTO DELL'IMPATTO AMBIENTALE

Si adottano proiettori installati direttamente a muro in modo da eliminare la grande intrusività costituita normalmente da mensole e sostegni.

Gli apparecchi "in stile" esistenti, se di buona fattura, si considerano storicamente assimilati e quindi si prevede la loro manutenzione (adeguamento alla classe ed eventuale verniciatura), oltre alla installazione di lampade a tonalità di luce compatibile e non abbaglianti.

Ovviamente i livelli di illuminamento delle strade con tali apparecchi verranno adeguati a quelli di progetto, mediante proiettori senza particolari pretese stilistiche ed in posizione discosta, in genere verso l'alto.

2) Accorgimenti progettuali per l'uso razionale dell'energia elettrica

I principali accorgimenti nell'illuminazione con il detto fine sono:

- adottare lampade a scarica a lunga durata ed alta efficienza, compatibilmente con le esigenze primarie di comfort visivo;
- scegliere apparecchi ad alto rendimento, evitando quindi l'installazione di lanterne e globi;
- adottare la tecnica della proiezione, che consente di distribuire il flusso luminoso delle lampade sulle superfici interessate, senza disperdere la luce in direzioni non desiderate, provocando abbagliamento ed inquinamento luminoso del cielo nonché spreco di energia elettrica;
- ove predominano lampade a vapori di alogenuri, installare regolatori di tensione per consentire anche di ridurre il flusso luminoso delle lampade dopo mezzanotte, con conseguente risparmio dei consumi.

Del resto la stabilizzazione della tensione consente l'eliminazione dei consumi superflui, dovuti alla elevata tensione della rete di distribuzione, nelle ore notturne.

1.3 Progettazione artistica e funzionale

I temi attuali di illuminazione architettonica, di effetto, fino ad arrivare al concetto più complesso di arredo del centro, in particolare storico, hanno visto un profondo e crescente interesse in tutti i principali operatori e responsabili del settore a seguito di una nuova sensibilità delle Amministrazioni per la qualità della vita collettiva e dello spazio pubblico.

Oltre che ai noti scopi funzionali (visione degli ostacoli, orientamento, sicurezza) “la luce” assume sempre più un ruolo fondamentale nell’identità stessa del centro urbano e nella vita dei residenti, contribuendo a creare atmosfera, comfort ed a rendere viva la città.

La tecnica dell’illuminazione artificiale da semplice sistema di sostituzione della naturale, si è assunta un compito di strategia emotiva e di valorizzazione di determinati contesti architettonici che, invece, durante il giorno restano spesso ignorati (la luce naturale è uguale ovunque).

Una città con una buona illuminazione delle sue zone più significative esalta alla vista di tutti le proprie bellezze, concetto questo che si applica ad ogni contesto urbano ed in special modo alle *città d’arte* in cui un’illuminazione di effetto può dare risalto ad opere ed edifici di maggior richiamo.

È per l'appunto per la cura di questi aspetti che questo tipo di illuminazione dev'essere studiata ed applicata attentamente, con approcci mentali e professionali diversi rispetto all'illuminazione tradizionale.

Infatti così come una "luce" ben applicata può creare effetti magici, un'illuminazione non adeguata o totalmente errata può dare effetti completamente opposti, fino ad essere, in senso ottico, addirittura nociva (inquinamento luminoso).

Va infatti ormai tramontando, almeno presso i progettisti più attenti, il vecchio criterio di usare "tanta luce" in maniera puntiforme per dar valore a singoli complessi architettonici, facciate, monumenti e reperti storici, superando così l'idea di disegnare l'immagine notturna della città attraverso una serie indefinita di "isole luminose" separate dal resto.

Si osserva invece, analogamente a quanto avviene nella conservazione dei centri storici, una ricerca di criteri d'intervento nel campo dell'illuminazione artistica miranti a dar sì risalto al singolo motivo artistico, mantenendo però la continuità della città notturna e della visione complessiva e non falsata dei suoi significati storici e culturali.

Può essere in tal senso pensarsi ad una *ricomposizione della visione di sistemi ambientali complessi* dei quali, per quanto riguarda la città antica, si è smarrita la memoria in seguito alle contaminazioni del nostro tempo. Nell'illuminazione architettonica non esistono regole e metodi validi per tutte le applicazioni, ma ogni motivo artistico deve avere una propria soluzione con una sorta di unicità, cosa che costituisce del resto l'essenza di ogni opera d'arte.

Ma al significato ed alle necessità di valorizzazione artistica sopra accennate si affiancano quelle normativo-progettuali riguardo l'illuminazione pubblica funzionale (stradale, di sicurezza).

L'obiettivo è quindi quello di creare un'immagine coordinata ed integrata della città, curando in particolar modo quelle zone artisticamente significative, come il centro storico, in cui tale bisogno diviene un requisito indispensabile per il visitatore che vuol vivere la notte fondendosi col paesaggio stesso che lo ospita.

Questo obiettivo può riassumersi nei seguenti punti:

- definire i criteri progettuali e normativi necessari al controllo ed al coordinamento operativo degli interventi di illuminazione pubblica;
- fornire gli elementi sia tecnici che storico-culturali necessari alla integrazione tra l'illuminazione funzionale (stradale) e quella artistica;
- definire interamente i passi di progetto per permettere una valutazione preventiva e soprattutto precisa del costo effettivo delle opere previste in un simile piano.

1.4 Limiti e loro ripercussioni sulle finalità della progettazione

La crescente attenzione che molti progettisti illuminotecnici stanno rivolgendo nei confronti di una sempre maggiore esattezza della quantità di luce da inviare sui siti interessati, riconduce alla considerazione di due parametri essenziali a tale scopo:

- l'analisi luminosa del contesto in cui è collocato il sito
- l'attendibilità del software di calcolo

Lo scopo del presente lavoro é quello di fornire, relativamente al contesto illuminotecnico in cui si applica lo studio, un criterio di stima dei limiti di validità di quei softwares designati alla progettazione di esterni, e tra questi soprattutto quelli che, destinati prevalentemente alla simulazione illuminotecnica di strade, vengano utilizzati nell'ottica più ampia di illuminazione di edifici, monumenti e di aree esterne in genere.

L'importanza di quanto detto risiede nel fatto che l'errore percentuale dei risultati che si riscontra è maggiore qualora softwares destinati a progettazioni particolari (strade) vengano utilizzati per applicazioni più generali.

In particolare, riprendendo in considerazione le limitazioni che provengono dall'immissione come dati di input di quei dati fotometrici desunti in maniera approssimata da misure su campo, si affronta qui il problema dell'errore derivante dalla *semplificazione di calcolo* adottata da quei softwares destinati all'illuminazione di strade e per l'esattezza il non considerare il contributo della radiazione riflessa.

Si comprende come una simulazione realizzata con le limitazioni citate divenga accettabile solo nei casi di illuminazione di superfici per le quali questo contributo risulta trascurabile o pressoché assente.

In tutte le altre condizioni invece, la progettazione assistita dal calcolatore comporterebbe delle sovrastime, per certi versi inammissibili, dei flussi luminosi e delle relative potenze elettriche da installare.

1.4.1 Inquinamento luminoso e risparmio energetico: la UNI 10439

Particolare attenzione riveste del resto l'illuminazione delle strade extraurbane, per le quali, valendo la normativa UNI 10439, è ancor più vincolante il rispetto dei requisiti illuminotecnici richiesti.

Anzi c'è da dire a tal proposito che anche se la detta normativa non prevede vincoli miranti al risparmio energetico ed alla salvaguardia ambientale, questi due sono tuttavia parametri da non trascurare nelle fasi della progettazione.

E' bene a tal proposito spendere due parole che possano in qualche maniera mettere meglio in rilievo l'importanza di quanto appena evidenziato.

L'attuale normativa italiana vigente in tema di impianti di illuminazione pubblica delle strade con traffico motorizzato, la UNI 10439, presenta dei limiti evidenti derivanti dal non adeguamento delle prestazioni illuminotecniche al nuovo codice della strada ed alla eccessiva rigidità riscontrata nell'applicazione delle normative stesse.

Le conseguenze, di natura economica e di impatto ambientale luminoso, stanno spingendo i progettisti più attenti ad un diverso approccio tecnico-economico di progettazione.

Questi, tenendo conto dei requisiti illuminotecnici riportati nella UNI 10439 che stabiliscono la *regola dell'arte* ai fini della realizzazione degli

impianti, ne verifichi anche la *conformità* tramite un confronto diretto con le normative equivalenti degli altri paesi della CEE, così come stabilito da una apposita Direttiva CEE.

Ebbene una progettazione illuminotecnica consistente nella messa in opera di quanto desunto da simulazioni effettuate con software dotati delle ormai note limitazioni, porterebbe a quelle inevitabili sovrastime dei flussi luminosi effettivamente necessari.

Le conseguenze sarebbero quelle di mancato conseguimento di conformità dell'impianto d'illuminazione realizzato.

Il presente lavoro quindi, oltre a quantificare i margini di sovrastima di un software di simulazione per esterni, si propone altresì di poter fornire uno strumento indispensabile a chi si proponga di rappresentare in maniera simulata un confronto tra una progettazione che risponda ai soli requisiti della UNI 10439 e la stessa secondo un criterio che tenga però conto di parametri più vincolanti.

Come esempio potrebbe esser preso in considerazione quanto riportato nelle corrispondenti normative tedesche (DIN), le quali contemplan per l'appunto delle limitazioni all'inquinamento luminoso ed al risparmio energetico di cui si deve tener conto in fase di progettazione.

Si comprende da quanto detto come, se già in una progettazione illuminotecnica stradale l'errore derivante dalla detta approssimazione può divenire rilevante, ancor più penalizzante possa essere la stessa quando il software identificato in maniera generale come valido per

progettazioni di esterni venga poi effettivamente utilizzato per applicazioni più generali.

1.5 Soluzioni alle limitazioni della progettazione tradizionale

Negli ultimi anni di fine millennio si è affacciato ed è sempre più tenuto in gran considerazione presso gli uffici tecnici delle amministrazioni comunali un nuovo strumento: il Piano Regolatore Illuminotecnico Comunale (P.R.I.C.).

Il fine principale del P.R.I.C. è quello di sviluppare un nuovo sforzo atto al miglioramento dell'illuminazione delle vie, delle piazze, palazzi e chiese e di tutti quei luoghi di particolare valenza ambientale di cui sono particolarmente ricche le città italiane.

Il Piano Regolatore dell'Illuminazione Comunale (P.R.I.C.) rappresenta lo strumento indispensabile per la pianificazione urbana la cui adozione da parte dell'Amministrazione Comunale consente al nostro Paese di allinearsi agli standard qualitativi degli altri Paesi europei, nel rispetto dell'ambiente, della qualità della vita e dell'uso razionale dell'energia (risparmio energetico).

Si dà molta importanza ad esempio alle abitazioni che hanno conservato immutate le caratteristiche architettoniche locali e tutti gli elementi architettonici di pregio che è bene far rivivere anche di notte.

Nella realizzazione del Piano è stato tenuto in gran considerazione il concetto dell'inquinamento luminoso.

Oltre alla forma nota a tutti di inquinamento ambientale, quello atmosferico ed acustico, ne esiste un'altra meno nota legata all'illuminazione artificiale, le cui conseguenze sono l'alterazione ambientale *con aumento della luminosità del fondo del cielo*.

Questa che oltre a non permettere l'osservazione del firmamento e creare danno alla ricerca astronomica, su alcune specie animali provoca profonde alterazioni che ne compromettono la sopravvivenza, la qual cosa è maggiormente incidente presso quei Comuni immersi in contesti naturali.

L'emissione di radiazioni luminose verso l'alto o oltre un certo limite laterale determina un illuminamento in zone che oltre a non aumentare il benessere di colui che usufruisce del servizio, può produrre fastidiose condizioni di abbagliamento e comporta un dispendio dei consumi energetici, con evidente danno economico.

Ma il Piano Regolatore di illuminazione Comunale non è una assoluta novità.

Esperienze significative in tal senso sono state già avviate con successo in alcune città di grandi dimensioni (Torino e Milano) e di medie dimensioni (Udine, Bergamo, Foligno).

Si tratta di iniziative di programmazione che hanno anticipato una esigenza, spesso legata alle modifiche della circolazione delle vetture nonché al rinnovo degli impianti obsoleti.

Questa esigenza diventa oggi ancor più impellente se consideriamo alcuni elementi che hanno dato luogo a deliberazioni nazionali e riferimenti normativi che richiedono alle Amministrazioni Comunali l'adozione di nuovi strumenti di programmazione.

Si pensi ad esempio all'approvazione del Nuovo Codice della Strada (1995) che impone ai comuni con più di 30.000 abitanti la redazione dei Piani Urbani del Traffico e all'emanazione della norma UNI 10439 "Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato" (1995).

È evidente che le indicazioni e le prescrizioni contenute in questi due documenti non solo condizionano pesantemente i parametri da adottare per la progettazione di nuovi impianti di illuminazione, ma giustificano anche la necessità di elaborare un progetto unitario di illuminazione, sottoponendo a verifica le aree, le vie, le piazze, ecc. attualmente già illuminate.

Ecco, dunque, il naturale passaggio a Piano Regolatore di Illuminazione Comunale, che oltrepassa i limiti di strumento esclusivamente tecnico, che fissa solo i parametri tecnologici e illuminotecnici, per diventare anche un programma architettonico-urbanistico, oltre che illuminotecnico.

Essenzialmente il PRIC si suddivide in due parti: la prima contiene l'analisi dello stato di fatto degli impianti, la seconda illustra che cosa è necessario fare per modificare lo stato attuale in modo coordinato e integrato al fine di pervenire ad una situazione finale coerente con la normativa vigente e con le esigenze di sicurezza e vivibilità richieste da tutta la cittadinanza.

Per promuovere l'adozione del PRIC in molte città e Comuni italiani occorrerà presentare studi e progetti finalizzati alla sua predisposizione, studi che potranno costituire utili riferimenti non solo per gli studiosi

della disciplina illuminotecnica, ma anche per gli Amministratori Comunali e i responsabili della gestione del territorio.

1.5.1 Progettazione locale ed estesa

Il criterio di intervenire, per sistemi estesi e continui caratterizzati da livelli differenti di complessità, parte dall'ipotesi opposta che la città notturna possiede una propria autonomia di immagine e, soprattutto, proprie strutture di spazio.

Strutture omologhe o coincidenti con quelle della città solare ma costruite con materiali diversi, più labili ed effimeri: strutture spaziali e simboliche latenti che, grazie alla luce artificiale, si offrono alla percezione dei visitatori rendendo possibili strategie interpretative ed emotive impossibili durante il giorno.

Può essere così ricomposta la visione, ma sarebbe meglio dire la "lettura", di unità, di sequenze e di sistemi ambientali complessi.

Diviene in tal modo appropriato parlare di illuminazione urbana.

Con questo termine si può infatti evidenziare soprattutto la volontà di integrare l'illuminazione puntiforme, cosiddetta artistica, o "di accento" in una strategia di interventi che proceda per sistemi urbani unitari.

Ciò presuppone una vera e propria regia dell'illuminazione che tenga conto non soltanto dei singoli punti emergenti ma anche dei diversi contesti ambientali nei quali questi sono collocati.

L'obiettivo che si vuole raggiungere è quello di una immagine coordinata della città, in cui la qualità della luce serve a far leggere il sistema delle gerarchie e delle differenze sulle quali si basa l'identità dei luoghi.

Di fronte al problema dell'illuminazione notturna di città a forte contenuto artistico, è sempre presente una doppia tentazione

Da un lato, quella di fare il meno possibile, nella convinzione provinciale e popolare che l'eccezionalità incomparabile della città per antonomasia basti a sé stessa, dall'altro lato la tentazione opposta, che è quella di premere sul tasto del gigantismo storico per fare il massimo possibile, e anche un po' di più, nella convinzione altrettanto provinciale, ma assorbita in giro per il mondo, che l'importanza delle cose sia proporzionale al numero dei decibel e dei lux impiegati per la loro comunicazione.

1.6 Cenni ed applicativi di progettazione per esterni

Spesso una buona tecnica progettuale ed una oculata scelta dei materiali impiegati non garantiscono la riuscita di un impianto. È indispensabile che gli elementi sui quali si decide di intervenire presentino un certo interesse per il loro carattere architettonico.

È dunque necessario selezionare con criterio i soggetti da illuminare, perché la luce contribuisce a svelare la bellezza ma non la crea.

I proiettori, tramite i quali si voglia illuminare il soggetto in considerazione, possono essere installati nelle vicinanze del soggetto o direttamente sul soggetto stesso.

Il posizionamento e la scelta del tipo di apparecchio devono tenere conto di numerosi fattori, tra i quali: tipo e colore della superficie da illuminare, volumi da evidenziare, localizzazione dei punti di osservazione, distanza tra proiettore e soggetto illuminato, ambiente luminoso circostante, effetto desiderato.

Se i castelli, le chiese o i monumenti in genere presentano un interesse evidente, è pur vero che esistono soggetti più modesti che giustificano pienamente una specifica valorizzazione tramite la luce.

Dunque dal centro di una piazza in una città o da un punto che domina un centro urbano, un osservatore può contemplare molti soggetti illuminati: se si vuole quindi stabilire o ricreare una gerarchia dei valori, ossia mettere maggiormente in risalto un elemento piuttosto che un altro, occorre creare una opportuna scala di valori di illuminamento (o di luminanze).

È preferibile tuttavia evitare “l’isolamento” dell’elemento, raccordandolo ad altri elementi o realizzando un quadro luminoso più ampio di modo da non estrarre il soggetto dal suo contesto. Nelle zone urbane la funzione di “raccordo” è svolta sovente dall’illuminazione pubblica. Però talvolta la vicinanza di un incrocio, di un complesso industriale o di una stazione ferroviaria altera la percezione dell’oggetto illuminato, a tal punto da imporre l’adozione di valori di illuminamento elevati.

Se si vuole riscontrare un buon impatto visivo occorre far uso della luce con estrema precisione, illuminando i soggetti prescelti evitando il più possibile che essa si disperda in altre direzioni.

Non è raro trovarsi di fronte a realizzazioni che presentano uno sgradevole “effetto alone”, un vero e proprio inquinamento luminoso generato da proiettori il cui controllo del fascio è costruttivamente mal realizzato oppure le cui prestazioni fotometriche non sono compatibili con l’uso previsto.

L’effetto si traduce nella presenza di una nube di luce intorno all’elemento illuminato: questo effetto non voluto risulta amplificato in presenza di foschia. Una scelta errata dei proiettori riduce inoltre il fattore di utilizzazione dell’impianto, rendendolo oltretutto poco razionale dal punto di vista energetico.

Da quanto finora esposto si evince quindi che una scelta oculata degli apparecchi di illuminazione è la condizione prima per realizzare un buon impianto ed evitare alcuni effetti indesiderati quali la scarsa incisività, l’inquinamento luminoso e lo spreco di energia elettrica.

Sovente un soggetto illuminato si presenta come una successione più o meno frequente di parti rischiarate e di zone d'ombra. Per evidenziare i differenti piani e volumi di un soggetto costruito o di un luogo naturale l'illuminotecnica deve osservare delle regole ben precise.

La presenza delle ombre consente di evidenziare i rilievi di un soggetto, e, se ha tre dimensioni, di percepirne la profondità.

Un oggetto è individuato non solo in base alla sua larghezza ed alla sua altezza ma anche in base alla sua forma e alla distanza che lo separa da noi.

Il nostro sistema visivo riceve le immagini attraverso gli occhi, i quali ci danno immediatamente il senso della distanza e della profondità perché inviano al cervello due immagini differenti, che risultano tali in conseguenza del fatto che sono percepite con due angolazioni leggermente diverse. La diversità di queste due immagini è tanto più evidente quanto minore è la distanza esistente tra l'osservatore e l'oggetto.

Il fenomeno di cui sopra è chiamato "effetto stereoscopico" ed è principalmente grazie ad esso che avviene la ricostruzione tridimensionale: le due immagini sono ricevute quasi simultaneamente, il cervello valuta le differenze e le pone in relazione alla distanza esistente tra i due occhi e alle convergenze che essi devono assumere per focalizzare l'osservazione sull'oggetto.

Per creare le ombre è conveniente illuminare con fasci di luce non diretti, perpendicolarmente all'elemento illuminato. In caso contrario non si creano ombre, ed il risultato sarà quello di “appiattare” la superficie.

Questo avviene perché non si ha la giusta sensazione di profondità: come già detto, infatti, maggiore è la diversità fra le due immagini che ogni occhio percepisce, maggiore sarà l'effetto fra le due immagini che ogni occhio percepisce, maggiore sarà l'effetto tridimensionale registrato dal cervello.

Per meglio chiarire quanto esposto facciamo un esempio. Per uno sciatore è molto difficile percepire i rilievi e le variazioni altimetriche di una pista innevata in una giornata di cielo completamente coperto, che non presenta cioè nessuna componente solare diretta. Come tutti sanno, infatti, i raggi solari diretti raggiungono il nostro pianeta con angoli di incidenza capaci di creare ombre più o meno marcate e la loro assenza su una superficie liscia ed uniforme, quale è una pista di sci, si traduce in una totale assenza di ombre e quindi in una mancata percezione dei rilievi.

A riprova di quanto detto ricordiamo che negli antichi templi greci era utilizzata la tecnica del bassorilievo, un tipo di scultura con rilievi poco pronunciati ma capaci di creare i giusti equilibri di luce ed ombra in virtù della grande disponibilità di luce solare diretta. In altri paesi dell'Europa del Nord, invece, dove è quasi sempre presente un cielo totalmente o prevalentemente coperto, le sculture presentano rilievi più marcati: le cattedrali gotiche costituiscono un esempio eloquente.

Al fine di creare una giusta successione di ombre, deve necessariamente esistere un angolo tra la direzione di osservazione e quella di incidenza

del flusso luminoso. Il valore minimo teorico dell'angolo formato dalla direzione del flusso luminoso con la direzione di osservazione è 45° questo angolo può subire incrementi notevoli quando si deve illuminare un soggetto che presenta rilievi poco pronunciati.

Sono comunque da evitare:

- angoli di incidenza della luce che diano luogo a riflessioni speculari secondo direzioni coincidenti con le direzioni di osservazione previste, al fine di evitare l'abbagliamento indiretto dell'osservatore;
- angoli d'incidenza di valore troppo elevato rispetto alla normale alla superficie. Come è noto, mantenendo inalterati tutti gli altri parametri, all'aumentare dell'angolo d'incidenza il valore di illuminamento decresce sensibilmente; il che si traduce in una penalizzazione del rendimento globale dell'impianto (legge del coseno di Lambert).

Per soggetti osservabili da più punti risulta comunque impossibile mantenere (sempre) un angolo di almeno 45° : in questo caso si deve scegliere la posizione di osservazione principale e progettare l'impianto considerando la posizione privilegiata.

Di conseguenza, tutti i fasci luminosi che illuminano i diversi soggetti (esempio facciate, statue, ecc.) e che vengono percepiti simultaneamente, devono avere lo stesso verso rispetto alla direzione di osservazione principale e questo per evitare che le sorgenti luminose entrino nel campo visivo, offrendo all'osservatore dei punti a luminanza elevata rispetto a quella della scena principale.

L'inconveniente non si presenta se gli apparecchi di illuminazione risultano comunque nascosti alla vista. In ogni caso non è consigliabile,

anche se i centri luminosi sono nascosti e quindi non si manifestano gli effetti negativi sopraesposti, illuminare un soggetto (ad esempio la facciata di un edificio) ricorrendo a fasci di luce che abbiano un verso diverso rispetto alla direzione di osservazione principale.

Così facendo infatti, le ombre saranno presenti in direzioni diverse ed in numero proporzionale ai diversi fasci luminosi, con il risultato di creare un effetto poco naturale che potrebbe compromettere una neutra percezione del manufatto.

Altra configurazione da evitare è quella in cui due proiettori identici, orientati simmetricamente rispetto alla normale della superficie, sopprimono le ombre (l'uno annulla le ombre create dall'altro e viceversa) inficiando la percezione dei rilievi.

1.6.1 Criteri per l'illuminazione delle facciate

Nell'illuminazione di facciate di edifici è sempre possibile, qualsiasi sia la loro forma, ricondurre le singole facciate ad aree più o meno regolari ed eseguire i calcoli illuminotecnici per ciascuna di esse, naturalmente mantenendo i voluti equilibri.

Le facciate possono essere illuminate mediante proiettori installati a distanza opportuna (ad esempio sulle costruzioni presenti nelle vicinanze, su pali, ecc.) oppure con apparecchi collocati sulla stessa costruzione, magari sfruttando la presenza di oggetti, cornicioni, finestre, ecc.

Nei casi in cui l'edificio presenta una copertura molto pronunciata, i proiettori possono essere collocati al di sotto di essa e risultare così poco intrusivi; quando le facciate sono prive di ogni possibile punto di ancoraggio, si può ricorrere all'uso di staffe posizionate a sbalzo in punti convenienti.

Quest'ultima soluzione non è certamente molto elegante da un punto di vista estetico, e l'effetto finale quasi sempre discutibile in quanto (a meno di non installare staffe molto lunghe) i proiettori non riescono a coprire uniformemente il prospetto, generando delle "macchie" di luce molto intense in prossimità del punto di installazione.

Una migliore alternativa consiste nell'impiego di apparecchi dotati di sistemi ottici più idonei e direttamente installabili sulla parete della costruzione. Per illuminare in modo radente, si schermano i proiettori in modo da far "lavorare" solo metà ottica, evitando così di creare un eccesso di illuminamento in prossimità del punto di installazione.

Purtroppo questa soluzione è poco razionale dal punto di vista energetico, dal momento che molto flusso generato viene bloccato nel proiettore senza poter fuoriuscire da esso.

Tutte le costruzioni possono essere considerate come un insieme di forme geometriche semplici. Le installazioni “tipo” si devono riferire alle forme geometriche più diffuse in architettura. Le direttive fornite devono essere adattate ad ogni situazione particolare, tenendo conto della direzione e della distanza di osservazione, delle dimensioni e dello stato del soggetto, della reale possibilità di installazione degli apparecchi nei punti desiderati.

Per ciò che concerne le prestazioni colorimetriche delle lampade, il progettista può contare sulla disponibilità di una tipologia di sorgenti molto ampia. In teoria, tutte le sorgenti luminose possono essere impiegate per lo scopo. Una pratica molto ricorrente è quella di impiegare per uno stesso impianto sorgenti aventi temperatura e resa del colore differenti: ad esempio, per l'illuminazione di una facciata, si ricorre alla miscelazione “sodio-alogenuri” dosando opportunamente i contributi apportati da ciascun tipo di sorgente.

Usando questa tecnica, i risultati migliori si ottengono quando le distanze proiettore-soggetto sono consistenti e quando si impiegano apparecchi a fascio largo, e ciò per consentire una miscelazione omogenea dei flussi di diverso “colore”.

Altra condizione favorevole alla tecnica della miscelazione è la non visibilità dei punti dai quali si dipartono i fasci, e cioè il completo

celamento dei proiettori rispetto alle direzioni di osservazione preferenziali.

L'impiego di questa tecnica trova una giustificazione nel fatto che, se si escludono le sorgenti a filamento, non esiste un tipo di sorgente a scarica in grado di conferire la giusta morbidezza ad alcune particolari superfici: nel caso in cui è giustificato l'impiego di potenze unitarie modeste, si può fare uso di lampade ad alogenuri a tonalità calda o al sodio a luce bianca.

I costruttori di lampade, a tal proposito, assicurano che queste lampade saranno disponibili in versioni con potenze unitarie maggiori entro i prossimi due-tre anni.

L'impiego di schermi riduce il rendimento ottico e altera la ripartizione delle intensità luminose del proiettore: è consigliabile pertanto ricorrere al loro uso solo nei casi effettivamente necessari.

1.6.2 Disposizioni ottimali dei proiettori

Uno dei fattori da non sottovalutare ai fini di una progettazione attenta oltre a quelli fotometrici è quello estetico.

L'impatto ambientale ad esempio, generato dall'impianto nelle ore diurne, l'abbagliamento diretto presente in alcune direzioni, la scelta delle postazioni conseguente anche alla facilità di accesso per l'installazione e la manutenzione delle apparecchiature, ecc.

È evidente, pertanto, che non è sempre possibile posizionare gli apparecchi di illuminazione laddove la buona tecnica imporrebbe.

Nelle zone urbane è molto difficile installare i proiettori nei punti più consoni e spesso la loro presenza viene giudicata intrusiva più di quanto non lo sia effettivamente.

L'intento primario del progettista deve quindi essere quello di evitare che di giorno gli apparecchi alterino esteticamente l'ambiente nel quale sono inseriti; lo stesso dicasi per gli ausiliari elettrici, i pali ed i sostegni metallici in genere.

È buona regola dimensionare la carpenteria nel modo più esatto possibile, evitando l'utilizzo di strutture sovradimensionate non visibili dai punti di osservazione consueti il problema non sussiste.

I sostegni devono comunque essere sempre dimensionati in modo da resistere al carico della neve sull'apparecchio ed alla spinta del vento secondo le Norme UNI/EN.

Non è raccomandabile la creazione di batterie comprendenti più proiettori disposti sulla stessa struttura, poiché queste generano un volume apparente che non passa certo inosservato, praticamente “una parete” fittizia.

Se per forza di cose i proiettori devono essere installati in uno stesso punto, è talvolta più conveniente fissarli con strutture tra loro separate, magari mantenendo tra esse una distanza verticale oppure orizzontale opportuna.

Spesso è raccomandato l'utilizzo di carpenterie in acciaio inox, anche se questo tipo di materiale presenta l'inconveniente di essere molto brillante sotto l'azione della luce diurna, rendendo così la struttura facilmente notabile.

Una valida alternativa è costituita dall'acciaio zincato (meglio se a caldo). Qualora poi si volesse mimetizzare la presenza diurna, si può ricorrere alla verniciatura delle strutture: in genere la carpenteria metallica è sempre verniciata con colori poco brillanti.

Talvolta è indispensabile verniciare gli stessi proiettori, per meglio inserirli nella cromia dell'ambiente: quando si ricorre a questi accorgimenti si raccomanda l'utilizzo di vernici epossidiche resistenti al calore (si può richiedere questo trattamento speciale alle stesse ditte costruttrici).

Nei casi in cui si voglia illuminare un soggetto dal basso occorre predisporre delle “buche calpestabili” nelle quali inserire i proiettori.

Le buche sono dei veri e propri pozzetti in cemento, chiusi con vetri antisfondamento o con grate. Esse possono contenere anche le unità elettriche ausiliarie ed in tal caso è necessario renderle stagne. Una soluzione più economica è quella del “gabbiotto” di cemento, chiuso con un vetro o, eventualmente, con una grata in acciaio: quest’ultima soluzione non garantisce l’ermeticità e viene sovente adottata per evitare l’impiego di paline.

Il gabbiotto garantisce una valida protezione sia contro gli atti vandalici sia dal contatto accidentale, nascondendo l’oggetto tecnico e costituendo un elemento scarsamente intrusivo.

I sostegni possono altresì trovar posto sulle facciate degli edifici da illuminare (dietro a cespugli, sui tetti, sulle terrazze o sulle pareti degli edifici adiacenti) su pali appositamente messi in opera oppure sui pali della pubblica illuminazione.

Se l’edificio interessato si trova lungo una strada che presenta una notevole densità di traffico, è indispensabile schermare i proiettori in direzione degli automobilisti per evitare che essi possano in qualche modo rimanere abbagliati.

Il fenomeno dell’abbagliamento diretto può inoltre interessare gli occupanti delle abitazioni vicine ed i pedoni che circolano in prossimità del soggetto illuminato.

Per eliminare i rischi derivanti da questo fenomeno, può essere necessaria talvolta una sostanziale modifica all’installazione: resta comunque il fatto

che l'assenza di abbagliamento costituisce una nota qualitativa dell'impianto, forse la prima.

Dopo aver fissato i proiettori ed aver dato tensione all'impianto occorre procedere alla loro sistemazione per ottenere l'effetto migliore: in seguito saranno necessari interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, ragione per cui l'accesso ai luoghi prescelti deve risultare il più agevole ed economico possibile. Un accesso difficile può essere una delle cause di una manutenzione poco efficace, dalla quale deriva un rapido degrado dell'impianto.

1.7 Considerazioni energetiche e razionali

Da quanto finora esposto si evince l'importanza che va attribuita all'utilizzo dei Piani Regolatori di Illuminazione Comunali (P.R.I.C.) ai fini di una progettazione razionale.

A tal proposito si vuole citare il caso della Regione Veneto, ove nel maggio 1997 la Presidenza del Consiglio Regionale ha approvato la proposta di legge n° 85, la quale detta le misure in tema di risparmio energetico e di lotta all'inquinamento luminoso.

Qui le soluzioni progettuali proposte dal Piano della Luce prendono a riferimento la sopracitata legge provvedendo quindi a:

- classificare tutto il territorio nazionale in zone omogenee illuminotecniche;
- assegnando ad ognuna di esse il giusto livello di illuminamento raccomandato dalle normative di riferimento vigenti;
- proponendo apparecchi illuminanti con la caratteristica principale di una limitata emissione laterale di radiazioni luminose con la conseguente limitazione dell'inquinamento luminoso, uso di lampade caratterizzate da una elevata efficienza luminosa e adottando apparecchiature computerizzate che consentano di ridurre la potenza assorbita dagli impianti per il contenimento dei costi energetici.

È noto che le strade interessate dalle installazioni sono classificate secondo la norma UNI 10439 del 12/10/1995 nelle seguenti categorie:

Gli impianti installati sul territorio comunale interessato stessa zona dovranno avere caratteristiche costruttive e funzionali tali da assicurare le prescrizioni richieste assegnate in base alla classificazione effettuata.

Per quanto riguarda la sorgente luminosa, che è uno dei componenti elettrici che determina il rendimento dell'impianto, è bene valutarne le caratteristiche quali l'indice di resa cromatica, la temperatura di colore e l'efficienza luminosa.

Le lampade con le caratteristiche suesposte e previste nel Piano della Luce, sono le lampade a scarica a vapori di sodio alta pressione: queste lampade sono caratterizzate da una gradevole tonalità di luce di colore giallo oro e da una elevata efficienza luminosa.

Oltretutto, per l'illuminazione delle zone a prevalente traffico pedonale e in tutte quelle zone ove sia richiesta una resa dei colori che garantisca il rispetto della tonalità dei colori naturali, sono già in commercio lampade a vapori di sodio ad altissima pressione le quali, pur avendo tutte le caratteristiche delle lampade a vapori di sodio, garantiscono un'ottima resa dei colori ed una tonalità di luce bianca calda che richiama il colore delle lampade ad incandescenza.

1.7.1 Efficienza luminosa e resa cromatica

L'efficienza luminosa è il rapporto tra la quantità di flusso luminoso emesso dalla lampada e la potenza elettrica da essa assorbita per generarla.

La quantità di flusso luminoso è legata alla radiazione energetica [W] emessa secondo quanto stabilito dalla curva di visibilità dell'osservatore fotometrico focalizzato C.I.E. 1931, che definisce la sensibilità relativa dell'occhio umano (fattore spettrale di visibilità $V(\lambda)$) in funzione della distribuzione spettrale energetica. I lumen sono quindi Watt "visibili", cioè i Watt pesati secondo la curva di visibilità dell'occhio umano.

Due sorgenti possono avere la stessa energia radiante nel campo del visibile (380-780 nm) ma emettere una quantità di flusso luminoso diversa (ed eventualmente presentare caratteristiche cromatiche diverse), in virtù del fatto che le radiazioni energetiche sono emesse dalle due sorgenti in regioni differenti dello spettro.

Ai fini del calcolo dell'efficienza sono considerati solo i Watt elettrici assorbiti dalla lampada; le perdite provocate dall'eventuale presenza nel circuito di ausiliari elettrici non sono considerate (possono invece essere portate in conto nel calcolo dell'efficienza globale del sistema o dell'impianto).

Uno stesso tipo di lampada presenta diversi valori di efficienza luminosa in funzione delle diverse esecuzioni riguardo alla potenza elettrica assorbita: questa assenza di proporzionalità per lampade che sfruttano lo

stesso principio di funzionamento, ma presentano potenze nominali diverse, è frutto di limitazioni di carattere tecnologico.

L'efficienza delle sorgenti luminose muta nel corso della loro vita: ciò significa che, pur assorbendo la stessa potenza elettrica, non viene più emessa la quantità nominale di flusso luminoso. Questo fenomeno di decadimento del flusso è influenzato dalle condizioni operative e dalle caratteristiche intrinseche della sorgente. Oltreché da un naturale processo di invecchiamento, il decadimento del flusso luminoso è influenzato da altri fattori.

L'invecchiamento della lampada provoca anche una variazione delle proprietà cromatiche della sorgente.

Solitamente, ad un'efficienza luminosa non particolarmente elevata corrispondono buone proprietà cromatiche. Per alcune lampade a scarica in gas, ad esempio, l'aumento della pressione interna del tubo di scarica provoca l'emissione di ulteriori linee di spettro, e quindi un miglioramento della resa cromatica, un innalzamento della temperatura isoprossimale di colore e una riduzione dell'efficienza luminosa.

1.7.2 Vita media e decadimento del flusso luminoso

La vita di una lampada non è prevedibile, dal momento che questa è funzione di molti fattori: senza dubbio condizioni sfavorevoli di funzionamento ne riducono la durata.

I fattori che maggiormente influenzano la vita di una sorgente luminosa sono in pratica gli stessi che influenzano il decadimento del flusso nel tempo: la temperatura ambiente, le variazioni dal valore nominale della tensione e della frequenza di alimentazione, il numero e la frequenza di accensioni, il tipo di alimentatore e accenditore usati nel caso si tratti di lampada a scarica, le sollecitazioni meccaniche, ecc.

A seguito di ciò, è solo possibile stabilirne la vita media, definita come “il numero di ore di funzionamento dopo il quale il 50% delle lampade di un congruo e rappresentativo lotto, funzionante in condizioni stabilite, si spegne”.

Il test include sempre un ciclo di accensioni che varia in funzione del tipo di lampada.

La vita media (comunemente denominata anche vita utile) viene fornita dai costruttori insieme alla curva di decadimento del flusso luminoso, quest'ultima riferita al valore nominale del flusso luminoso (che è il valore misurato dopo 10 ore di funzionamento nel caso di lampade a filamento e dopo 100 ore di funzionamento nel caso di lampade a scarica).

Esistono altri modi di definire la vita di una lampada: tra essi il più ricorrente è quello di “vita economica” che viene comunque sempre riferita ad un dato impianto.

La fine della vita economica di una lampada è l’istante al partire dal quale, a causa del numero delle lampade andate fuori uso e della riduzione di flusso subito dalle rimanenti, il flusso totale emesso da quest’ ultime scende al di sotto di un valore percentuale prefissato (assunto come 100% il flusso totale emesso inizialmente da tutte le lampade installate nell’impianto).

Il concetto di vita economica può essere meglio compreso se si considera che, talvolta, le lampade continuano a funzionare anche dopo aver superato la vita media, lavorando in condizioni di efficienza eccessivamente bassa.

A questo punto risulta economicamente più conveniente sostituirle tutte, programmando il ricambio ad intervalli di tempo regolari.

1.7.3 Altre misure per il risparmio energetico

Per il risparmio energetico, oltre all'utilizzo di sorgenti luminose ad elevata efficienza luminosa, si prevede l'inserimento nelle linee di controllori di flusso i quali oltre al risparmio energetico dovuto alla riduzione della tensione ad orari stabili grazie alla stabilizzazione della tensione di alimentazione e all'avvio a tensione ridotta, consentono di allungare notevolmente la vita delle lampade e degli ausiliari elettrici.

Questa misura di risparmio energetico è stata assunta dal Piano della Luce per i seguenti motivi:

- perché consente, conservando la massima funzionalità dell'impianto, un risparmio di energia considerevole che permette l'ammortamento dei costi di installazione delle apparecchiature in tempi brevi, tenendo conto della vita dell'impianto, di una riduzione delle spese di esercizio dello stesso;
- mantiene a regime ridotto il sistema di distribuzione del regime normale;
- mantiene l'omogeneità del flusso luminoso.

Oltre che ai vantaggi economici dovuti al risparmio energetico ed economico con l'utilizzazione abbinata dei controllori di flusso, con l'ausilio di un sistema di telecontrollo per la gestione degli impianti di illuminazione pubblica si riscontra un notevole contenimento dei costi di esercizio, fornendo allo stesso tempo un servizio di elevato standard qualitativo.

I principali vantaggi della telegestione si possono così riassumere:

- una razionalizzazione del servizio in base alla domanda specifica;
- il controllo e il comando a distanza delle singole linee e del quadro nel suo complesso;
- il controllo e il comando a distanza dei singoli corpi illuminati;
- una segnalazione in tempo reale dei disservizi sugli impianti consentendo quindi la possibilità di rapidi interventi per ripristinare le condizioni di normalità;
- la possibilità di programmare gli interventi di manutenzione straordinaria e preventiva ottimizzando le risorse umane e i mezzi a disposizione delle squadre di manutenzione.

Esistono poi quelle misure che hanno l'obiettivo principale di limitare l'inquinamento luminoso intervenendo sull'apparecchio illuminante, ovvero installando apparecchi che riducono la dispersione del flusso luminoso in direzioni diverse da quella interessante la superficie in questione.

La dispersione della luce verso l'alto, diretta o riflessa, da parte degli impianti di illuminazione esterna costituisce sicuramente un aspetto rilevante del problema dell'inquinamento luminoso.

Sottolineiamo a tal proposito che benché sussista una significativa luminosità naturale del cielo, esaltata nelle notti di plenilunio, il termine "inquinamento luminoso" viene talvolta utilizzato come sinonimo di "luminosità del cielo".

I fattori che agiscono direttamente e determinano l'entità dell'inquinamento luminoso prodotto, in generale, da un impianto di illuminazione esterna, possono essere così sintetizzati:

- a) proprietà di rifrazione del vetro di chiusura dell'apparecchio illuminante (vetro piano, coppa trasparente curva, coppa prismaticizzata);
- b) tipo, forma di sorgente luminosa e forma del riflettore all'interno dell'apparecchio illuminante;
- c) posizione della sorgente luminosa e forma del riflettore all'interno dell'apparecchio illuminante;
- d) angolo d'inclinazione del sostegno rispetto all'orizzontale;
- e) angolo di montaggio dell'apparecchio illuminante rispetto al sostegno;
- f) angolo di inclinazione del vetro di chiusura dell'apparecchio rispetto all'orizzontale.

Le figure alla fine del paragrafo mostrano a tal proposito alcune differenze fondamentali di apparecchi per illuminazione esterna (stradale).

Citiamo il caso del Comune di Treviso il quale ha effettuato uno studio volto alla valutazione dell'inquinamento luminoso prodotto dalla pubblica illuminazione esterna (dato che questa ha un'incidenza preponderante rispetto all'illuminazione privata esterna, che si stima possa dare un contributo pari al 30% della precedente) ed è riuscito a dare altresì delle indicazioni su come ridurre tale inquinamento.

Quanto fin qui detto ha lo scopo di evidenziare come attualmente si stia assistendo ad una effettiva nuova sensibilità mostrata dalle amministrazioni Comunali nei confronti del problema dell'inquinamento

luminoso. Ma ciò che si ha intenzione di proporre col presente lavoro è l'adozione di un criterio che mira ad affrontare il suddetto problema a monte e non solo a valle dell'impianto. Eliminare o al meglio ridurre le cause di sovrastime dei flussi luminosi perfezionando gli strumenti di calcolo, i software, utilizzati nella fase iniziale di stesura del progetto illuminotecnico.

1.7.4 Regolatori di flusso e stabilizzatori

Il settore degli stabilizzatori e dei regolatori di flusso per l'illuminazione pubblica rappresenta forse la punta di diamante riguardo la progettazione razionale.

Ciò è dovuto al fatto che gli operatori del settore, impegnati in particolare nell'attività di gestione e manutenzione degli impianti, sono in maggioranza dell'opinione che sistemi più sofisticati, finalizzati ad esempio al telerilevamento delle lampade guaste ed alla tele diagnostica degli impianti, allo stato attuale dell'arte non apportano benefici in termini di riduzione dei costi, anzi più il sistema è sofisticato più richiede interventi di manutenzione e taratura del sistema stesso, con la necessità di intervento di personale altamente qualificato, elevato costo dei ricambi, ecc.

A consuntivo di studi effettuati, si è riscontrato, in genere, che il VAN dell'investimento, che tiene conto del costo dell'investimento, dei costi di manutenzione e gestione del sistema e dei benefici economici ottenibili è negativo.

Gli impianti di illuminazione pubblica in genere devono essere affidabili, proprio perché la loro funzione è quella di fornire la sicurezza.

Detti impianti non devono presentare punti deboli o disporre di sistemi troppo sofisticati con ridotto grado di affidabilità, il principio generale che deve guidare l'impiantistica; non solo nella illuminazione pubblica, è questo: "ciò che non c'è non si può guastare".

Una deroga a questo principio si è dovuta giocare per forza accettare causa il massiccio impiego di lampade a scarica ad alta efficienza (Vapori di Sodio o Vapori di Alogenuri Metallici), che come tutti sanno presentano problemi di affidabilità dovuti alle oscillazioni di tensione ed in particolare agli innalzamenti di tensione, anche se contenuti nel $\pm 10\%$.

Sino a quando si sono impiegate le sole lampade a Vapori di Mercurio non si è mai sentita la necessità di stabilizzare la tensione di rete, purché questa fosse ovviamente contenuta nel già citato $\pm 10\%$.

Pertanto la seguente indagine si limita a prendere in considerazione principalmente gli stabilizzatori di tensione, in quanto l'esperienza ha dimostrato che con la stabilizzazione della tensione si è ottenuto un notevole allungamento della vita delle lampade, con notevoli benefici in termini di riduzione dei costi di manutenzione, e in secondo luogo - quando combinati con la funzione di riduttore di flusso - possono essere considerati apportatori di benefici accessori in termini di riduzione dei costi di energia per le pubbliche amministrazioni (a questo punto sarà opportuno calcolare preventivamente il VAN dell'investimento) e di *riduzione dell'inquinamento luminoso della volta celeste*.

2.1.1 Principi generali per misure di illuminamento

La misura dell'illuminamento è affidata di solito alle celle fotovoltaiche.

La caratteristica di queste celle a strato di sbarramento, come vengono chiamate, è quella di produrre sotto l'azione della luce una forza elettromotrice che provoca un passaggio di corrente in un circuito chiuso senza applicazione di forza elettromotrice esterna.

Per le misure sono impiegati luxmetri, a volta telecomandabili, che impiegano cellule fotoelettriche al selenio o al silicio, queste ultime preferite nei laboratori di misura.

In commercio esistono vari tipi di luxmetri, legati a diverse condizioni di impiego. Il luxmetro portatile presenta un ingombro molto contenuto ed è disponibile sia con testa fotometrica incorporata che separata (classe B).

In questo caso il collegamento può avvenire via cavo o via radio. Il luxmetro di precisione presenta un ingombro maggiore ed un livello di precisione più elevato (classe A) rispetto al portatile.

Del resto la ricerca del compromesso tra precisione e maneggevolezza è uno dei compiti più delicati di cui il progettista si assume le responsabilità in fase di definizione degli obiettivi progettuali e dell'attendibilità degli stessi.

Il luxmetro di precisione per esterni può essere dotato di 5 teste fotometriche, una per la misura dell'illuminamento orizzontale, quattro

per la misura degli illuminamenti verticali, oppure di una testa specializzata per la misura dell'illuminamento prodotto dalla volta celeste.

I suddetti strumenti coprono un campo di misura che, a seconda dei modelli, varia da 0,0001 lux a 600.000 lux.

La dotazione prevede anche teste fotometriche per la misura dell'illuminamento cilindrico e semicilindrico. Le teste fotometriche sono costruite in osservanza delle Norme DIN 5032 parte 6 e CIE n. 53 (1983) e n. 69 (1987).

Oltre alla testa fotometrica standard con correttore di coseno esistono teste termostate per l'eliminazione dello stress termico, oppure teste senza correttore di coseno per misure di laboratorio in cui la luce incide solo lungo la perpendicolare; o teste di elevatissima precisione dotate di raffreddamento termoelettrico ed infine teste "mini" per misure esclusivamente in interni.

La documentazione allegata a tale dispositivo comprende un diagramma che mostra la risposta spettrale comparata con la curva di visibilità relativa alla visione fotopica ed il diagramma che fornisce l'errore legato alla direzione di provenienza della luce a correzione di coseno avvenuta.

Tra le principali cause di errore che possono inquinare le misure di illuminamento è infatti presente lo scostamento tra la curva di funzionamento dello strumento e quella dell'occhio in visione fotopica.

Per poter abilitare uno strumento, costituito da una cellula fotoelettrica e da un microamperometro ad eseguire misure fotometriche di

illuminamento, si dovrà verificare, prima di ogni altra cosa, che la sensibilità spettrale del fotoelemento sia quanto più possibile vicina alla curva di visibilità dell'occhio medio internazionale.

In pratica è possibile apportare apprezzabili migliorie ai risultati con l'impiego di particolari filtri da disporre sull'elemento fotosensibile in maniera da ottimizzare la captazione del segnale luminoso in relazione a come lo stesso viene percepito dall'occhio umano.

Del fattore di trasmissione di tali filtri si tiene conto di solito nella fase di taratura dello strumento.

Per quanto riguarda i difetti di linearità nel rapporto illuminamento-corrente dell'elemento fotosensibile, in generale gli scarti di linearità aumentano con l'aumentare della resistenza interna e dell'illuminamento.

Il pregio degli strumenti che mantengono lineare tale rapporto è quello di poter disporre di un'unica scala di lettura uniforme per diversi campi di misura e per variazioni di temperatura.

Forti scostamenti dalla temperatura di taratura, influenzano la resistenza interna ed il fotoelemento e l'esattezza delle misure può risentirne, soprattutto quando si opera con deboli illuminamenti e forti resistenze di galvanometro. Oltre i 50°C è possibile danneggiare irrimediabilmente il fotoelemento e per questo nei Laboratori di misura sovente le teste fotometriche sono termostatate con elementi Peltier.

La taratura dei luxmetri viene sempre effettuata con luce che colpisce perpendicolarmente il piano della cellula; il loro impiego in condizioni

differenti di posizione si traduce quindi in un errore tanto più grave quanto maggiore è l'angolo d'incidenza del fascio di luce rispetto alla verticale.

Nei luxmetri l'errore dovuto all'inclinazione del fascio di luce incidente non è trascurabile a partire da angoli prossimi a 45° . Si è ovviato a questo inconveniente ricorrendo ad opportuni dispositivi, chiamati diffusori od anche correttori di coseno che fanno parte integrante dell'elemento fotosensibile.

La misura dell'illuminamento è riferita per definizione ad un punto specifico di una superficie. Quindi occorre innanzitutto scegliere delle superfici di riferimento, che tipicamente possono essere un piano corrispondente al compito visivo, un piano o i piani verticali corrispondenti alle superfici delle pareti od eventualmente ad una o più sezioni.

Al fine di determinare i valori medi di illuminamento atti a rappresentare la quantità di luce sulle regioni interessate, ci si riferisce ai punti appartenenti ad un reticolo costruito su uno dei suddetti piani.

In relazione all'accuratezza del risultato che si vuole ottenere è consigliabile mantenere un'interdistanza tra i punti di misura non superiore ai 2 metri.

Le normative e le raccomandazioni relative alle misure di illuminamento prescrivono di seguire i seguenti accorgimenti:

- le misure di illuminamento dovute ad un impianto di illuminazione artificiale devono essere fatte in assenza di contributi di luce naturale;

- le misure in condizioni di illuminazione naturale generalmente non sono previste (è auspicabile che vengano effettuate comunque, perché anche la luce naturale, se non opportunamente dosata, può essere causa di discomfort);
- prima di effettuare le misurazioni di illuminamento occorre provvedere alla stabilizzazione delle lampade con le relative durate minime di funzionamento (1h, se l'impianto è realizzato con lampade fluorescenti o con lampade a scarica ad alta intensità come vapori di mercurio, sodio ad alta e bassa pressione, ad alogenuri; nessun pericolo di stabilizzazione se l'impianto è realizzato con lampade ad incandescenza o alogene).

Nel caso l'impianto disponga di lampade nuove del tipo a scarica, esse devono aver funzionato per almeno 100 ore prima della stabilizzazione.

Sono richieste almeno 10 ore per quelle ad incandescenza o alogene.

Le misurazioni puntuali dell'illuminamento orizzontale sono effettuate all'altezza di 0,85 m dal pavimento, quelle relative alle vie di passaggio a 0,2 m dal pavimento, l'illuminamento sul posto di lavoro è misurato all'altezza del compito visivo.

Tanto per le misurazioni d'illuminamento orizzontale, quanto per quelle di illuminamento verticale è richiesta l'applicazione di sospensioni cardaniche alla testa fotometrica del luxmetro in modo da assicurare la complanarità della superficie sensibile alla luce dello strumento con la sua superficie di appoggio. In alternativa, il controllo della posizione orizzontale della testa fotometrica può essere effettuato con una livella.

Le misurazioni devono essere effettuate a distanze tali per cui si possa applicare la legge del quadrato della distanza con un'incertezza minore di quella desiderata per la misura. La distanza minima di misura deve essere, di regola, pari ad almeno 15 volte la dimensione massima dell'area luminosa della sorgente.

E' importante evitare che l'operatore formi ombre sul fotricevitore durante la misura.

Ogni strumento lavora su un intervallo di calibrazione ben definito e necessita di un tempo di assestamento al livello di illuminamento corrente prima della lettura dello stesso compreso tra 5" e 15".

Se si ammette un errore massimo dell'ordine del 10% è d'obbligo l'uso di una lente particolare, detta "correttore di coseno", che permette al fotricevitore di rilevare in maniera corretta la luce proveniente dalle angolazioni maggiori di 45°.

Gli strumenti di elevata qualità prevedono anche correzioni cromatiche automatiche, altri prevedono l'uso di tabelle di correzione.

Le teste fotometriche dei luxmetri lavorano correttamente in un campo di temperature compreso tra 15 e 50°C.

In particolare, quando ci si rivolga ad una illuminazione esterna, si ha a che fare con un compito visivo tridimensionale in cui la componente verticale può risultare accentuata rispetto a quella orizzontale.

L'illuminamento semicilindrico, data la similitudine tra il semicilindro e la sagoma di una persona in piedi, è l'indice che in questi casi meglio si adatta a caratterizzare il campo visivo.

Per quanto riguarda le modalità di misura finalizzate al collaudo illuminotecnico di impianti esterni si può rivolgere l'attenzione alla norma UNI 9821 del gennaio del 1991. Tale norma indica la metodologia da seguire per il collaudo illuminotecnico attraverso la misura dei seguenti parametri:

- illuminamenti sui piani orizzontali;
- illuminamenti sui piani verticali;
- abbagliamento;
- coordinate tricromatiche e temperatura di colore della luce incidente sull'area d'interesse.

2.1.2 Misure di luminanza

La misura della luminanza può essere effettuata o mediante misure dirette o mediante misure indirette, secondo che si paragonino tra loro due luminanze oppure che il valore della luminanza venga dedotto analiticamente da formule che comportino la misura di altre grandezze (per esempio l'illuminamento).

Tra gli apparecchi portatili, sempre nel campo del sistema diretto, si segnala il misuratore di luminanza di Luckiesh e Taylor, particolarmente rimarchevole per il grande campo di impiego (da circa 0,1 nit a circa 180.000 nit). In esso si paragona la luminanza incognita con quella prodotta da una lampada interna allo strumento su di un disco di vetro opalino.

Tale sistema non è adatto per alcuni campi di applicazione, tipo l'illuminazione stradale. Il confronto con la sorgente campione è reso difficile dal fatto che una vasta porzione di superficie stradale occupa prospettivamente un'area modesta nel campo visivo e che pertanto, se si vogliono ottenere risultati attendibili, il campo di paragone deve essere di dimensioni piccolissime; ciò conduce in genere ad apparecchiatura delicate e comunque di impiego difficoltoso su strada.

Per ottenere una buona uniformità di luminanza e quindi per evitare il discomfort visivo bisogna poter misurare direttamente, con strumenti di pratico impiego, i valori della luminanza sul fondo stradale.

I suddetti strumenti fanno parte della famiglia dei telefotometri ad apertura variabile detti anche luminanzometri. Di questa categoria, lo

strumento oggi maggiormente impiegato per scopi sia scientifici che industriali è lo Spectra Prichard Photometer, usato dall'industria per tarare la luminanza dei display alfanumerici, per misure di colore, di contrasto per determinare l'uniformità degli schermi di tubi catodici, per le misure della luminanza stradale dovuta agli impianti di illuminazione e per la caratterizzazione fotometrica dei manti stradali.

Il luminanzometro descritto, di impiego molto versatile, consente di eseguire misure di luminanza locali, a distanza ravvicinata, anche su piccole superfici, qual è ad esempio un tratto del filamento di una lampada ad incandescenza. Per questi scopi si utilizzano appropriata lenti addizionali da applicare sull'ottica dello strumento.

L'operatore vede attraverso lo strumento la zona che comprende l'area di misura, con al centro un bollo nero più o meno grande a seconda dell'apertura selezionata; l'apertura in tal modo definisce esattamente la porzione di superficie entro la quale lo strumento valuta la luminanza media.

Al diminuire del campo di apertura aumenta la sensibilità dello strumento.

La taratura dello strumento va effettuata, dunque, in base alle dimensioni del campo da valutare ed ai valori massimo e minimo di luminanza previsti.

Lo strumento non è affetto da errori di polarizzazione della luce, dal momento che non possiede specchi, fibre ottiche o altri impedimenti applicati lungo il percorso ottico del segnale di misura.

L'obiettivo di queste misure è quello di quantificare il grado di luminosità percepita dai soggetti all'interno dell'ambiente durante lo svolgimento delle proprie attività, individuando le caratteristiche qualitative dell'ambiente legate alla direzionalità della luce ed alla possibile presenza di abbagliamento diretto e riflesso.

Per ottenere questo risultato è essenziale che lo strumento venga posizionato in corrispondenza delle probabili posizioni degli occhi dell'osservatore, ripetendo per ognuna tante misure quanti sono gli elementi significativi in termini di luminanze che rientrano nel campo visivo.

Tali elementi sono schematizzabili come segue:

- sfondo del compito visivo;
- compito visivo nelle immediate vicinanze del compito visivo;
- piani verticali posti di fronte all'osservatore ed all'altezza dei suoi occhi;
- soffitto;
- finestre;
- corpi illuminanti.

Nel caso di ambienti con utilizzazione sia diurna che notturna, occorre considerare i due casi separatamente, prendendo in considerazione, a seconda del caso, gli elementi significativi presenti.

I valori di luminanza individuati all'interno del campo visivo in vicinanza del compito visivo vengono poi confrontati con quelli relativi al campo visivo periferico, vale a dire la porzione di spazio vista da entrambi gli

occhi compresa entro angoli di 80'-110' sul piano orizzontale, 50'-70' sul piano verticale superiore e 70'-80' sul piano verticale inferiore.

La rappresentazione grafica dei dati emergenti dalle misure è alquanto complessa in quanto alle 3 variabili spaziali, legate alla posizione dello strumento, si aggiungono i 2 angoli che definiscono la direzione di osservazione.

Una possibile soluzione del problema è costituita dall'uso di una rappresentazione prospettica dello spazio, utilizzando come punto di osservazione volta per volta la posizione assunta dagli occhi dell'osservatore.

Per caratterizzare l'ambiente luminoso bisogna dunque ricorrere ad un numero di diagrammi pari al numero dei punti di osservazione previsti. Inoltre la superficie apparente all'osservatore cambia di dimensioni al variare dell'angolo di osservazione a parità di dimensioni della superficie reale corrispondente, con conseguente variazione dell'intensità luminosa percepita dall'osservatore.

Qualora le misure di luminanza servano a valutare l'abbagliamento diretto prodotto dagli apparecchi di illuminazione, si devono seguire dei criteri particolari:

- la luminanza deve essere calcolata dalla media di più misure effettuate sulla superficie di emissione dell'apparecchio di illuminazione vista dalla posizione di osservazione già stabilita precedentemente, per mezzo di un luminanzometro dotato di apertura circolare (così da consentire di minimizzare gli errori dovuti alla rotazione dello strumento ed alla variazione della posizione angolare dell'apparecchio);

- l'apertura di misura, in gradi, del luminanzometro deve essere tale che la superficie dell'area luminosa dell'apparecchio, entro la quale lo strumento calcola la luminanza media, non sia maggiore della minima dimensione che l'apparecchio di illuminazione viene ad assumere quando è visto dalla posizione di misura.

Per quanto riguarda l'illuminazione in esterni, in particolare per applicazioni stradali ci sono diversi criteri di individuazione dei reticoli di misura, così da avere misure rispondenti alle necessità del traffico.

E' consigliabile fare misure di luminanza col fondo stradale asciutto e col fondo bagnato, per avere modo di paragonare i risultati.

Nel campo delle misure di luminanza risultati interessanti si sono anche ottenuti impiegando il cosiddetto metodo fotografico. Tale metodo consiste nell'ottenere, con opportuni accorgimenti, una riproduzione fotografica della zona interessata, che conservi inalterati i rapporti di luminanza.

La misura delle luminanze, il tracciamento delle curve "isostilb" e la determinazione del contrasto possono essere così trasformati in una più agevole operazione di laboratorio.

Un altro metodo suggerito per eseguire misure di luminanza è il metodo televisivo. Questo metodo ha il pregio di fornire direttamente una grande quantità di informazioni visive sui valori della luminanza e sulla sua distribuzione.

È particolarmente studiato per misure su strada, per scopi di ricerca e per scopi dimostrativi là dove occorrono velocità ed al tempo stesso completezza di informazioni.

Per questo tipo di misure si usa un impianto televisivo a circuito chiuso. Lo schermo mostra solo un'immagine della strada e dell'impianto di illuminazione in studio, fornisce anche direttamente le curve di uguale luminanza sovrapposte all'immagine detta.

Il principio di funzionamento è il seguente: l'immagine di una strada illuminata viene ripresa con una normale telecamera e, durante ciascuna scansione del pennello luminoso sullo schermo, nel momento in cui la luminanza supera o scende al di sotto di un valore prestabilito, viene sovrapposto al segnale un brevissimo impulso che sullo schermo traccia brevi tratti bianchi. Ripetendo tale procedura per tutte le scansioni, sullo schermo appare una curva che rappresenta il luogo dei punti ad eguale luminanza (curve isocandela).

E' possibile prefissare diversi valori di luminanza, per cui sullo schermo si potranno vedere contemporaneamente più curve isocandela sullo sfondo dell'immagine della strada illuminata.

Queste immagini riprese fotograficamente, oppure registrate in modo tale da permettere confronti fra situazioni diverse, possono essere particolarmente utili per condurre indagini sistematiche sugli impianti di illuminazione.

2.1.3 Misure colorimetriche

Anche se nel presente lavoro non sono state effettuate misure colorimetriche, è bene dare alcuni cenni riguardo a queste in quanto gli strumenti descritti fino a questo punto, riguardano aspetti energetici quantitativi, cosa questa che va ad entrare in merito alla distribuzione spettrale dell'energia.

Qualora si richieda la caratterizzazione spettrale della luce si ricorre ad uno strumento denominato "fotoradiometro".

Lo strumento è composto da una testa fotometrica e da una consolle di misura e comando, tra loro collegate. La testa fotometrica, con messa a fuoco da 44 mm infinito, consente di collezionare le radiazioni luminose provenienti da una zona di misura rettangolare, definita da un angolo solido di mezzo grado per un grado e mezzo.

Il campo entro il quale lo strumento misura l'energia alle varie lunghezze d'onda si estende per tutto il campo del visibile e del vicino infrarosso (da 700 a 1070 micron).

Sulla testa fotometrica è alloggiato il fotoricevitore, realizzato da un allineamento di diodi, ciascuno dei quali misura l'energia del segnale luminoso in un piccolo campo di lunghezza d'onda.

In tal modo è possibile ottenere un duplice risultato: quello di evitare di dover selezionare per la misura ciascuna lunghezza d'onda e di poter effettuare la caratterizzazione dell'analisi spettrale in un tempo quasi reale.

Lo strumento consente di effettuare, oltre alla rilevazione dello spettro

della radiazione luminosa, la misura della luminanza, la determinazione delle Coordinate tricromatiche, la misura della temperatura di colore e, tramite elaborazioni dati successive, l'indice di resa cromatica.

La consolle di comando ospita lo schermo sul quale si traccia l'andamento dello spettro del segnale luminoso, le indicazioni relative alle condizioni di misura e le altre misure che caratterizzano l'analisi della radiazione luminosa.

Si possono effettuare misure di colore sulle sorgenti luminose secondo il sistema CIE. Si usa il colorimetro.

Il colorimetro è costituito da una testa fotometrica composta da tre cellule fotoelettriche. Ognuna di esse ha una curva di risposta che riproduce più o meno fedelmente la curva di visibilità dell'occhio umano secondo ciascuno dei tre colori.

Si hanno in definitiva tre risposte proporzionali alle tre diverse visibilità dell'occhio ai colori. Le curve di risposta sono generalmente ottenute mediante filtri che possiedono appropriate caratteristiche di assorbimento.

Il segnale fornito dai fotorilevatori può esser letto direttamente in termini di coordinate tricromatiche oppure convertito automaticamente in temperatura di colore o in indice di resa cromatica.

Il senso di queste misure è nettamente diverso a seconda che si tratti di luce naturale di luce artificiale.

Per quanto riguarda la luce naturale non è tanto in discussione la qualità della luce stessa, quanto l'effetto di variazione del colore prodotto dalle caratteristiche cromatiche dell'ambiente in generale.

Relativamente alla luce artificiale le misure generalmente si attuano in prossimità delle singole lampade per determinarne la temperatura di colore, considerando l'influenza dell'apparecchio illuminante sulle caratteristiche cromatiche della luce emessa.

Sarebbe opportuno normalizzare una metodologia di misura, atta a caratterizzare cromaticamente non solo le sorgenti luminose, ma l'ambiente nella sua interezza.

Non ha senso parlare di temperatura di colore o indice di resa cromatica di una lampada quando la luce che investe il piano di lavoro ha caratteristiche cromatiche modificate in seguito alle riflessioni sulle pareti di eventuali edifici prossimi.

Allo stato dei fatti non esiste alcuna normativa o raccomandazione che suggerisca come e dove effettuare le misure se prendere come riferimento i valori medi o i valori puntuali ed infine come impostare l'analisi valutativa.

Fa eccezione la normativa relativa all'illuminazione dei campi sportivi (nata per esigenze televisive legate alle riprese ad alta definizione, che suggerisce di effettuare la misura del colore della luce incidente sul campo di gioco al centro di 4 postazioni rettangolari in cui viene diviso il campo ad 1 metro di altezza ed evitando il più possibile le riflessioni, accortezza pressoché impossibile nel caso di illuminazione di interni.

2.1.4 Uniformità

Le prestazioni di un impianto di illuminazione sono solitamente definite dal parametro uniformità di illuminamento o di luminanza. Nel caso di illuminazione architettonica l'impiego di questo parametro non ha molto senso essenzialmente per due motivi:

- 1) un parametro quantitativo non può da solo fornire informazioni idonee a definire aspetti legati alla percezione di una scena luminosa e quindi di natura per lo più qualitativa;
- 2) nella quasi totalità dei casi il progettista non intende realizzare (volutamente) scene luminose uniformi, sia che si tratti di soggetti di piccole dimensioni (ad esempio statue, fontane, ecc.) sia che si tratti di scene di grandi dimensioni composte da più soggetti.

Nel caso di edifici è altresì importante mantenere il rapporto luce-ombra tra le diverse facciate: durante le ore diurne, infatti, comunque esso risulti disposto, non presenterà mai lo stesso valore di illuminamento medio su tutte le facciate; se gli edifici sono più di uno è bene identificare le superfici tra loro parallele ed evidentemente rischiararle con lo stesso valore di illuminamento medio.

Se si fa ricorso al parametro “gradiente”, è possibile conoscere la variazione di una qualsiasi grandezza scalare, nel nostro caso illuminamento o luminanza, in una direzione e verso stabiliti.

Questo parametro può indicarci la differenza di illuminamento, o luminanza, per unità di misura nella direzione di massima variazione, consentendoci di verificare che il soggetto illuminato non presenti zone

eccessivamente illuminate oppure eccessivamente buie rispetto al contesto luminoso globale.

Al valore del gradiente, espresso in $\Delta E/m$ da non superare, si deve tener conto dell'illuminamento medio (o della luminanza media) del soggetto illuminato e della distanza esistente tra soggetto e punto d'osservazione.

Se il soggetto è osservabile solo da lontano potranno risultare accettabili valori più elevati: in altri termini le eventuali disuniformità saranno meno percepibili poiché in tali condizioni la risoluzione del sistema visivo risulta più bassa.

Quando il punto d'osservazione tende all'infinito, inoltre, il soggetto viene in linea di massima visto secondo una direzione di osservazione unica (un solo angolo di osservazione) e la variazione delle luminanze "tende" ad essere progressiva.

Al contrario quando l'osservatore è nelle vicinanze del soggetto, può osservarlo secondo diverse direzioni di osservazione e percepire valori di luminanza contigui la cui diversità può risultare amplificata in conseguenza del fatto che le direzioni di osservazione possono formare, con la direzione d'incidenza dei raggi luminosi, angoli anche molto diversi tra loro.

2.1.5 Misura del fattore di resa di contrasto (crfr)

È doveroso accennare al crfr vista l'importanza che esso ricopre nella visione notturna sia artistica che funzionale. A tale scopo si riporteranno alcune nozioni fondamentali ed essenziali alla sua definizione ed utilizzo in tema di illuminazione in ambienti confinati, lasciando al lettore la facoltà di traslarne l'importanza al caso dell'illuminazione di ambienti esterni.

Le raccomandazioni sui valori che tale indice deve assumere e quindi la relativa misura hanno un senso se vengono effettuate in punti e direzioni, che corrispondono all'uso reale dell'ambiente.

Essendo impossibile coprire tutti i casi ci si riferisce ad un unico compito visivo che rappresenta i compiti relativi ad un gruppo di attività; il fattore di contrasto per il suddetto compito visivo nelle condizioni di riflessione date si dice fattore di resa di contrasto di riferimento CRFR.

Ogni compito visivo di riferimento presenta diversi valori del contrasto a seconda del sistema di illuminazione impiegato: è opportuno definire una condizione di illuminazione tipo, sotto la quale si ha lo "standard di riflessione di riferimento".

Si definisce infine un "oggetto di riflessione di riferimento", costituito da due superfici, una chiara ed una scura su cui si effettuano le misure di luminanza.

Avvalendosi di tale oggetto si calcola il contrasto nelle condizioni di illuminazione reali (C) ed in quelle di riferimento (Co).

Il rapporto C/Co rappresenta il fattore di resa di contrasto di riferimento CRFR.

Si ricorda che il contrasto di luminanza tra un oggetto e lo sfondo è definito da: $C = (L_o - L_s) / L_o$, dove L_o rappresenta la luminanza dell'oggetto ed L_s la luminanza dello sfondo.

Le misure di contrasto vengono effettuate in maniera normalizzata, facendo riferimento all'indice CRFR.

Sono da prendere in considerazione i valori minimi di CRFR, perché il forte distacco dei singoli valori dal valore medio, rende quest'ultimo privo di significato.

Si riportano di seguito le prescrizioni relative ai casi più frequenti nella realtà professionale. Per altri casi si rimanda alle suddette normative.

Compito visivo: lavoro generico su di un piano orizzontale

Le modalità di misura previste per i posti di lavoro sono le seguenti:

- si dispone l'obiettivo del luminanzometro a 400 mm, di altezza dal piano di lavoro in corrispondenza della posizione occupata dagli occhi dell'operatore;
- si dispone il campione sul tavolo di lavoro sulla retta normale al bordo del tavolo a 140 mm, dalla proiezione del centro ottico del luminanzometro;

- si esegue la misura di luminanza delle due superfici, chiara e scura del campione, in presenza di uno schermo simulante la presenza dell'operatore, detto "body-shadow".

Il sistema di misura ottimale si avvale di un trasduttore di luminanza e di un rilevatore di contrasto standard montati su un supporto mobile, in modo da essere posizionati accuratamente su tutti i punti che costituiscono la mappatura del compito visivo.

A differenza delle misure in ambienti con postazioni di lavoro fisse che vanno effettuate solo in queste posizioni ed in tutte le direzioni possibili, le misure in ambienti con postazioni di lavoro non definite si effettuano su tutti i punti appartenenti ad una griglia, fitta al punto che ogni punto sia rappresentato adeguatamente dal nodo più vicino.

Il numero di punti di misura è normalmente molto più grande del numero delle postazioni di lavoro, quindi appare eccessivo esigere di superare ovunque i valori minimi richiesti, ma ci si accontenta di valutare il WAC (work area coverage), che rappresenta la percentuale dei punti di misura in cui viene superato il valore minimo richiesto.

Gli angoli di divisione solitamente non sono noti: si considerano convenzionalmente, per ogni punto, le quattro direzioni parallele alle pareti.

Compito visivo: lettura e scrittura sul videoterminale

Le differenze sostanziali con il caso precedente sono le seguenti:

- le misure vengono effettuate sullo schermo direttamente, senza ricorrere al rilevatore di contrasto standard;
- la posizione dell'operatore è la stessa dell'utente finale e quindi non c'è bisogno di ricorrere all'uso del "body shadow".

Per misurare il contrasto di un oggetto delle dimensioni di un carattere sullo schermo occorre tarare l'angolo di apertura minimo di 2° , occorre generare un elemento di contrasto (campo uniforme formato da più pixel) di area pari a circa 3 cmq.

La stessa misura effettuata in assenza del cursore fornisce la luminanza dello sfondo.

Il confronto tra i valori di luminanza rilevati si può evidenziare.

Con L_c ed L_b si rappresentano rispettivamente il valore massimo e minimo della luminanza generata dallo schermo, misurata ad impianto di illuminazione spento, mentre L_b rappresenta la luminanza dello sfondo, comprensiva delle riflessioni.

Un rapporto tra le luminanze superiore a 1/5 può determinare un affaticamento visivo: la ISO standard DP 9241 raccomanda un rapporto massimo di 1/10.

Nel caso in cui il videoterminale venga utilizzato da un dattilografo è consigliabile effettuare anche la misura del contrasto tra lo schermo ed il manoscritto, passaggio visivo effettuato migliaia di volte al giorno dall'operatore.

Le suddette prove vanno eseguite per tutte le postazioni di lavoro che presentano condizioni di illuminazione differenti, per poi effettuare un confronto, finalizzato all'eliminazione delle condizioni più sfavorevoli.

È ovvio che nel caso di illuminazione in ambienti esterni non si può parlare di affaticamento visivo nel caso di illuminazione sia artistica che funzionale, urbana in generale, mentre questo fenomeno è evidentemente presente nel caso di strade extraurbane sulle quali la segnaletica lasci a desiderare (strisce stradali).

2.1.6 Misura del fattore di riflessione e trasmissione

Per la misura del fattore di riflessione diffusa viene adoperata $r = \Phi_{\text{emergente}} / \Phi_{\text{incidente}}$ tramite la misura degli illuminamenti prodotti sulla finestrella B in presenza ed in assenza dell'elemento da caratterizzare.

Quando si desidera rilevare il coefficiente di riflessione di una superficie per diversi angoli di inclinazione di una intensità luminosa incidente e di osservazione si utilizza il gonioreflettometro.

Lo strumento comprende un dispositivo ottico di puntamento che invia sulla zona di misura del campione l'intensità incidente I_i .

Il dispositivo può ruotare su di un arco di cerchio compreso tra 0° e 90° . L'intensità luminosa I_r riflessa dal campione è raccolta da un fotorecettore B mobile sullo stesso arco da 0° a 180° .

Lo strumento consente anche di determinare le curve di gonioreflettenza di una determinata superficie, in funzione della inclinazione dell'intensità luminosa incidente; ciò si ottiene variando la posizione angolare del fotorecettore da 0° a 180° e rilevandone i dati su di un apposito diagramma, il che porta ad ottenere le forme delle curve fotometriche.

Un'applicazione pratica di questi diagrammi è data dallo studio della caratterizzazione dei manti stradali, per il progetto di impianti di illuminazione basati sul criterio delle luminanze.

Per la determinazione del fattore di trasmissione di un mezzo nei confronti di una determinata sorgente luminosa può ancora una volta essere impiegato l'integratore sferico.

Per questo scopo si utilizza una sfera di Ulbricht provvista di due aperture: nella prima verrà inserito un ricevitore fotometrico; nella seconda il campione da esaminare.

All'interno della sfera dovrà essere disposto su uno schermo in modo che il ricevitore fotometrico non "veda" l'apertura nella quale è stato applicato il campione, rilevando, tramite il fotorecettore, l'illuminamento E_1 ; si estrae quindi il campione in prova e si esegue una seconda misura di illuminamento E_2 .

Il coefficiente di trasmissione percentuale sarà quindi dato dalla seguente relazione:

$$t\% = (E_1 / E_2) \times 100$$

Il metodo di misura precedentemente descritto non si applica quando si vuole determinare il coefficiente di trasmissione di un mezzo sotto il profilo spettrofotometrico.

In tal caso si intende valutare il grado di selettività del materiale, rispetto alle lunghezze d'onda che costituiscono lo spettro della radiazione luminosa incidente. Per questi scopi si impiega lo spettroradiometro.

Le misure dei coefficienti di riflessione e di trasmissione dei materiali possono servire per individuare i materiali più opportuni da inserire in ambiente al fine di evitare fenomeni di abbagliamento (quantità dell'energia riflessa) e di aberrazione cromatica (qualità dell'energia riflessa).

IL RILIEVO DELLE CARATTERISTICHE FOTOMETRICHE ED AMBIENTALI

2.1 La misura delle grandezze fotometriche

La misura delle caratteristiche fotometriche costituisce la maniera con cui valutare in modo oggettivo la qualità dell'ambiente luminoso.

Questa qualità del resto è direttamente legata alla facilità con cui avviene il processo di percezione per ogni compito visivo previsto.

All'utente devono essere garantiti adeguati livelli di benessere e di sicurezza da parte dell'ambiente, intendendo con benessere il minimo affaticamento possibile degli organi visivi e con sicurezza un requisito variabile a seconda del compito visivo legato ai livelli d'illuminamento ed all'equilibrio tra le luminanze che entrano nel campo visivo.

I dati ricavati dalle misure fotometriche devono poi essere elaborati per ottenere degli indici di valutazione delle prestazioni offerte dall'ambiente luminoso.

Verificare le caratteristiche oggettive dell'ambiente luminoso significa individuare le grandezze che lo rappresentano, ovvero quei parametri misurabili in campo, caratteristici del tipo di luce presente, delle sorgenti

e delle superfici delimitanti l'ambiente, ed in secondo luogo definire quali strumenti sono utilizzabili, verificando che le loro caratteristiche risultano confacenti alle necessità di precisione e praticità.

Alcune misure possono essere effettuate in campo, altre invece sono vincolate all'uso del laboratorio.

Ciò è dovuto al fatto che alcune necessitano per la creazione di standard di misura, per la qual cosa alla richiesta di maggior precisione si vede accoppiata la difficoltà di trasporto dagli strumenti.

Le misure devono essere comunque elaborate in maniera che siano riproducibili e che le caratteristiche di ambienti differenti siano confrontabili tra di loro.

2.3 Influenza del microclima: il problema della diffusione

Oltre alla riflessione dovuta alla presenza di una maggiore o minore nuvolosità del cielo, ciò che determina un significativo rinvio della luminosità terrestre sul sito interessato è l'effetto sulla radiazione visibile del contenuto d'acqua sotto forma di vapore presente in atmosfera. La diffusione.

Il singolo raggio di luce che dal basso diretto verso l'alto incontra le molecole di vapore d'acqua, dopo ripetute riflessioni può ritornare verso il basso. E la probabilità che ciò accada è tanto maggiore quanto maggiore è la densità del vapore.

Quello della diffusione è un problema da non trascurare ai fini della completa definizione del contributo al fondo da parte del cielo.

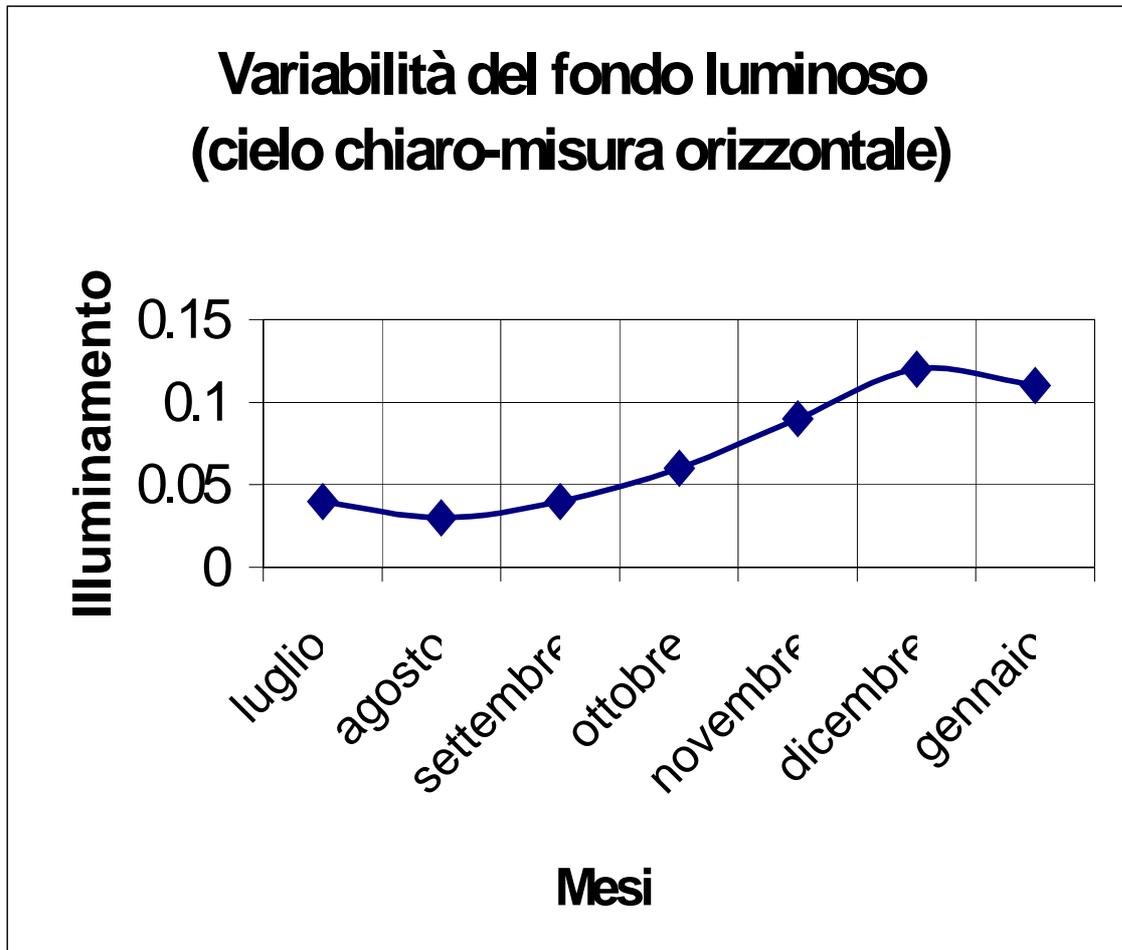
Infatti mentre nelle simulazioni esterne in daylighting il contributo dovuto alla diffusione dell'atmosfera è totalmente trascurabile rispetto agli elevati valori di illuminamento presenti, nel caso invece di illuminazione notturna questo contributo rientra all'interno del campo di misura, ragione per la quale diviene doveroso quantificarne il valore poiché direttamente legato all'errore conseguente.

Per tenere conto di questo contributo si sono effettuate delle misure singole di illuminamento derivante dal solo fondo cielo in due condizioni di umidità specifica ambientale molto differenti tra di loro. Una in piena estate con valori di temperatura e di umidità relativa rispettivamente di 27°C e 80% (in presenza di scirocco) ed una in inverno con valori di temperatura e di umidità relativa di 5°C e 80%.

Ebbene non si sono riscontrate delle variazioni dei valori di illuminamento al variare dell'umidità specifica bensì queste sono state rilevate al variare dell'umidità relativa (vedere i 2 grafici alle pagine seguenti).

Andamento del fondo luminoso

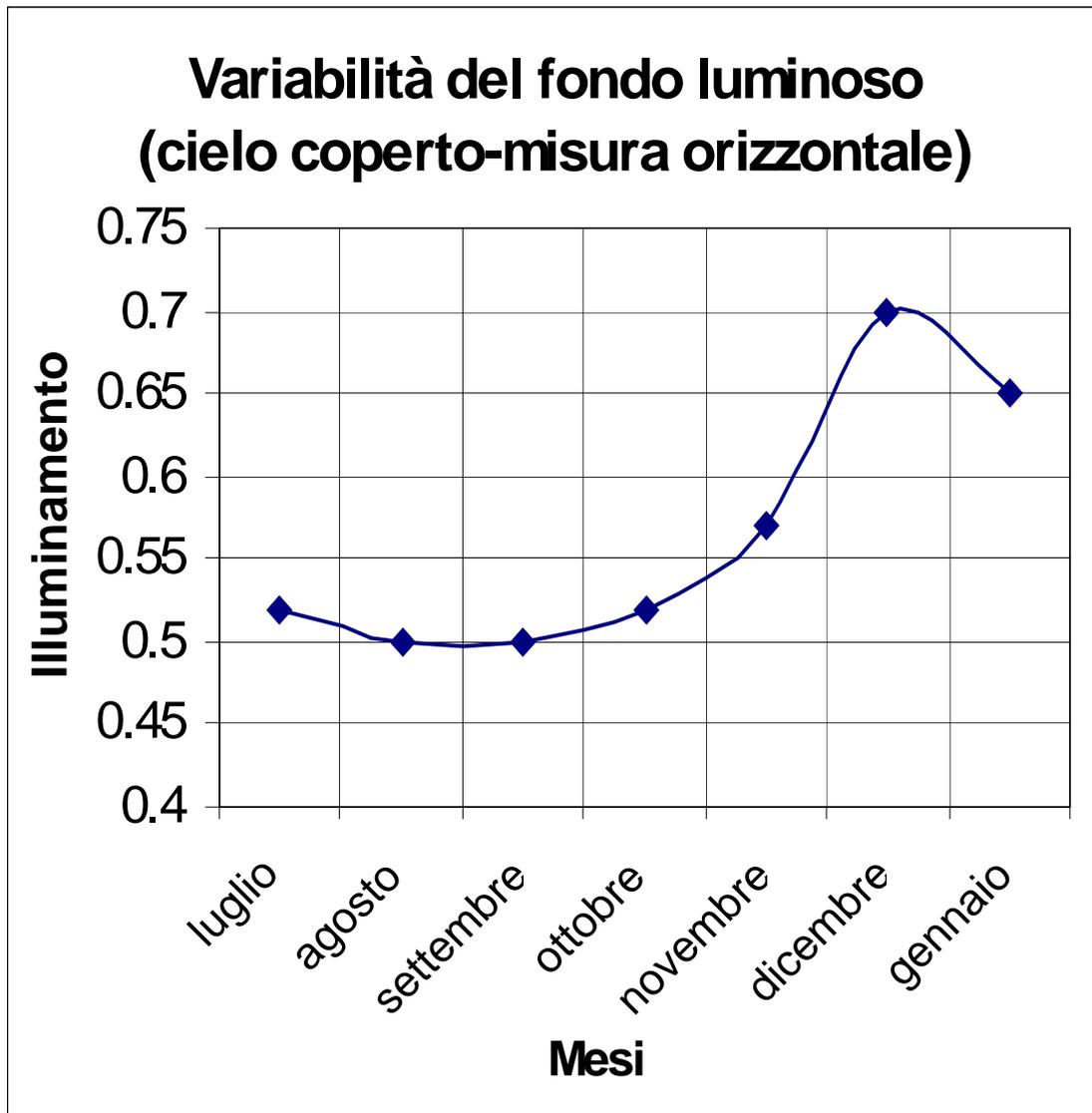
Cielo CHIARO



- I punti di misura di una griglia 2x2 hanno riportato lo stesso risultato numerico.
- Misura su piano Orizzontale.
- In assenza di sorgenti luminose circostanti (quelle lontane non sono viste dalla testa fotometrica).

Andamento del fondo luminoso

Cielo COPERTO



- I punti di misura di una griglia 2x2 hanno riportato lo stesso risultato numerico.
- Misura su piano Orizzontale.
- In assenza di sorgenti luminose circostanti (quelle lontane non sono viste dalla testa fotometrica).

2.4 Ambienti urbani periferici e centrali

La prima grande difficoltà incontrata nella impostazione del Piano, oltre a quella costituita dalla vastità dell'area metropolitana romana, è stata la enorme differenziazione dei caratteri storici, morfologici e sociali riscontrabile nelle varie zone della città.

E non soltanto nel confronto scontato fra centro e periferia, ma anche fra parti dello stesso centro storico o fra insediamenti contigui all'interno delle periferie.

Pertanto, nell'impossibilità di utilizzare criteri e parametri identici per tutta la città, si è preferito ricorrere ad una metodologia unitaria, ancorata ad alcuni capisaldi concettuali irrinunciabili e tuttavia flessibili dal punto di vista applicativo.

La utilizzazione, in entrambi i casi, di orientamenti culturali e di criteri illuminotecnici in parte diversi, risponde alla flessibilità cui si è accennato sopra e alla volontà di aderire alla specificità ambientale dei luoghi.

A parte ogni differenziazione di ordine formale, tutti gli interventi hanno in comune la medesima concezione "paesaggistica" e non "scenica" della illuminazione artificiale.

Ciò equivale a privilegiare la percezione in movimento, legata alla percorribilità degli spazi illuminati, piuttosto che la percezione statica degli oggetti, vincolata ad un punto fisso d'osservazione.

Questo discende dall'aver scelto fin dall'inizio come utenti finali, il cittadino e il visitatore che si muovono e che vivono nella città, riscoprendola di notte in forma di luce, nella sua intera complessità.

In tal modo nella rarefazione notturna della scena urbana risulta finalmente possibile selezionare per mezzo della luce non soltanto un certo numero di cose significative ma anche alcuni aspetti di queste cose e non altri.

-

3.1 Il software di simulazione

Lumen Micro, nella versione 7.1, è un codice automatico elaborato da una società americana, la Lighting Technologies Inc., che permette di effettuare l'analisi e la progettazione dell'illuminazione all'interno di ambienti confinati.

Rispetto alla versione precedente sono presenti alcune differenze sostanziali che è bene mettere in evidenza data l'importanza che riveste la possibilità di effettuare simulazioni di ambienti esterni.

Per tale motivo si riportano di seguito le caratteristiche della versione 6.1 ed in aggiunta a questa si citeranno le suddette differenze che costituiscono del resto buona parte del lavoro complessivo presente.

Il programma 6.1 è in grado di esaminare ambienti di qualsiasi forma, purché le pareti siano ortogonali tra loro; può tenere conto della presenza di partizioni interne sia orizzontali che verticali, di arredi, scale interne, nicchie e qualsiasi altra discontinuità spaziale purché definita da superfici ortogonali tra loro e disposte parallelamente alle pareti della stanza.

L'illuminazione può essere naturale, artificiale o mista: il metodo utilizzato per l'analisi è quello del "Flux Transfer" ed i modelli di cielo coperto CIE, CIE sereno e IESNA parzialmente coperto.

Per quanto riguarda l'illuminazione artificiale, che è ciò che interessa in questa sede, Lumen Micro utilizza solidi fotometrici in formato IES; il tipo di gestione di tali file garantisce una completa apertura del data base verso apparecchi illuminati di qualsiasi costruttore.

L'inserimento dei dati di nuovi apparecchi può avvenire tramite caricamento dei file nei suddetti formati o digitazione manuale delle intensità luminose emesse lungo le diverse direttrici, con un grado di precisione scelto volta per volta dal progettista.

Le uscite che Lumen Micro è in grado di fornire sono le seguenti:

- valori di illuminamento orizzontale su una griglia disposta sul piano di lavoro o su qualsiasi altro piano parallelo al pavimento;
- valori di illuminamento verticale sulle 4 direzioni cardinali, su una griglia disposta sul piano di lavoro o su qualsiasi altro piano parallelo al pavimento; la griglia può essere disposta anche su piani verticali, purché coincidenti con piani fisici, quali pareti, partizioni, superfici di arredi, ecc.
- valori medi e coefficienti di uniformità relativi alle grandezze di cui sopra;
- curve isolux su piani orizzontali e verticali, purché coincidenti con piani fisici, quali pareti, partizioni, superfici di arredi, ecc.

- probabilità di comfort e prestazioni visive relative;
- visione tridimensionale dell'ambiente con rendering grafico in bianco e nero: la tonalità di grigio corrisponde alla radianza della superficie in quel punto, ovvero alla sua luminanza secondo le ipotesi di comportamento lambertiano dei materiali adottate dall' algoritmo di calcolo;
- visione dinamica dell'ambiente secondo percorsi di osservazione stabiliti dal progettista.

Lumen Micro è interfacciabile con sistemi CAD, poiché genera ed importa file in formato DXF.

Alla luce di quanto detto in precedenza, possiamo schematizzare i motivi della scelta del software di riferimento, come segue:

1. precisione dell'algoritmo di calcolo, verificata confrontando i valori emersi dalla simulazione con quelli rilevati con la strumentazione da campo;
2. possibilità di simulare l'ambiente in condizioni illuminotecniche variabili a complessità crescente, cambiando i materiali, il tipo di illuminazione ed inserendo pannelli divisorii;
3. totale apertura del data base degli apparecchi illuminanti.

3.2 La versione 7.1 di Lumen Micro

Per quanto riguarda la nuova versione di Lumen Micro (la 7.1), c'è da dire che le caratteristiche fondamentali che la differenziano dalla versione precedente riguardano:

- l'ambiente all'interno del quale esso lavora, ambiente Window anziché DOS;
- la possibilità di ricostruire ambienti all'aperto;
- l'ampio data-base degli apparecchi d'illuminazione (16.000 elementi contro i 5 della versione precedente), rimasto accessibile come nella precedente versione;
- la possibilità di utilizzare direttamente i file CAD senza la necessità di interfacciarli tramite un formato DXF.

E' possibile però riscontrare, relativamente alle suddette caratteristiche, alcuni nei di cui di seguito si parla brevemente.

- 1) Nelle simulazioni fatte in ambienti esterni il programma tiene conto, nella ricostruzione delle isolux, solamente delle componenti dirette provenienti dai proiettori installati e non contempla alcun tipo di riflessione.

Da questo punto di vista le semplificazioni operative del nuovo programma per lavorare in siffatti ambienti risultano essere fortemente

penalizzate dalle grosse discrepanze che si riscontrano con i risultati provenienti dagli ambienti reali.

Infatti tutte quelle radiazioni luminose che in condizioni reali provengono da fonti dirette circostanti, dalla riflessione dell'illuminazione urbana ad opera di un cielo nuvoloso o da quella proveniente da edifici adiacenti al contesto in esame non vengono prese in esame nella simulazione.

La validità delle dette ricostruzioni, pertanto, diviene tanto maggiore quanto più i contesti reali considerati escludono, o meglio accettano come trascurabili, i fenomeni di riflessione, cosa che accade ad esempio nell'illuminazione stradale.

- 2) L'importazione diretta di file CAD se da una parte semplifica la prassi d'importazione stessa dall'altra rallenta enormemente i passi di elaborazione a causa della grande quantità di dati che spesso un file CAD non ben ripulito si porta appresso.

3.3.1 Applicazione del metodo

Scelto un software di comprovata attendibilità per la simulazione di ambienti interni, si ricostruisce il sito da illuminare che diviene per così dire inserito all'interno di una grande stanza.

La stanza avrà ovviamente delle dimensioni *molto maggiori* di quelle del sito stesso. Ciò ai fini della *minor influenza* sulle condizioni luminose locali.

Infatti come si vedrà in seguito non essendo possibile impartire un fattore di riflessione zero alle pareti della stanza, pena la non riproducibilità della diffusione luminosa dovuta alle condizioni microclimatiche, segue che la minor influenza locale sul sito si ha creando un grande divario tra le distanze in gioco (sorgente-sito e pareti-sito).

Il primo passo è stato quello di verificare *lo zero* delle due simulazioni, quella in interni e quella in esterni, ovvero che in condizioni identiche e fondamentalmente semplici, queste forniscano gli stessi risultati numerici a parità di input fotometrici.

Intendendo in tal caso per zero il riscontro delle differenze negli algoritmi di calcolo utilizzati dai due software.

Per far ciò è sufficiente riprodurre non l'intero sito illuminato, bensì disporre un reticolo di misura di modeste dimensioni ed illuminarlo con il proiettore di caratteristiche fotometriche note da usare in seguito; il tutto in assenza di qualunque causa di riflessione.

È ovvio che nel caso di un unico software che si proponga di simulare sia ambienti esterni che interni, essendo l'algoritmo di calcolo il medesimo, eventuali scostamenti del risultato saranno da imputarsi unicamente a leggere inesattezze delle geometrie o del posizionamento delle sorgenti luminose.

È stato questo del resto il risultato ottenuto nel caso in studio, in cui nelle dette condizioni ideali si avevano differenze dei valori inferiori all'unità percentuale e comunque inferiori all'errore d'inserzione del luxmetro adoperato per le misure sperimentali (2%).

A tal fine si simula il sito come per un ambiente interno, cercando di riprodurre innanzitutto gli stessi valori di illuminamento di fondo, presente e non eliminabile in qualunque contesto esterno, e successivamente inserirvi le sorgenti luminose scelte.

È qui evidente il ruolo fondamentale che gioca la simulazione di interno al quale si dedica il pressoché totale impegno nella stesura del presente lavoro, dedicando alla simulazione del sito come per esterno una semplice lo spazio sufficiente ad effettuare il confronto con la prima.

Si dà importanza cioè principalmente a far sì che tornino i risultati sperimentali con la simulazione come per interni, in cui la ricostruzione del fondo misurato suscita il maggior interesse in quanto ciò costituisce lo *zero* su cui basare successivamente la simulazione del contesto da illuminare.

L'esito positivo delle conclusioni finali dipende sicuramente da tutta una serie di fattori geometrici e fotometrici di entrambe le simulazioni, ma quella per interni

unitamente al rilievo sperimentale dei risultati, costituisce senz'altro la colonna portante per il raggiungimento del fine proposto.

3.3.2 La ricostruzione del fondo da microclima

La prima simulazione è utile esclusivamente per riprodurre il valore dell'illuminamento medio di fondo dovuto solo alla riflessione diretta del cielo.

Per far ciò si è innanzitutto misurato in maniera sperimentale detto fondo tramite un reticolo disposto al di sopra dell'edificio (a cui appartiene peraltro la parete interessata), dopodiché si è pensato di ricostruire detto fondo disponendo in maniera ed in numero opportuno delle sorgenti di luce a solido fotometrico uniforme (praticamente sferico).

Il fatto di effettuare tali misure su di un piano orizzontale posto in alto anziché sulla parete verticale dell'ambiente in questione, ha il fine di eliminare quei contributi derivanti dalla riflessione imputabile alla nuvolosità presente in cielo e magari non distinguibile ad occhio nudo ed altresì quei contributi dovuti alla diffusione.

Il fondo proveniente dal cielo è stato riprodotto tramite una griglia di sorgenti luminose a solido fotometrico sferico posizionata sulla sommità della scatola chiusa (costituente l'ambiente confinato).

Il valore sperimentale misurato del fondo cielo è stato poi raggiunto variando l'intensità del flusso luminoso delle sorgenti ed i fattori di riflessione delle pareti (i quali sono stati mantenuti volutamente molto bassi).

Si nota qui come la presenza dell'illuminamento di fondo e la necessità di riprodurlo, sia quello microclimatico che quello complessivo, rappresentano quella particolarità che non compare invece nella progettazione di ambienti interni per la cui simulazione in fase progettuale possono essere considerati *ambienti isolati* dal punto di vista illuminotecnico.

Al contrario nel caso d'illuminazione per ambienti aperti qualunque regione a cui si rivolga uno studio illuminotecnico costituisce un ambiente non isolato con le relative conseguenze richieste di maggior attenzione nella stima delle quantità di luce.

In tal caso infatti, e soprattutto per strade a traffico motorizzato, il contributo del flusso luminoso di fondo e quello disperso verso l'alto in caso di sovrastime o imperfezioni progettuali, sono tra loro intimamente collegati nel senso che il non tener conto del fondo conduce indirettamente ad una dispersione di flusso (quello sovrastimato e riflesso) il quale va ad aggiungersi al fondo in un ciclo crescente.

La riduzione di questo fenomeno nella definizione degli obiettivi illuminotecnici risulta un fattore non più trascurabile al fine dell'eliminazione sia di effetti ottici poco piacevoli che di conseguenze energeticamente dispendiose.

3.3.3 La ricostruzione del fondo luminoso complessivo

Questa simulazione è estremamente significativa ai fini della ripetibilità dell'esperimento.

L'ambiente di misura riguarda la parete esterna dell'edificio considerato.

La peculiarità consiste nel fatto che ciò che si tende a ricreare sono le condizioni al contorno di quello che per noi costituisce l'ambiente di misura.

Trattando noi di illuminazione risulta ovvio il considerare per contorno le condizioni luminose di fondo.

L'illuminamento di fondo presente sulla parete, consta di due contributi, quello del cielo, misurato e quello delle sorgenti artificiali al contorno che influiscono in maniera diretta o indiretta sulla parete.

Si può dire peculiare in quanto grazie a questa simulazione si possono ricreare in maniera discriminata due o più ambienti situati in differenti contesti ma *sotto* lo stesso cielo.

Queste sorgenti al contorno, sempre presenti nelle regioni urbane in cui del resto è di maggiore interesse l'applicazione del presente metodo, influenzano spesso in maniera determinante la progettazione illuminotecnica del sito interessato.

Discriminarne quantitativamente il contributo significa quindi riuscire ad eliminare quelle sovrastime che oltreché inutili e dispendiose per quanto

già detto, si rivelano addirittura deleterie dal punto di vista luminoso qualora le superfici interessate siano inserite in un contesto storico, ove l'illuminazione svolge anche un ruolo fondamentale nel mantenimento integrale della realtà culturale in cui le stesse siano immerse.

Dunque il significato di questa simulazione è duplice, nel senso che da una parte costituisce un passo determinante per tenere insieme la globalità storico-culturale del contesto in cui si va ad illuminare, da un'altra parte essa si rivela fondamentale per *rendere ripetibile* il lavoro che ci si propone di realizzare.

Se infatti indichiamo con Ef, Ec ed Es rispettivamente l'illuminamento del fondo complessivo, quello del fondo dato dal cielo e quello derivante dalle sorgenti al contorno, sarà:

$$E_f = E_c + E_s$$

Da cui si evince come, misurati e riprodotti singolarmente i due contributi di fondo, sia possibile risalire all'effettivo valor medio dell'illuminamento che occorre ottenere per l'illuminazione del sito, e quindi all'effettivo valore del flusso luminoso da installare (disposizione degli apparecchi prefissata).

Il ritrovamento della ripetibilità è comunque una conseguenza oltretutto una necessità per ciò che ci si propone di ricavare, ma non è il fine ultimo del presente lavoro, che ricordiamo invece essere, la stesura di un metodo valido per riconoscere l'attendibilità di un software di simulazione illuminotecnica per esterni, il che si traduce nella ricerca di quel margine di scarto che si riscontra tra una simulazione dell'ambiente ed i suoi ritrovati sperimentali quando questi siano stati misurati con apparecchi da campo.

Per far ciò però non ci si è orientati verso quella che poteva essere la ricostruzione più vera delle sorgenti influenzanti il fondo stesso del sito considerato, bensì si è data una distribuzione opportuna di sorgenti con solido fotometrico uniforme, così da riprodurre direttamente il risultato sperimentale del fondo ottenuto sulla facciata.

3.3 Il metodo adottato e la ricerca dell'attendibilità

Il metodo adoperato consiste essenzialmente in *due processi di confronto* successivi.

Il primo avviene tra i risultati sperimentali delle misure di illuminamento effettuate sulla parete esterna considerata e la simulazione del detto ambiente inteso come confinato (simulazione di interni).

Il secondo confronto avviene invece tra la simulazione anzidetta ed una seconda simulazione effettuata con il software per ambienti esterni di cui se ne voglia stimare la precisione tramite il quale quindi si riproduca lo stesso ambiente visto come esterno (simulazione di esterni).

Quello che ci si attende è di poter quantificare quanto più possibile di quanto la simulazione in esterni differisce da quella in interni, riuscendo a darne così una stima della maggiore o minore affidabilità nel caso di suo utilizzo in una progettazione per ambienti esterni.

Resta ben inteso che quanto detto presuppone il prendere come punto di riferimento, e quindi come vero, il risultato ottenuto con la simulazione di interni, cosa questa, come inizialmente accennato, tanto più vera quanto più rispondenti alla realtà sono i dati di input immessi e altresì quanto più vere siano le riproduzioni illuminotecniche delle condizioni al contorno costituenti l'ambiente di misura reale.

Particolare attenzione viene riposta nel contributo da parte del cielo e di sorgenti luminose che anche se esterne al contesto considerato lo influenzano in maniera indiretta (radiazione riflessa) e diretta (radiazione diretta).

Si evince da quanto detto la criticità e l'importanza della simulazione di interni, alla quale viene affidato per così dire l'incarico di *coordinamento* nel riscontro dei risultati attesi.

LA SIMULAZIONE DELL'AMBIENTE IN STUDIO

4.1 La geometria

La geometria dell'ambiente in studio è estremamente semplice e proprio per questo perfettamente ricostruibile.

L'ambiente scelto è una porzione di una delle 4 pareti, al di sopra della balconata di passaggio, del chiostro della facoltà di ingegneria dell'Università "La Sapienza" di Roma.

In particolare la facciata scelta è a ridosso dell'angolo riguardante il Dipartimento di Fisica Tecnica.

Le sue dimensioni sono di metri 5 x 5, ed il reticolo di misure applicato al di sopra di questo è costituito di 4 righe per 4 colonne di ampiezza metri 1 ciascuna.

Ciò ha identificato un numero complessivo di 16 punti di misura in cui il primo è posizionato ad un'altezza di metri 1 da terra e di metri 1 dall'angolo che la parete in studio forma con la facciata del Dipartimento di Fisica Tecnica.

In questa maniera il reticolo così definito risulta circondato da:

- 3 delle 4 pareti del chiostro;
- il pavimento della balconata;
- la volta celeste.

Inoltre la parte superiore del reticolo di misura *vede* porzioni dei corridoi inferiori del chiostro, i cui soffitti (a volta) essendo illuminati con luce indiretta, costituiscono per il reticolo stesso una fonte di luce indiretta e non diretta in quanto nessuno dei corpi illuminanti le volte di questi corridoi sono visti dal reticolo di misura.

Osserviamo del resto che per quanto riguarda l'illuminamento di fondo locale, ovvero che si misura in più rispetto a quello proveniente dalla volta celeste, questo è costituito in gran parte dalla luce indiretta proveniente dal suddetto corridoio, illuminamento che peraltro, come è già stato spiegato, è stato opportunamente riprodotto al di sopra della porzione della parete.

Per quanto riguarda le porte e finestre presenti su tutte e quattro le pareti, queste, essendo tutte dotate di scuri in legno che di notte vengono chiusi, sono state considerate tenendo conto dei coefficienti di riflessione degli scuri stessi.

Dalle misure di luminanza sugli stessi questi sono risultati essere superfici totalmente diffondenti con valori di poco inferiori a quelli dei coefficienti di riflessione delle relative pareti.

Ebbene l'ambiente così descritto è stato simulato come le 4 pareti e pavimento in cemento (che sono le superfici effettivamente viste dal reticolo di misura) unitamente a delle sorgenti luminose (quelle a solido fotometrico sferico di cui si è già parlato) poste a metri 5 al di sotto del pavimento stesso e puntate verso la parete in studio.

Il tutto è stato inserito all'interno di un enorme ambiente confinato, ovvero all'interno di un parallelepipedo di dimensioni 90 x 90 x 100.

Le dette dimensioni sono state appositamente esagerate rispetto a quelle delle pareti che riproducono il chiostro per poter ammettere di aver posto le pareti stesse in condizioni di: dimensioni parete molto minori delle distanze in gioco tra il reticolo e le sorgenti riproducenti il fondo della volta celeste.

Ciò al fine di poter considerare queste sorgenti a distanza teoricamente infinita dal reticolo di misura.

4.2 La sorgente luminosa

L'apparecchio utilizzato è un proiettore ad alogeni Philips QVF 415 L, dotato di ottica di tipo simmetrico a fascio largo.

La potenza del proiettore è di 100 W; il flusso emesso è di 1600 lm.

Tale proiettore è stato installato su supporto mobile telescopico: il puntamento è stato effettuato avvalendosi delle staffe in dotazione all'apparecchio.

La curva fotometrica nel formato utilizzato da Lumenmicro, è riportata a pagina seguente.

Altri dati usati nell'inserimento della curva sono:

- rendimento dell'apparecchio;
- coefficiente di deprezzamento del cavo elettrico;
- coefficiente di deprezzamento del ballast;
- coefficiente di deprezzamento per temperatura esterna;
- coefficiente di deprezzamento della lampada.

I detti coefficienti sono stati inseriti al solo scopo di cercare le condizioni di zero tra le condizioni reali misurate e quelle simulate.

4.3 Caratteristiche fotometriche del sito simulato

L'attendibilità dei risultati forniti dal software illuminotecnico dipende oltre che dalla qualità del modello matematico, dalla precisione con cui vengono individuate le condizioni al contorno.

Per questo motivo è stata prevista un'accurata campagna di misure illuminotecniche, atta ad individuare con precisione i coefficienti di riflessione delle superfici che delimitano l'ambiente.

Si è voluto individuare un metodo di misura, facilmente riproducibile in sede di sopralluogo sul campo, da parte del progettista illuminotecnico.

Per questo motivo è stata utilizzata una strumentazione da campo standard, costituita da un luxmetro ed un luminanzometro.

Avvalendosi degli strumenti a disposizione, si è utilizzato il metodo analitico-sperimentale, che consente di ricavare il coefficiente di riflessione a partire da misure di illuminamento e luminanza, tramite la formula:

$$\rho = \pi L/E.$$

I limiti di validità della formula sono legati al comportamento lambertiano della superficie in esame: le superfici opache rientrano sicuramente in tale ambito, mentre per quanto riguarda le superfici lucide,

sarebbe stato necessario valutare gli errori che tale metodo comporta e le accortezze di misura necessarie per minimizzare tali errori.

I materiali al contorno sono rientrati nelle categorie di materiali opachi (pavimenti in cemento e muri intonacati).

Anzi si può asserire che il *sito è stato appositamente scelto* con i requisiti anzidetti così da poter *ridurre* al minimo gli errori derivanti dalle *semplificazioni di inserimento dei dati fotometrici* che inevitabilmente si commettono in presenza di materiali parzialmente o totalmente riflettenti.

È stato verificato sperimentalmente che sulle superfici citate, il valore della luminanza rilevato dallo strumento non variava in maniera apprezzabile con il punto e con la direzione di misura.

Questo modo di operare ha consentito effettivamente di arrivare, con un'unica misura di illuminamento e di luminanza, al valore del coefficiente di riflessione dei materiali:

Materiali	Illuminamento	Luminanza	Coeff. Rifless. $\rho = \pi * L/E$
Muro Intonacato	556 lux	98 nit	0.51
Pavimento in Cemento	365 lux	45 nit	0.41

- Capitolo 5 –

IL CONFRONTO DEI RISULTATI

5.1 Il metodo del confronto

In questo capitolo sono riportati sia i risultati delle simulazioni effettuate al calcolatore che quelli desunti dal confronto degli stessi con i valori sperimentali misurati in campo.

Di quelli calcolati occorre inoltre distinguere tra i risultati contemplanti il fondo e quelli che invece non lo riproducono.

Alla fine dello stesso capitolo sono altresì riportati due grafici che danno gli andamenti dell'illuminamento di fondo proveniente esclusivamente dalla volta celeste nelle due situazioni limite:

- cielo totalmente chiaro
- cielo totalmente coperto

Si ribadisce qui l'importanza del detto fondo il quale fornisce il punto di partenza comune a sperimentatori diversi che in diversi contesti al contorno vogliono effettuare misure all'esterno.

In tal caso infatti l'illuminamento di fondo "celeste" dev'essere preso come riferimento iniziale.

È per questo motivo che nelle schede dei confronti che seguono, nelle diverse configurazioni, sono riportati i valori di fondo della volta celeste riprodotti al calcolatore.

Le configurazioni sono 4 in funzione di 4 distanze del proiettore dalla parete:

- 1,5 metri
- 5 metri
- 7 metri
- 10 metri

Le condizioni di cielo scelte sono anche 3:

- cielo Chiaro
- cielo chiaro con Luna (piena)
- cielo totalmente Coperto

Il totale delle configurazioni risulta essere quindi pari a 9.

Sono dunque presenti 12 configurazioni di confronto tra i risultati sperimentali e quelli simulati in queste configurazioni.

Inoltre sono presenti altre 12 schede di confronto tra i risultati misurati e quelli calcolati *in assenza* di riproduzione del fondo luminoso in realtà presente.

Ciò è stato fatto con lo scopo di evidenziare ciò che accade dal punto di vista *errori* all'interno di quei progetti effettuati con il supporto di simulazioni in cui l'illuminamento di fondo non venga tenuto in considerazione.

Le schede di Confronto risultano essere quindi 24 in tutto disposte nel seguente ordine:

1) Cielo Chiaro

Distanza metri 1,5 con fondo riprodotto

Distanza metri 1,5 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 5 con fondo riprodotto

Distanza metri 5 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 7 con fondo riprodotto

Distanza metri 7 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 10 con fondo riprodotto

Distanza metri 10 con fondo NON riprodotto

2) Cielo chiaro con LUNA (piena)

Distanza metri 1,5 con fondo riprodotto

Distanza metri 1,5 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 5 con fondo riprodotto

Distanza metri 5 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 7 con fondo riprodotto

Distanza metri 7 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 10 con fondo riprodotto

Distanza metri 10 con fondo NON riprodotto

3) Cielo totalmente Coperto

Distanza metri 1,5 con fondo riprodotto

Distanza metri 1,5 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 5 con fondo riprodotto

Distanza metri 5 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 7 con fondo riprodotto

Distanza metri 7 con fondo NON riprodotto

Distanza metri 10 con fondo riprodotto

Distanza metri 10 con fondo NON riprodotto

Sono altresì riportati i risultati di calcolo delle simulazioni effettuate con Lumen Micro 7.1 nella sequenza:

- Solo Fondo
- 1,5 metri con fondo
- 1,5 metri senza fondo

- 5 metri con fondo
- 5 metri senza fondo
- 7 metri con fondo
- 7 metri senza fondo
- 10 metri con fondo
- 10 metri senza fondo

Detta sequenza vale per ognuna delle 3 condizioni di cielo: chiaro, con luna e coperto.

5.2 Gli errori nei risultati

E' noto che nell'accingersi ad effettuare una serie di misurazioni, il cui risultato numerico, la misura, costituisce il materiale su cui poi basare quanto si vuole raggiungere, è d'obbligo tener conto di alcune oscillazioni rispetto al valore nominale ricavato, oscillazioni dovute all'influenza, variabile, delle condizioni al contorno dell'ambiente considerato.

Il valore massimo delle suddette oscillazioni costituisce l'errore delle misure ottenute.

L'errore stabilisce l'attendibilità delle misure.

Gli errori che in fase di misurazione possono influenzarne il valore sono molteplici, ma riconducibili a due classi fondamentali:

- errori sistematici
- errori casuali

I primi sono dovuti alle variazioni delle condizioni ambientali quando ci si propone di ripetere la misura, mentre i secondi sono da imputarsi alla presenza dell'operatore che si accinge ad effettuare la misura stessa.

Esiste poi un altro tipo di errore da considerare in fase di riporto dei risultati ottenuti. L'errore d'inserzione, non stimabile dall'operatore ma il cui valore è noto in quanto viene fornito dalla casa costruttrice dello strumento stesso.

Nonostante le diverse accortezze che viene seguita in ogni misura, questa è caratterizzata quindi da numerose componenti che dipendono da cause che possono produrre errori durante il processo di misurazione.

Alcune componenti hanno carattere statistico e possono essere ridotte ripetendo, in condizioni stabili, la misurazione un numero conveniente di volte.

Altre componenti sono invece più difficilmente eliminabili in quanto derivanti dalla natura del processo di misura o dalla incertezza del riferimento metrologico, ovvero dalla taratura della strumentazione o da grandezze dipendenti dalle condizioni ambientali esterne.

Ebbene all'interno di una simulazione illuminotecnica che voglia riprodurre un ambiente reale, degli anzidetti errori è possibile minimizzare quelli relativi alle condizioni ambientali e quello relativo all'influenza dell'operatore (la cui influenza è notevole soprattutto nel caso di misure in campo) con particolari accorgimenti.

Risulta invece totalmente oscuro l'errore intrinseco al software stesso, cosa che invece non accade per uno strumento di misura poiché come già detto l'errore intrinseco allo strumento, l'errore d'inserzione, viene fornito con lo strumento.

Infatti in caso di simulazione, lo strumento utilizzato da cui ci si aspetta un risultato è un software, di cui non è noto l'errore commesso dall'algoritmo da questo utilizzato.

Per quanto attiene agli errori dovuti all'ambiente in cui è immerso il sito ove vengono effettuate le misure, è bene sottolineare che l'influenza da questo esercitata nel caso di luoghi esterni è molto maggiore rispetto a quella che si riscontra nelle misure di un sito appartenente a un ambiente chiuso.

Quanto detto è intuibile pensando alle riflessioni provenienti dalle regioni circostanti e alla radiazione luminosa di fondo da parte del cielo, di cui tenerne in considerazione gli effetti è particolarmente delicato e sotto certi aspetti complessi rispetto a quanto non sia per misure in interni, ove dette influenze sono più facilmente eliminabili.

Nel caso di simulazione di ambienti esterni quindi, *isolare* l'ambiente analogamente a quanto si può ottenere da un ambiente chiuso, significa stimare il contributo dovuto alla luminosità del cielo e quello proveniente dalle sorgenti al contorno (dirette o riflesse).

5.2.1 Errori nell'immissione dei dati

Questi possono derivare essenzialmente da quattro differenti input richiesti dal software nella fase di inserimento dati. Sono:

- 1) caratteristiche geometriche dell'ambiente;
- 2) caratteristiche di riflessione dei materiali;
- 3) solidi fotometrici degli apparecchi;
- 4) fattori di deprezzamento degli apparecchi e delle lampade.

Inoltre nel caso di illuminazione di esterni è presente un quinto fattore determinante ai fini della riduzione di errori nella fase di immissione dati.

Questo è la:

5) capacità del software di ricreare le condizioni di zero

ovvero la possibilità che da il software all'operatore di ricreare il fondo luminoso, sempre presente all'esterno, che spesso può influenzare in maniera non trascurabile i risultati finali.

Per quanto riguarda il punto 1 si comprende come l'unica possibilità di errore è costituita dall'impossibilità del software di trattare superfici ad orientamento qualunque (volte, obliquità di soffitti, etc.).

Nel nostro caso data la semplicità dell'ambiente (pareti ortogonali tra loro) questo limite non ha influenzato la corrispondenza con la realtà.

L'errore di cui al punto 3 dipende dall'accuratezza di misura e di rappresentazione dei dati forniti dal costruttore (si ipotizza che sia trascurabile) e successivamente dalla cura nella loro immissione nel

software. Nel nostro caso anche questo errore è ininfluenza poiché il solido fotometrico è stato inserito tramite matrice numerica fornita dal costruttore dell'apparecchio (curve C - γ in matrice).

Per quanto riguarda l'errore dovuto all'inserimento dei coefficienti di riflessione (punto2), questo è di difficile valutazione e nella maggior parte delle volte addirittura incontrollabile come quando il progettista vi assegna dei valori senza ricorrere a misure strumentali.

Infatti in questo caso l'errore dipende unicamente dall'esperienza e dalla sensibilità del progettista. Inoltre qualora ci si trovi in presenza di materiali lucidi, il compito è ancora più difficoltoso in quanto si riscontra che a parità di coefficiente di riflessione il materiale lucido tende ad essere valutato come più riflettente. Invece in caso di sua valutazione tramite strumentazione, più le caratteristiche di riflessione del materiale sono direzionali e maggiore è l'errore che deriva da un eventuale imprecisione di misura della luminanza.

Nota la pesante influenza di tale tipo di errore, sarebbe interessante trovare la relazione che intercorre tra l'errore di input e l'errore di output, ovvero come l'errore di valutazione delle riflettanze dei materiali incide sui valori di illuminamento forniti dal software.

È bene dire subito che non è possibile trovare un'espressione matematica che esprima tale fenomeno in quanto intervengono molte variabili come fattori di pesatura nel suddetto rapporto di causa-effetto.

È ovvio che se l'illuminazione fosse idealmente di tipo diretto, l'errore di valutazione sui coefficienti di riflessione non avrebbe nessun effetto sul risultato finale, mentre se la luce arrivasse sul piano di lavoro solo dopo

una serie di riflessioni l'errore avrebbe conseguenze molto pesanti sui risultati.

Del resto, nel nostro caso in studio, è per questo motivo che le *condizioni di zero* tra le simulazioni e la realtà da simulare sono state ottenute da una configurazione base semplicissima, che prevede la misura su di un piano orizzontale (per terra e su di una vasta area aperta) dell'illuminamento (reticolo 4 x 4) prodotto dall'apparecchio scelto, posto a 1,5 metri dal reticolo.

Infatti in questa maniera, essendo praticamente nulla la radiazione riflessa, è stato possibile *tarare* il proiettore agendo sui fattori di deprezzamento fino a far sì che i valori di illuminamento simulati coincidessero con quelli reali.

Da qui si è proceduto al confronto dei risultati reali e simulati certi così che eventuali altre divergenze dai valori reali non siano da attribuirsi agli input del solido fotometrico o a fattori di deprezzamento (punti 3 e 4).

L'errore connesso alla definizione dei coefficienti di riflessione è legato alla sola componente riflessa dell'illuminazione.

Per quanto riguarda il punto 4, si può ritenere nullo l'errore da imputarsi alle differenze tra il solido fotometrico reale e quello immesso come input ed altrettanto nulli i valori di deprezzamento della lampada poiché nuova e degli altri parametri appartenenti al sistema elettrico poiché appositamente variati al fine di far coincidere i valori di illuminamento reali-simulati (la riduzione apportata corrisponde al 38 %).

Il punto 5 ha un'importanza particolare. Infatti basti pensare che a prescindere da eventuali fonti luminose al contorno dell'area interessata, su di essa è costantemente presente il fondo proveniente dalla volta

celeste che va da valori trascurabili di 0,05 lux a valori anche di 1 lux in centri storici di grandi città dotate di una valida illuminazione pubblica.

Si comprende da ciò come essendo i valori di illuminamento previsti dalla UNI 10439 compresi attorno ai 10, 12 lux, la non considerazione del fondo luminoso presente a cielo coperto costituisce una fonte non trascurabile di errore che deriva da inesattezze nell'immissione dati.

Ebbene questo problema è stato risolto nel presente caso in studio ricostruendo opportunamente detto fondo così come già descritto nei paragrafi precedenti, eliminando in tal modo le cause di errore che ne sarebbero derivate.

5.2.2 Errori dell'algoritmo

Lo studio ha coinvolto un complessivo di 24 confronti utili derivanti da 15 configurazioni.

Per l'esattezza si sono individuate 3 condizioni di cielo, chiaro, chiaro in presenza di luna piena e nuvoloso, per ognuna di queste è stato rilevato e ricostruito al calcolatore il fondo e successivamente sono stati rilevati e ricostruiti i valori di illuminamento corrispondenti a 4 differenti distanze del proiettore dalla parete, ovvero rispettivamente a metri: 1,5; 5; 7 e 10.

Per questo risultano $12 + 3 = 15$ configurazioni (di cui le 3 sono di base per considerare il fondo ma non utili ai fini dei confronti), inoltre poiché ciascuna configurazione è stata confrontata anche in assenza di ricostruzione simulata del fondo luminoso, realmente presente in condizioni reali ma non considerato dai software di simulazione illuminotecnici per esterni, si ha in tal modo l'insieme di 24 confronti utili.

È fondamentale considerare che delle 4 distanze proiettore – parete, la prima (1,5 metri) è stata scelta in quanto in questa i contributi di radiazione riflessa sulla parete sono dovuti a riflessioni successive almeno alla seconda, causate peraltro da pareti al contorno con coefficienti di riflessione che rinviano ogni volta meno della metà dell'energia luminosa incidente.

Ciò è stato fatto per ricreare in questa configurazione quanto più possibile condizioni di radiazione diretta.

Sulla base di ciò e relativamente ai risultati è possibile studiare l'andamento del livello di precisione in termini di discostamento dai valori misurati.

Inoltre da quanto detto nel paragrafo 6.2.1 gli errori di calcolo compiuti dall'algoritmo sono da imputarsi alla stima della componente di riflessione effettivamente presente. Ciò se come detto si riesce a rendere il calcolo indipendente dalle inesattezze della geometria, solido fotometrico e fattori di deprezzamento.

Non è infatti possibile prescindere la previsione della percentuale di errore connesso al calcolo dalla dipendenza di tale errore dalla quantità di radiazione luminosa diretta rispetto a quella totale.

È bene dire che il livello di errore non dipende solo dalla quantità di energia che raggiunge il punto di misura dopo essere stata riflessa da altre superfici, ma anche dal numero di riflessioni necessarie affinché ciò avvenga.

Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che il software non può considerare un numero infinito di riflessioni, a causa della potenza di calcolo e del tempo necessari. Ma questo non costituisce un problema quando l'energia diretta o di prima riflessione raggiunge la superficie da illuminare (strada) essendo il contributo delle riflessioni successive trascurabili, ma influenza in maniera apprezzabile i risultati quando la strada, ad esempio un corso principale, si trova compresa tra due lunghe file di edifici molto alti, tra i quali la luce rimbalza ripetutamente prima di dirigersi verso la volta celeste.

Questo effetto poi è notevolmente accentuato nel caso in cui il punto di misura si trovi compreso all'interno di una zona d'ombra, ove la componente diretta è praticamente nulla.

Ma questo caso è fortunatamente da escludere quando si tratta di illuminazione stradale e al contrario appositamente creato nel caso di illuminazione artistica.

5.3 Risultati delle simulazioni

Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati numerici, in matrice, delle simulazioni riproducenti le configurazioni reali.

In sequenza si hanno:

- 4 simulazioni che riproducono i valori di illuminamento derivante dalle 4 differenti posizioni del proiettore (1,5, 5, 7 e 10 metri) nelle quali *non* è stato riprodotto alcun fondo luminoso;
- 15 simulazioni, di cui 3 riproducono esattamente (volutamente) le condizioni di fondo luminoso misurato con le tre condizioni di cielo (chiaro, con luna piena e coperto) e 12 riproducono le 4 posizioni assunte dal proiettore in ciascuna delle 3 condizioni di cielo.

Il totale è di 19 schede numeriche ciascuna contenente altresì il valore medio, minimo e massimo del reticolo riportato.

5.4 Risultati dei confronti reali - simulati

Sono di seguito riportati i risultati numerici del confronto tra le simulazioni ed i valori reali delle misure di illuminamento.

Ciascuna scheda contempla una matrice di 16 allocazioni, pari al numero di punti di misura.

Ogni allocazione contiene 4 numeri:

- il valore della singola misura;
- il valore della simulazione corrispondente;
- il valore della differenza dei due sopra;
- il valore percentuale della suddetta differenza (rapportata alla misura reale).

È inoltre riportato in ciascuna scheda il valore dell'illuminamento medio misurato e simulato e dell'errore relativo.

È comunque presente una legenda di riepilogo su ciascun foglio. Complessivamente sono presenti 24 confronti come descritti al paragrafo 5.1.

I grafici riportati a fine paragrafo, infine, che costituiscono peraltro il contenuto essenziale del lavoro, mostrano l'andamento dell'errore, compiuto dal software rispetto ai valori reali di illuminamento misurati sulla superficie considerata, in funzione della distanza proiettore - superficie illuminata.

In questi si è voluto altresì mostrare come contribuisce all'errore il non riportare nella simulazione il fondo luminoso in realtà presente in

ogni contesto urbano ad opera delle condizioni di nuvolosità del cielo e delle eventuali sorgenti luminose presenti nei pressi del sito.

A tale scopo il suddetto errore è stato considerato in 3 condizioni limiti di cielo:

- chiaro
- totalmente coperto

avendo escluso nelle presenti considerazioni il caso in cui ci si trovi in presenza di luna nuova in quanto effetto di scarsa rilevanza sia temporale (dura circa 3 giorni) che numerica.

Inoltre aggiungiamo che il contributo al fondo luminoso complessivo (quello del cielo e quello delle sorgenti circostanti) nella maggior parte dei casi è da imputarsi in prevalenza alle sorgenti luminose nell'intorno del sito (con cielo nuvoloso si raggiungono al massimo i 0.8 lux contro i 3 riscontrabili su una strada non direttamente illuminata).

Per questo motivo ricordiamo che nel presente lavoro è bene porre l'attenzione fondamentalmente sull'andamento dell'errore, a cui successivamente è possibile aggiungere commenti sul contributo all'errore operato da parte del fondo, il quale però si aggiunge in maniera puramente algebrica, ovvero non intervenendo come causa di modifica dell'andamento stesso.

Infatti dai grafici si evince immediatamente come in entrambe le due condizioni di cielo (Chiaro e totalmente Coperto), l'errore commesso dal software diventi fortemente divergente ad una distanza superiore ai 6,5 metri, giungendo fino a valori dell'ordine del 50% già alla distanza di 10

metri, la quale ricordiamo essere quella effettivamente in gioco nella maggior parte delle altezze dei pali adoperati nell'illuminazione pubblica.

La **Fig.1** mostra un confronto diretto dei due andamenti dell'errore nei casi di cielo Chiaro e Coperto, quando nelle rispettive simulazioni non sia stato riportato il fondo, in cui si notano valori dell'errore maggiori nel caso di Cielo Coperto avendo, il relativo caso reale, dei contributi ad opera del fondo che ovviamente non sono stati riportati.

Sottolineiamo ancora che nelle comuni simulazioni il fondo non è riportato mentre nelle misure reali (rispetto alle quali l'errore è calcolato) questo è presente.

Quindi la **FIG.1** mostra un andamento dell'errore del tutto simile nelle due diverse condizioni di Cielo a meno del contributo del fondo luminoso reale che è maggiore nel caso di Cielo Coperto.

Invece quello che potrebbe apparire come una discordanza rispetto a quanto appena detto lo si osserva nel confronto dell'errore ricavato nelle stesse due condizioni di cielo quando però il fondo luminoso venga riportato (Fig.2).

Infatti nel caso di cielo coperto si osserva un calo del suo valore massimo (a 10 metri), che passa dal 56% al **40%** rispetto ad un calo di quello relativo alle condizioni di cielo chiaro, dove l'errore passa dal 51% al 45%, ovvero ad un valore superiore a quello riscontrato in condizioni di cielo coperto.

Ciò è spiegabile sulla base del fatto che riportando l'effetto di una volta celeste totalmente coperta, si innesca un effetto di integrazione luminosa su tutte le superfici ad essa sottostanti (tipo sfera di Ulbrich) e la

cui riproduzione simulata va a colmare o meglio a nascondere quelle differenze d'illuminamento tra valori reali e simulati.

In altri termini la radiazione emessa dalle sorgenti luminose sferiche e simmetricamente distribuite nella simulazione, riproducenti la luminosità diffusa del cielo coperto reale, vanno a *mimetizzare*, con un effetto integrale, le deficienze del software di riprodurre la radiazione riflessa sul sito, che costituisce del resto il motivo principe dell'errore ed oggetto essenziale del presente studio.

I grafici **FIG.3** e **FIG.4** evidenziano maggiormente gli effetti del fondo quando questo venga riportato o meno nelle singole condizioni di Cielo.

Dai grafici suddetti si può ad esempio osservare che l'errore commesso nelle fasi iniziali di una progettazione illuminotecnica, ovvero di stima dei flussi luminosi da installare, è trascurabile nel caso in cui si abbia a che fare con strade quali raccordi anulari, dove la radiazione riflessa è pressoché inesistente, cosa tutt'altro che vera per grandi strade urbane delimitate da alti palazzi causa del fenomeno della riflessione. In tal caso infatti il non considerare questo contributo comporterebbe errori di sovrastima dei flussi luminosi installati dell'ordine del 50% per distanze proiettori – strada pari a 10 metri.

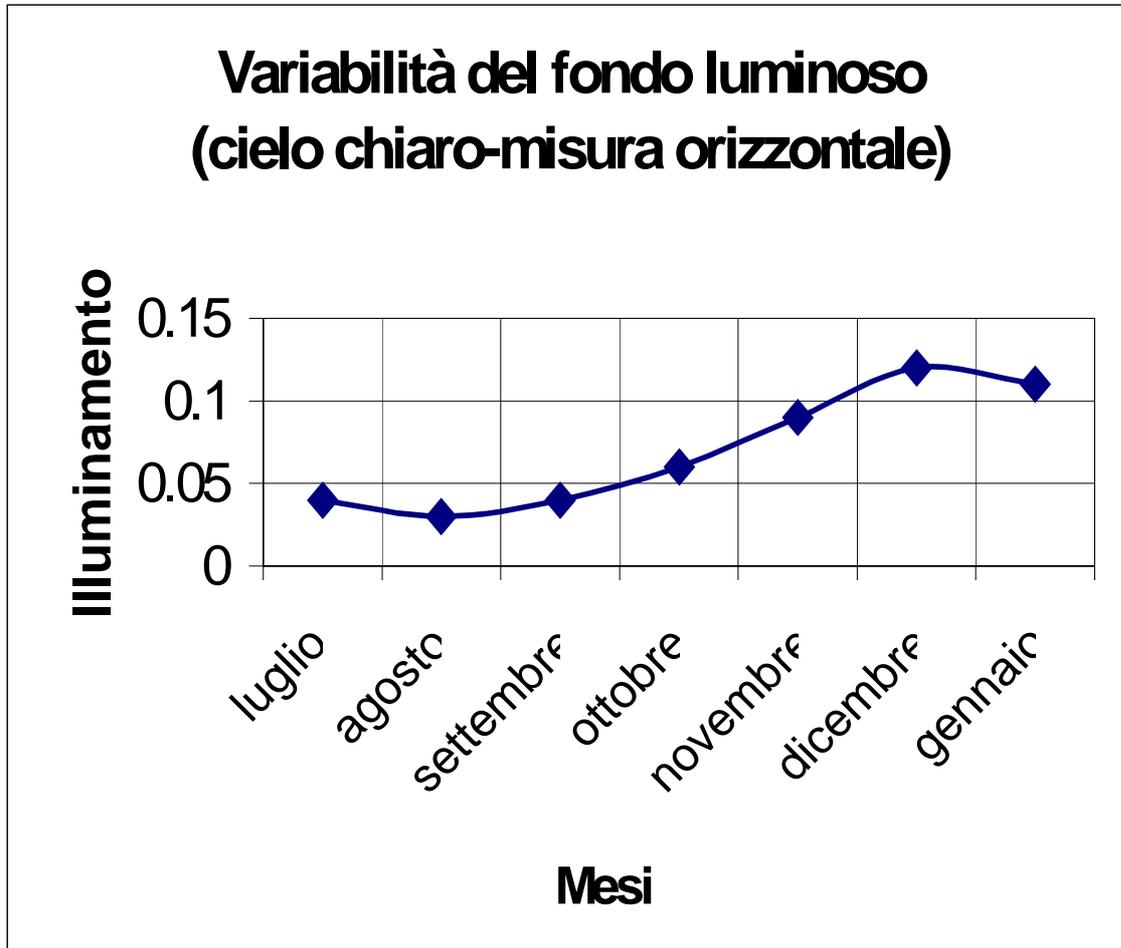
È bene inoltre ricordare a tal punto che tutto quanto fin qui dimostrato ha valore relativamente all'uso di un software, Lumen Micro 7, che per quanto utilizzi un algoritmo affetto dagli esposti errori nella stima della radiazione riflessa, detta stima sia tuttavia pur sempre contemplata al suo interno. La qual cosa infatti, vera per il

software usato nel presente lavoro, non lo è invece per molti software utilizzati per progettazione illuminotecnica di ambienti esterni i quali non solo non contemplano la possibilità di immettere valori approssimativi del fondo luminoso, ma neppure i contributi della radiazione riflessa pesantemente incidenti nell'illuminazione pubblica dei centri urbani.

Si rimarca ancora una volta che quanto esposto ha lo scopo di richiamare l'attenzione sui flussi luminosi installati ad impianto nuovo. Ciò significa che i cali di illuminamento naturalmente dovuti ai deprezzamenti nel tempo di apparecchi e lampade non contraddicono quanto fin'ora detto, essendo ciò oggetto di studio di metodi di manutenzione e del loro rispetto.

Andamento del fondo luminoso

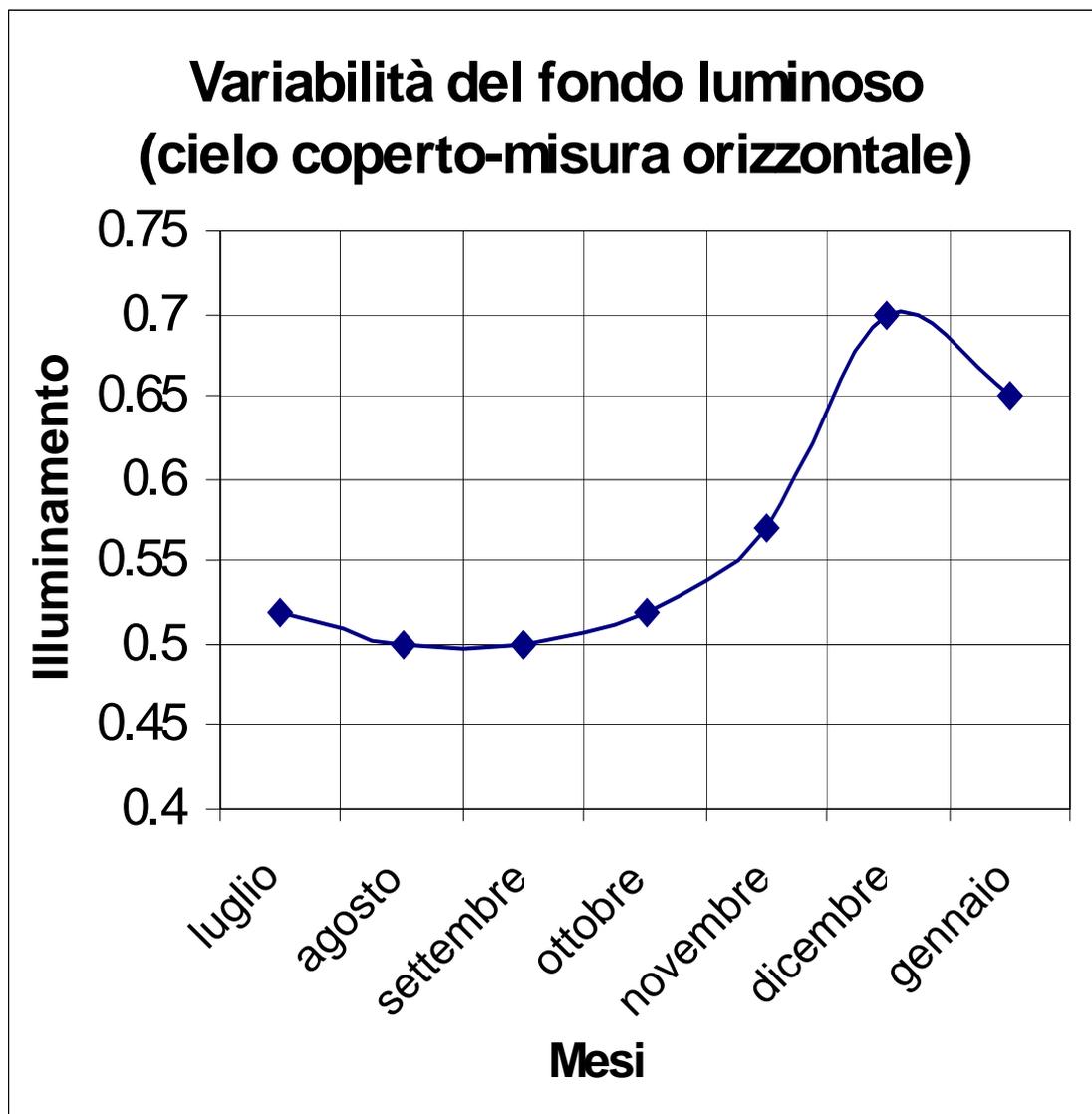
Cielo CHIARO



- I punti di misura di una griglia 2x2 hanno riportato lo stesso risultato numerico.
- Misura su piano Orizzontale.
- In assenza di sorgenti luminose circostanti (quelle lontane non sono viste dalla testa fotometrica).

Andamento del fondo luminoso

Cielo COPERTO



- I punti di misura di una griglia 2x2 hanno riportato lo stesso risultato numerico.
- Misura su piano Orizzontale.
- In assenza di sorgenti luminose circostanti (quelle lontane non sono viste dalla testa fotometrica).

Conclusioni

Lo sviluppo degli algoritmi di calcolo che siano in grado di fornire risultati precisi relativamente ad ambienti realistici risale agli ultimi anni così come del resto recente è la storia dei software dedicati alla progettazione.

Da un lato si può dire che l'illuminotecnica stessa è una scienza che solo da poco sta definendo le grandezze tramite cui definire il comfort ed i relativi metodi di misura.

D'altro canto l'illuminotecnica è stata fino ad oggi ostaggio dei produttori, unici soggetti realmente interessati allo studio ed alla diffusione di software di simulazione.

A questo si può rispondere dicendo che oggi stanno arrivando sul mercato programmi interessanti, ma con molti limiti, alcuni legati solo alla potenza di calcolo degli elaboratori, quali l'impossibilità di trattare superfici ad orientamento qualunque, altri alla difficoltà di rappresentare in forma matematica alcuni meccanismi di diffusione della luce, quali il comportamento di riflessione delle superfici.

Certamente risposte a questi problemi deriveranno da studi e ricerche in merito, ma l'utilizzo del calcolatore richiederà sempre un approccio critico verso i risultati forniti.

Ed è proprio un metodo all'approccio critico del problema che con il presente lavoro si è voluto dare una indicazione, metodo proposto che ci si augura possa costituire un punto di

partenza per uno sviluppo futuro, innanzitutto allargando la piattaforma sperimentale al fine di fornire un maggior supporto alle relazioni di causa – effetto che si è cercato di individuare.

Il metodo viene applicato essenzialmente tramite i 2 passi successivi:

- ridurre ad uno solo il numero dei parametri causa di errori di immissione dati (nel nostro caso i coefficienti di riflessione) minimizzando quelle imputabili ad altre (es. solido fotometrico);
- studiare i risultati forniti dal calcolatore al variare dell'influenza della suddetta causa (nel nostro caso aumentando la componente riflessa a discapito di quella diretta).

Il metodo è poi applicabile in fasi successive variando le cause di errore nell'immissione dati e riscontrando le relative variazioni degli errori commessi dal software.

In tal modo è possibile ridurre drasticamente il numero di variabili necessarie per lo studio del problema in questione mantenendo così sotto controllo la risposta del software alla singola causa di errore.

BIBLIOGRAFIA

M. Bonomo, R. Buccianti, *Guida tecnica per l'illuminazione degli interni*, Enel CESI.

Commission Internationale de l'Eclairage, Publication n° 13.2, *Method of measuring and specifying colour rendering of light sources*, 2nd edition, corrected reprint, 1988.

Commission Internationale de l' Eclairage, Publication n° 18, *Principles of light measurements*, 1970.

G. Aghemo, M.Filippi, *La verifica dell'ambiente luminoso, problemi di rilievo ed elaborazione dei dati*, Atti del convegno nazionale AIDI "Luce e qualità della vita", Torino, 1994.

F. Bianchi, G. Pulcini, *Manuale di illuminotecnica*, NIS, Roma 1995.

F. Bianchi, *L'architettura della luce*, ed. Kappa, Roma 1992.

Commission Internationale de l' Eclairage, Publication n° 29.2, *Guide on interior lighting*, 1986.

Commission Internationale de l'Eclairage, Publication n°30.2, *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*, 1982.

Commission Internationale de l'Eclairage, Publication n° 38, *Radiometric and photometric characteristic of material and their measurements*, 1977.

Commission Internationale de l'Eclairage, Publication n° 44, *Absolute methods for reflection measurements*, 1979.

Commission Internationale de l'Eclairage, Publication n° 63, *The spectroradiometric measurement of light sources*, 1984.

Commission Internationale de l'Eclairage, Publication n° 70, *The measurement of absolute luminous intensity distribution*, 1987.

D.L. DI LAURA, *On the development of the recursive method for the solution of radiative transfer problems*, Journal of the Illuminating Engineering Society, summer 1992.

McEWAN, BENG and D.J. CARTER, BSc, PhD, MCIBSE, Mclob, *Some approaches to the treatment of obstruction in interior lighting design* - Lighting Research & Technology, vol. 17 n.3, 1985.

N. SVENDENIUS, P. PERTOLA, *Searching for useful lighting design software: developing technical specifications based on real needs*, 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting.

Y. UETANI, K. MATSUURA, *A method of luminance calculation in an anisotropic diffuse reflecting interior*, Journal of the Illuminating Engineering Society, summer 1993.

L. Richard, *Elementi di Illuminotecnica*, AIDI, Milano, 1971.

M. Strada et al., *Comfort visivo*, Progetto Finalizzato Edilizia - Unità operativa "Qualità fisico-tecnica dell'ambiente costruito", 1993.

G. Moncada Lo Giudice, A. De Lieto Vollaro, *Illuminotecnica*, Masson ed. ESA, Milano, 1993.