



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

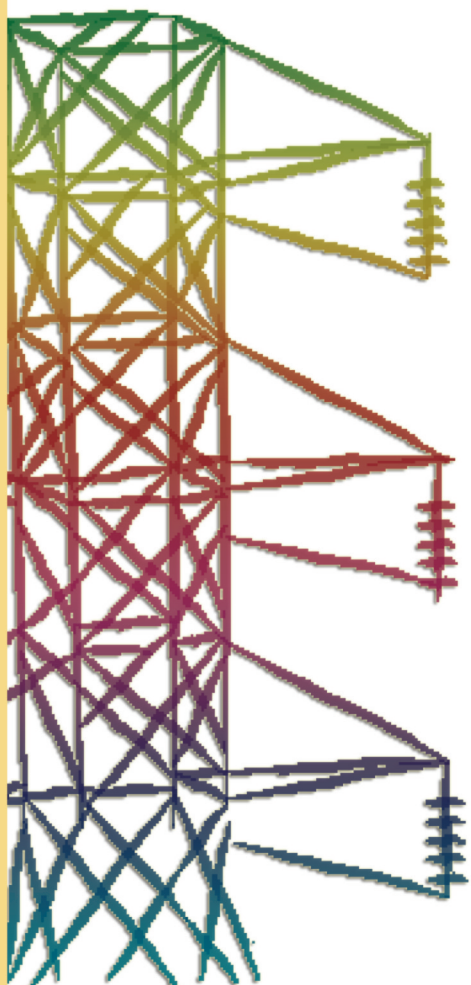
## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

**Integrazione luce naturale/luce artificiale in ambito industriale**

**Parte 5: Protocolli di monitoraggio**

**Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Integrazione luce naturale/luce artificiale in ambito industriale  
Parte 5: Protocolli di monitoraggio

*Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna*

SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA  
Dipartimento di Fisica Tecnica



INTEGRAZIONE LUCE NATURALE/LUCE ARTIFICIALE IN AMBITO INDUSTRIALE  
PARTE 5: PROTOCOLLI DI MONITORAGGIO

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma La Sapienza)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

## Sommario

La presente relazione riporta i risultati della ricerca su diversi argomenti. La relazione è stata suddivisa in 6 parti (e files), corrispondenti ai capitoli.

Parte 1. Analisi dell'ambiente luminoso del capannone AleniaAermacchi

L'analisi è riferita al caso studio nella sua struttura generale, con particolare attenzione all'aspetto dell'illuminazione naturale. I valori di illuminamento e fattore di luce diurna sono studiati tramite simulazioni.

Parte 2. Analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni per l'illuminazione artificiale/naturale

Stato dell'arte sul controllo dell'illuminazione naturale: le funzioni da svolgere, i sistemi di illuminazione diurna ovvero componenti schermanti opache o trasparenti innovativi. Il sistema di illuminazione artificiale: stato dell'arte sulle sorgenti, gli apparecchi, i sistemi di controllo e integrazione con la luce naturale. Aspetti di progettazione architettonica delle applicazioni integrate.

Parte 3. Simulazioni numeriche delle possibili soluzioni per il capannone AleniaAermacchi

Analisi dell'ambiente luminoso del caso studio simulando diverse disposizioni / aree delle superfici finestrate.

Parte 4. Linee guida per la progettazione in interni con presenza di illuminazione naturale e progettazione di massima

Riferite a illuminazione in interni con presenza di illuminazione naturale. Indicazioni per individuare le migliori soluzioni per una progettazione efficiente ed efficace della luce artificiale, che ben si integri con il contributo di luce naturale

Parte 5. Protocolli di monitoraggio

Riferite alla verifica del soddisfacimento dei requisiti normativi, laddove presenti, in funzione delle grandezze fotometriche (illuminamenti, luminanze, colore della radiazione luminosa...) sulle diverse superfici presenti all'interno di uno spazio confinato, da cui si ricavano indici quali valori medi, fattori di luce diurna, coefficienti di uniformità, indici di abbagliamento...

Parte 6. Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi

Sono presentati metodi di calcolo manuali, i modelli in scala e alcuni software di calcolo computerizzato, evidenziandone le diverse caratteristiche a confronto.

**ATTIVITA' DI RICERCA:  
INTEGRAZIONE LUCE NATURALE / ARTIFICIALE  
IN AMBITO INDUSTRIALE**

Nell'ambito del Tema di ricerca 5.4.3.1  
*"Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali",  
di cui all'art 11 del decreto 8 marzo 2006*

ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA

ENEA  
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e  
l'Ambiente

E IL

DIPARTIMENTO DI FISICA TECNICA  
DELLA "SAPIENZA" UNIVERSITA' DI ROMA

**RELAZIONE FINALE**

**PARTE 5**

Roma, Aprile 2009

**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA  
Dipartimento di Fisica Tecnica



## CONTENUTI

<b>CAPITOLO 5. PROTOCOLLI DI MONITORAGGIO</b> .....	<b>3</b>
CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE DI MISURA .....	4
MISURE DI ILLUMINAMENTO .....	6
MISURE DI LUMINANZA .....	7
MISURE DI COLORE E TEMPERATURA DI COLORE .....	8
INCERTEZZA DELLA MISURA .....	9

## Capitolo 5. Protocolli di monitoraggio

Il soddisfacimento dei requisiti normativi, laddove presenti, è legata al controllo e al rilievo di tre grandezze fotometriche:

- Illuminamento sulle diverse superfici presenti all'interno di uno spazio confinato: gli indici ricavati sono l'illuminamento medio, il fattore di luce diurna puntuale e medio, il coefficiente di uniformità di illuminamento e del fattore di luce diurna
- Luminanza delle sorgenti luminose e delle superfici che rientrano nel campo visivo: gli indici ricavati sono rappresentati dai rapporti di luminanza, e quindi dalla distribuzione delle luminanze in ambiente, e dall'indice di abbagliamento (Daylight Glare Index, DGI)
- Colore della radiazione luminosa, o temperatura di colore della luce naturale trasmessa in ambiente dagli elementi trasparenti (o dall'insieme elemento trasparente e schermatura), attraverso gli indici di resa cromatica e temperatura di colore correlata, e colore di una superficie, attraverso il suo coefficiente di riflessione luminosa.

Le operazioni di rilievo sono sintetizzabili nei seguenti punti:

- Riscontro puntuale di usi e funzioni dell'ambiente, ossia definizione delle attività che si svolgono in ogni sua parte con particolare riferimento alle attività o azioni che coinvolgono la visione, la percezione visiva o comunque l'organo della vista;
- Raccolta di dati fisici inerenti all'ambiente che descrivono lo spazio dal punto di vista fisico, con particolare riferimento alla quantificazione di luce diurna disponibile;
- Raccolta di dati di tipo fotometrico, cioè definizione e quantificazione di eventuali fonti luminose, nonché dei fattori di riflessione e trasmissione che delimitano e strutturano lo spazio;
- Raccolta di dati di tipo illuminotecnico, legati alla necessità di caratterizzare l'impianto di illuminazione artificiale;
- Raccolta delle leggi e normative per lo specifico ambito d'intervento.

Dato fondamentale per il monitoraggio è il fattore di luce diurna (FLD), che per definizione è il rapporto percentuale tra il valore d'illuminamento in un punto dell'ambiente per effetto dell'illuminazione globale ricevuta da un cielo di nota distribuzione di luminanza ( $E_i$ ) e il

valore dell'illuminamento che si ha nello stesso istante su superficie orizzontale posta in esterno e schermata dalla radiazione solare diretta ( $E_o$ ):

$$FLD [\%] = \frac{E_i}{E_o} \cdot 100$$

Per ambienti adibiti ad uso ufficio, il valore consigliato deve essere non inferiore all'1%; un valore maggiore indica una predisposizione dell'ambiente all'ottimizzazione dell'impiego della luce naturale, e quindi del risparmio energetico.

Significativa si presenta l'analisi del punto più sfavorito, che può essere considerato come il punto cruciale da considerare per una regolazione della luce artificiale integrata con quella naturale. In questo caso, un valore medio del 2% assicura una condizione ottimale d'illuminamento da luce naturale, nell'ottica del risparmio energetico, ma può introdurre la problematica dell'abbagliamento da luce naturale, e quindi di discomfort visivo, che si esplica in un impiego pressoché costante degli elementi di schermatura interna da parte degli occupanti, che d'altra limita il contatto con l'esterno.

Per esigenze della committenza, non è stato possibile effettuare rilievi per la caratterizzazione delle reali condizioni degli ambienti in studio.

### Caratteristiche della strumentazione di misura

Le misure devono essere basate sull'impiego della seguente strumentazione:

- misure di radiazione solare globale e diffusa su piano orizzontale, più significative in condizioni di cielo coperto, da cui è facilmente ottenibile per differenza il valore di radiazione solare diretta. Le misure di radiazione solare sono generalmente ottenute con radiometri globali a fotodiode, con opportuno campo di misura (espresso in  $W/m^2$ ) e tolleranza (espresso in percentuale sul valore letto), sensibilità spettrale (espressa in nm), uno dei quali opportunamente schermato attraverso apposita banda di occultazione per la rilevazione della radiazione diffusa;
- misure di illuminamento esterno, effettuate su piano orizzontale. L'illuminamento esterno viene generalmente misurato attraverso un luxmetro sistemato in esterno, in posizione non schermata, con adeguato campo di misura (espresso in klux), segnale analogico lineare, e tolleranza (espressa in percentuale sul valore letto), con correzione del coseno e risposta secondo la curva  $V(\lambda)$ , in conformità agli Standard CIE;
- misure di illuminamento interno, effettuate per i 4 orientamenti principali sui piani di lavoro, e per il punto dell'ambiente considerato più sfavorito dal punto di vista



dell'illuminamento naturale, con sonde poste con il sensore in posizione orizzontale. Gli illuminamenti interni vengono generalmente misurati attraverso luxmetri, con opportuno campo di misura (espresso in klux), segnale analogico lineare, e tolleranza (espressa in percentuale sul valore letto), con correzione del coseno e risposta secondo la curva  $V(\lambda)$ , in conformità agli Standard CIE, sistemati in posizione opportuna sul piano di lavoro e a centro stanza per rilevare i valori di illuminamento nella zona più sfavorita, secondo una opportuna griglia precedentemente definita;

- misure di luminanza per le diverse postazioni, con particolare riferimento ai monitor presenti in ambiente (se presenti), alla luminanza del cielo in presenza ed in assenza di elemento schermante, al piano di lavoro come zona di compito visivo. Il luminanzometro utilizzato deve essere uno strumento per misure da campo almeno di classe B, in grado di misurare la luminanza, come valori assoluti, relativi e di picco, secondo un adeguato angolo di apertura e range di misura (espresso in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ). L'accuratezza di misura, la ripetibilità, la risposta spettrale in termini di correlazione con il  $V(\lambda)$  devono presentare valori adeguati.
- misure di trasparenza del vetro.

Gli strumenti di misura sono generalmente costituiti da due elementi principali: la sonda fotometrica, contenente dei sensori fotosensibili che rilevano la grandezza fotometrica per mezzo di segnali elettrici corrispondenti secondo opportuna taratura, e il sistema acquirente, in cui il segnale elettrico corrispondente allo stimolo luminoso viene convertito in segnale digitale (tramite apposito convertitore analogico/digitale) espresso in codice binario ed elaborato e memorizzato tramite personal computer.

Dal punto di vista metrologico, le caratteristiche principali di questi strumenti di misura sono espresse in termini di intervallo e di accuratezza di misura. L'intervallo di misura (o range) è l'intervallo di valori entro il quale può variare la grandezza fisica da misurare affinché il sensore funzioni con le caratteristiche garantite dal costruttore; l'accuratezza di misura è invece la differenza, in eccesso o in difetto, fra il valore effettivo della grandezza fisica e il valore letto e visualizzato dallo strumento. Tale differenza è legata alla calibrazione dello strumento, e viene espressa dal costruttore come valore assoluto nell'unità di misura della grandezza fisica misurata, come percentuale rispetto al valore di fondo scala, come percentuale del valore letto dallo strumento.

La classe di precisione richiesta per la verifica dell'ambiente luminoso è di tipo A, apparecchi caratterizzati da buon grado di precisione: questo significa per i luxmetri un limite di incertezza pari a 5%, per i luminanzometri 7.5%.

Lo spazio necessario per sistemare teste fotometriche, cavi di connessione, sistema di acquisizione dati e tutto quanto necessario per l'effettuazione delle misure deve essere ricavato in zone che non provochino alterazione delle misure in oggetto.

## Misure di illuminamento

Per conoscere il livello di illuminamento e la relativa distribuzione spaziale, necessari per il calcolo del fattore di luce diurna puntuale e medio, è necessario individuare le superfici di interesse, dove collocare i piani di misura (i piani cioè dove generalmente si svolge il compito visivo), e definire una griglia di punti di misura significativa (tanto più fitta è la griglia di punti, tanto più dettagliata è l'informazione e più onerosa però in termini di tempo la misura e l'elaborazione della misura).

Le normative precisano il numero minimo di punti della griglia in funzione delle dimensioni dei locali relativamente all'illuminazione artificiale, ma questo approccio può essere esteso almeno in prima approssimazione al rilievo della luce naturale. Per la normativa, la definizione del numero di punti di misura  $n$  si basa sull'indice del locale  $K$ :

$$K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)}$$

Dove con  $a$  e  $b$  vengono indicate le dimensioni in pianta del locale e con  $h$  l'altezza del locale intesa come distanza tra sorgente e piano di lavoro. In particolare, al variare di  $K$  si determina un diverso valore per  $n$ , secondo quanto mostrato in tabella:

<b>K</b>	<1	1<K<2	2<K<3	>3
<b>n</b>	4	9	16	25

Il numero dei punti che si ottiene deve essere ripartito in maniera omogenea lungo i due lati dell'ambiente, in maniera tale che il rapporto dei lati di ogni modulo della maglia non superi il rapporto 1:2. Le misure di illuminamento vanno effettuate al centro di ciascun modulo della maglia. La media dei dati rilevati costituisce l'illuminamento medio relativo alla superficie in esame.

Per l'effettuazione delle misure occorre posizionare lo strumento con la fotocellula parallela alla superficie esaminata: durante la fase di rilievo in campo, è importante che l'operatore presti attenzione a non schermare la fotocellula con il proprio corpo (ombra portata), falsando il valore letto dallo strumento, né che la luce incida sulla superficie sensibile dello strumento in maniera radente (per angoli di incidenza elevati, la corrispondenza con la curva di correzione del coseno è peggiore).

Prima di effettuare le misure in ambiente, è opportuno che lo strumento si porti in condizioni di regime, e cioè che le cellule si adattino ai livelli di illuminamento presenti: un tempo adeguato varia tra i 5 e i 15 minuti, in funzione dello strumento utilizzato. Le misure vanno effettuate in totale assenza di luce artificiale. Completata la fase di misura e rilievo, è possibile calcolare il corrispondente valore del fattore di luce diurna, e la sua uniformità.

Anche quando risulti problematico ovvero si ritenga superfluo mappare in modo uniforme l'ambiente (ad esempio in presenza di superfici vetrate a nastro), sarebbe comunque opportuno misurare la variazione dell'illuminamento lungo sezioni significative: almeno una sezione longitudinale, lungo la mezzeria del locale, con punti di misura in corrispondenza sia delle finestre che delle pareti opache, in modo da poter apprezzare il rapporto tra spazi illuminati e spazi bui e quindi l'uniformità, e una o più sezioni trasversali, in corrispondenza delle superfici vetrate, in modo da verificare la diminuzione della quantità di luce al progressivo allontanarsi dalla finestra.

Se la finestratura è a nastro, si può anche ridurre il campo di misura ad un'unica sezione trasversale in corrispondenza della sezione mediana della finestra, tralasciando la verifica dell'andamento lungo la sezione longitudinale.

Durante la fase di misura, occorre tener conto della variabilità delle condizioni meteorologiche: la condizione migliore è rappresentata da un cielo coperto in modo uniforme, condizione cui si riferisce la normativa nella definizione del fattore di luce diurna.

Nella fase di misura vanno previsti almeno due luxmetri, per effettuare simultaneamente misure di illuminamento interno ed esterno: in particolare per l'esterno, la misura va effettuata facendo il modo che il sensore sia posto su piano orizzontale, in grado di vedere l'intera volta celeste, in assenza di radiazione solare diretta. In relazione al contributo di luce solare diretta, le condizioni ideali sono quelle di cielo coperto; in presenza di cielo sereno, occorre dotare il luxmetro di un'apposita banda di occultazione per intercettare i raggi del Sole per tutto il corso della giornata, lasciando in ombra la sonda.

L'illuminamento interno va misurato a finestre chiuse e in assenza di elementi schermanti, qualora presenti.

## **Misure di luminanza**

Il luminanzometro consente la misura di valori di luminanza di una superficie, opaca, trasparente o appartenente a una sorgente luminosa: esso fornisce il valore di luminanza rappresentato dalla media delle luminanze della superficie inquadrata. Lo strumento dovrà essere usato per una prima eventuale rilevazione come strumento portatile, e comunque montato su cavalletto per una mappatura della distribuzione di luminanza più precisa: piccoli spostamenti producono infatti differenze che possono essere considerevoli nel valore letto, soprattutto nel caso in cui si stia inquadrando una sorgente luminosa o la sua riflessione su una superficie.

Per conoscere la distribuzione spaziale della luminanza è necessario individuare le postazioni di rilievo. Tale scelta è di fondamentale importanza, dal momento che si indaga sulla luce percepita dagli utenti.

Per una specifica postazione di lavoro, la luminanza viene rilevata puntando verso diverse parti del campo visivo in modo da poter a posteriori verificare se i contrasti di luminanza siano tali da risultare eccessivi e quindi fastidiosi (discomfort visivo) o insufficienti (scarsa

nitidezza della visione, soprattutto nel riconoscimento dei dettagli). In particolare vanno mappati:

- il compito visivo (oggetto da osservare, costituente l'attività da svolgere)
- superfici immediatamente adiacenti al compito visivo
- superfici lontane rispetto al compito visivo (sfondo)
- le sorgenti di luce naturale: superfici trasparenti e parti di volta celeste che attraverso tali superfici risultano visibili.

### **Misure di colore e temperatura di colore**

In relazione ad una radiazione luminosa, la misura viene fatta a distanza, per mezzo di un colorimetro tarato sulla curva di visibilità dell'occhio umano.

La procedura di misura viene effettuata rilevando le coordinate tricromatiche in corrispondenza del baricentro di una superficie vetrata, posizionando lo strumento non a contatto della superficie, ma distante e con la superficie sensibile rivolta verso di essa: in questo modo si può verificare la variazione del colore della luce e della temperatura di colore apportata, rispetto alle caratteristiche della luce naturale, dalle proprietà cromatiche della lastra vetrata.

In relazione alle caratteristiche colorimetriche di una superficie opaca, la misura può essere compiuta sia a contatto, per mezzo di un colorimetro a contatto o di uno spettrofotometro, sia a distanza, attraverso uno spettroradiometro. Con entrambi gli strumenti le misure sono di due tipi:

- coefficiente di riflessione luminosa spettrale e globale, con la valutazione dell'impronta del colore sulla superficie analizzata, cioè il modo in cui la superficie modifica, riflettendola, le proprietà cromatiche della luce incidente
- valori delle coordinate tricromatiche del colore della superficie, espresse in diversi sistemi di riferimento, o in valore assoluto, o come distanza di colore (differenza percentuale) rispetto a un campione colore di riferimento.

Nell'analisi dei risultati della misura, è necessario tenere conto dell'incertezza del valore numerico ottenuto. La sua sottostima, ovvero dimenticanza, può portare ad attribuire ai risultati numerici significati fisicamente scorretti e pervenire a scelte incongruenti con la realtà. In illuminotecnica, i calcoli vengono in genere eseguiti con un'accuratezza che raramente supera il 5%, sia per le difficoltà oggettive di modellazione matematica dell'ambiente illuminato, sia per la scarsa riproducibilità delle caratteristiche degli apparecchi di illuminazione e dei componenti dell'ambiente che influenzano la

distribuzione della luce. Nel confronto tra valori calcolati e valori misurati occorre considerare contemporaneamente ambedue le incertezze prima di esprimere giudizi e valutazioni.

### **Incerteza della misura**

L'incerteza deve essere calcolata seguendo quanto suggerito dalla norma UNI CEI 9, par. 8, tenendo conto della strumentazione usata e del parametro fotometrico misurato. In linea generale, il fatto che la strumentazione soddisfi i limiti imposti dalla normativa per un determinato parametro non implica che si possa trascurare la componente di incerteza associata a quel parametro. Tale incerteza può scomporsi in tre componenti: la prima dipende dalle caratteristiche metrologiche dello strumento impiegato, la seconda dalle caratteristiche dell'oggetto misurato, come la sua instabilità a breve termine o non definibilità, la terza da come sono state eseguite le misure. La valutazione, seppur qualitativa, di ciascuno di questi contributi può essere utile per evitare inutili costi o complicazioni procedurali, quando una componente è troppo sbilanciata rispetto alle altre.