



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

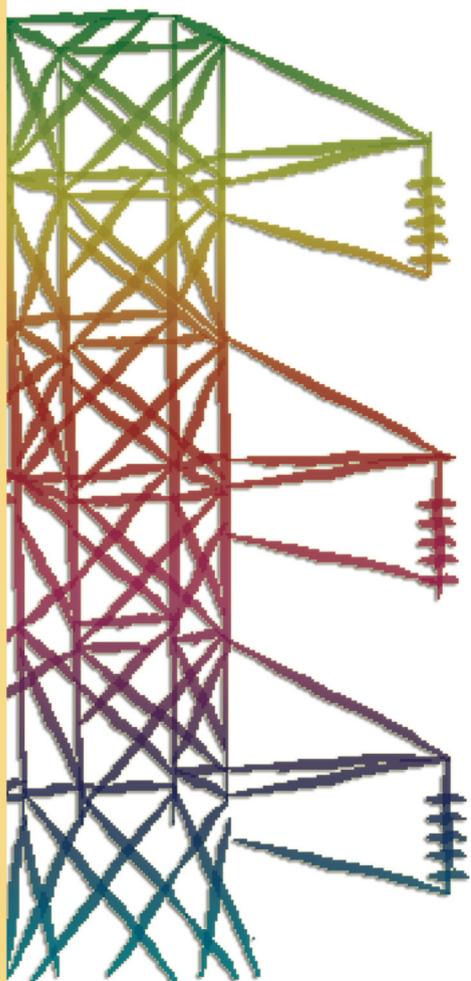
## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

### **Eco Light Design**

**Analisi della problematica dei controlli e della gestione dell'impianto di illuminazione in interni, indirizzata verso l'identificazione di soluzioni semplici e la definizione eventuale di dispositivi ad hoc**

**Maurizio Rossi**





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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

## Eco Light Design

Analisi della problematica dei controlli e della gestione dell'impianto di illuminazione in interni, indirizzata verso l'identificazione di soluzioni semplici e la definizione eventuale di dispositivi ad hoc

*Maurizio Rossi*



ECO LIGHT DESIGN

ANALISI DELLA PROBLEMATICHE DEI CONTROLLI E DELLA GESTIONE DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE IN INTERNI, INDIRIZZATA VERSO L'IDENTIFICAZIONE DI SOLUZIONI SEMPLICI E LA DEFINIZIONE EVENTUALE DI DISPOSITIVI AD HOC

Maurizio Rossi (Dipartimento di Industrial Design delle Arti della Comunicazione e della moda – InDACO – del Politecnico di Milano)

Ottobre 2008

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 analizza la problematica dei controlli e della gestione dell'impianto di illuminazione in interni, dando indicazioni sull'identificazione di soluzioni semplici e la eventuale necessità di definire dispositivi ad hoc. In particolare sono trattati i seguenti punti:

- Swicthing vs dimming
- Sistemi di controllo
- Criteri di scelta tra i sistemi ad anello aperto e chiuso
- Algoritmi di controllo (Risposta Integrativa, Risposta anello aperto proporzionale, Anello chiuso proporzionale)
- Disposizione dei sensori nell'ambiente
- Risposta spettrale
- Risposta spaziale
- Luce naturale e artificiale negli ambienti (con approfondimento sul Tempo di risposta)
- Intervallo di risposta
- Regolazione manuale
- Sensori di presenza (con approfondimento sulla Disposizione dei sensori di presenza)

Accordo di Programma MSE-ENEA  
*Analisi della problematica dei controlli e della gestione dell'impianto di illuminazione in interni, indirizzata verso l'identificazione di soluzioni semplici e la definizione eventuale di dispositivi ad hoc*

---

**Accordo di Collaborazione tra ENEA ed Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO  
per una attività di ricerca dal titolo: "Eco Light Design"**

**Relazione in merito al punto C dell'allegato tecnico**

**Analisi della problematica dei controlli e della gestione dell'impianto di illuminazione in interni, indirizzata verso l'identificazione di soluzioni semplici e la definizione eventuale di dispositivi ad hoc**

## **Indice**

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduzione .....   | 5  |
| 2. Swiething vs dimming .....                                     | 5  |
| 3. Sistemi di controllo .....                                     | 8  |
| 4. Criteri di scelta tra i sistemi ad anello aperto e chiuso..... | 9  |
| 5. Algoritmi di controllo .....                                   | 10 |
| 5.1 Risposta Integrativa.....                                     | 11 |
| 5.2 Risposta anello aperto proporzionale.....                     | 12 |
| 5.3 Anello chiuso proporzionale .....                             | 13 |
| 6. Disposizione dei sensori nell'ambiente .....                   | 15 |
| 7. Risposta spettrale .....                                       | 18 |
| 8. Risposta spaziale.....   | 20 |
| 9. Luce naturale e artificiale negli ambienti.....                | 21 |
| 10. Tempo di risposta.....  | 22 |
| 11. Intervallo di risposta.....                                   | 22 |
| 12. Regolazione manuale .....                                     | 23 |
| 13. Sensori di presenza.....                                      | 23 |
| 13.1 Disposizione dei sensori di presenza .....                   | 25 |

## **1. Introduzione**

Mantenere un livello costante di illuminamento o di luminanza, su di un piano di riferimento o in un punto di una stanza, per mezzo di controlli automatici, non è sempre desiderabile e spesso impossibile. Il contributo fornito dall'illuminazione naturale è molto variabile, se confrontato con quello dell'illuminazione artificiale. La luminanza del cielo varia con la posizione geografica, l'ora, il giorno dell'anno, la stagione, e una variabilità casuale dovuta al movimento delle nuvole: questo determina una certa variazione dei valori di illuminamento all'interno del locale.

L'illuminazione artificiale è il maggiore utilizzo dell'energia negli edifici commerciali e può avere anche pesanti effetti sul carico dell'impianto di condizionamento dell'aria; infatti il calore sviluppato all'interno degli apparecchi di illuminazione e il calore emesso dagli individui, deve essere opportunamente considerato nel dimensionamento dell'impianto di climatizzazione<sup>1</sup>.

Le sorgenti fluorescenti sono generalmente utilizzate in concomitanza con sistemi di regolazione della potenza elettrica, per la loro possibilità di essere dimmerate entro ampi margini, per il loro elevato indice di resa cromatica e per l'ampia gamma di temperature di colore disponibili.

Le lampade fluorescenti, con temperature di colore comprese tra 3000K e 4000K offrono temperature correlate di colore in buon accordo con quella della luce naturale nelle diverse ore della giornata; la scelta deve comunque tenere conto, oltre che della cromaticità della luce naturale, anche di altri fattori quali ad esempio le preferenze individuali, le condizioni climatiche prevalenti, legate alla localizzazione geografica del sito da illuminare.

Nei paesi posti ad elevate latitudini, dove sono prevalenti le condizioni di cielo nuvoloso, c'è una preferenza per le sorgenti a temperatura di colore fredda, mentre per le regioni dove il clima è per la maggior parte dell'anno soleggiato (a latitudini più basse), si ha una preferenza per le temperature di colore più calde. La stessa temperatura di colore è però percepita come troppo calda durante le ore notturne.

Per quanto riguarda le sorgenti a scarica (HID), sebbene dotate di una maggiore efficienza (migliore rapporto lm/W), presentano due principali inconvenienti all'utilizzo in combinazione con sistemi di controllo della potenza elettrica:

- non sono possibili riaccensioni a caldo (solo ricorrendo a valori molto elevati dell'impulso di accensione che determinano maggiori costi per l'isolamento di cavi e accessori, come i portalampada)
- la potenza elettrica può essere variata entro margini non troppo ampi, rispetto ad altre famiglie di lampade

## **2. Swicthing vs dimming**

Con il termine dimming si intende il controllo variabile del flusso emesso dalla sorgente luminosa; i sistemi dimmerabili stanno assumendo un ruolo sempre più importante nelle applicazioni perché il livello di luce può essere regolato a seconda delle esigenze e circostanze, contribuendo in questo modo ad accrescere il livello di confort. La possibilità di variare in modo continuo il flusso luminoso emesso dalle lampade, è alla base dei sistemi di ottimizzazione del consumo energetico.

È opportuno osservare che il consumo di un apparecchio di illuminazione (si intende in questo caso l'insieme del ballast e la relativa/e lampada/e), non è proporzionale al valore di flusso luminoso emesso. L'alimentatore elettronico richiede sempre un addizionale consumo di potenza anche quando il flusso luminoso della lampada è al valore minimo. Per questa ragione, nei sistemi a elevata ottimizzazione dei consumi energetici, gli apparecchi non necessari al mantenimento delle desiderate performance luminose vengono spenti.

---

<sup>1</sup> "Daylighting in Buildings. A source book on Daylighting system and components", IEA (International Energy Agency) Solar Heating & Cooling Programme

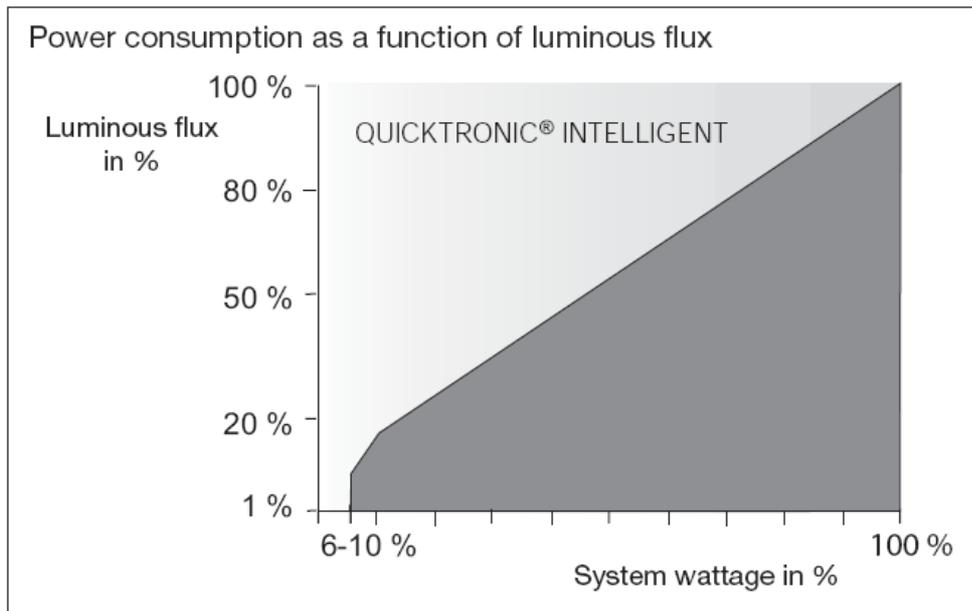


Figura 1 Potenza elettrica consumata in funzione del livello di flusso luminoso

La scelta tra sistemi “dimming” e “switching” è legata ad alcuni aspetti principali:

- Accuratezza del sistema di controllo da realizzare;
- L’entità del contributo di luce diurna;
- Costo iniziale dell’impianto, dato che i sistemi con dimming sono decisamente più costosi;
- Gli alimentatori dimmerabili assorbono una maggiore potenza dalla rete, rispetto ai quelli convenzionali, sia quando funzionano a piena potenza, sia quando sono regolati al valore minimo del flusso luminoso di lampada. I reattori switching assorbono poca potenza elettrica quando sono spenti, e se un ampio contributo di daylight è presente, probabilmente rimarranno spenti per la maggior parte delle ore del giorno. Nella condizione descritta gli alimentatori dimmerabili avranno un minor consumo solo durante i brevi periodi di alba e tramonto (si suppone che in queste condizioni non sia necessario erogare il 100% del flusso della lampada)<sup>2</sup>
- Se il contributo di daylight all’illuminamento degli ambienti interni è marginale, cioè non supera il doppio del valore dell’illuminamento richiesto, un sistema switching avrebbe scarse opportunità di spegnere le lampade; infatti prima di poter spegnere l’impianto o una sua parte è necessario il contributo di luce naturale sia almeno il 20% superiore al valore di illuminamento richiesto (il margine del 20% è necessario per evitare continue e fastidiose accensioni e spegnimenti di parte dell’impianto, a seguito di oscillazioni del contributo di luce naturale).
- La soluzione dimming è consigliabile anche in presenza di contributo di luce naturale elevato, il cui livello varia in maniera significativa durante il corso della giornata (cielo parzialmente coperto, dove si susseguono rannuvolamenti e schiarite): un sistema switching determinerebbe una successioni di accensione e spegnimenti fortemente disturbanti per gli utenti, mentre una combinazione tra switching e dimming consentirebbe un risparmio di energia e un maggior confort.

<sup>2</sup> Per chiarire meglio il punto sarebbe opportuno condurre una campagna di misurazione su diversi modelli di alimentatori dimmerabili, in modo da valutare sia la potenza di lampada al variare del fattore di dimming, sia la potenza assorbita dal complesso lampada alimentatore. Solo in questo modo sarà possibile presentare un criterio di scelta più accurato di quello esposto.

La Figura 2 mostra uno schema utile nel selezionare il sistema di controllo più adatto, in funzione delle caratteristiche dell'applicazione.

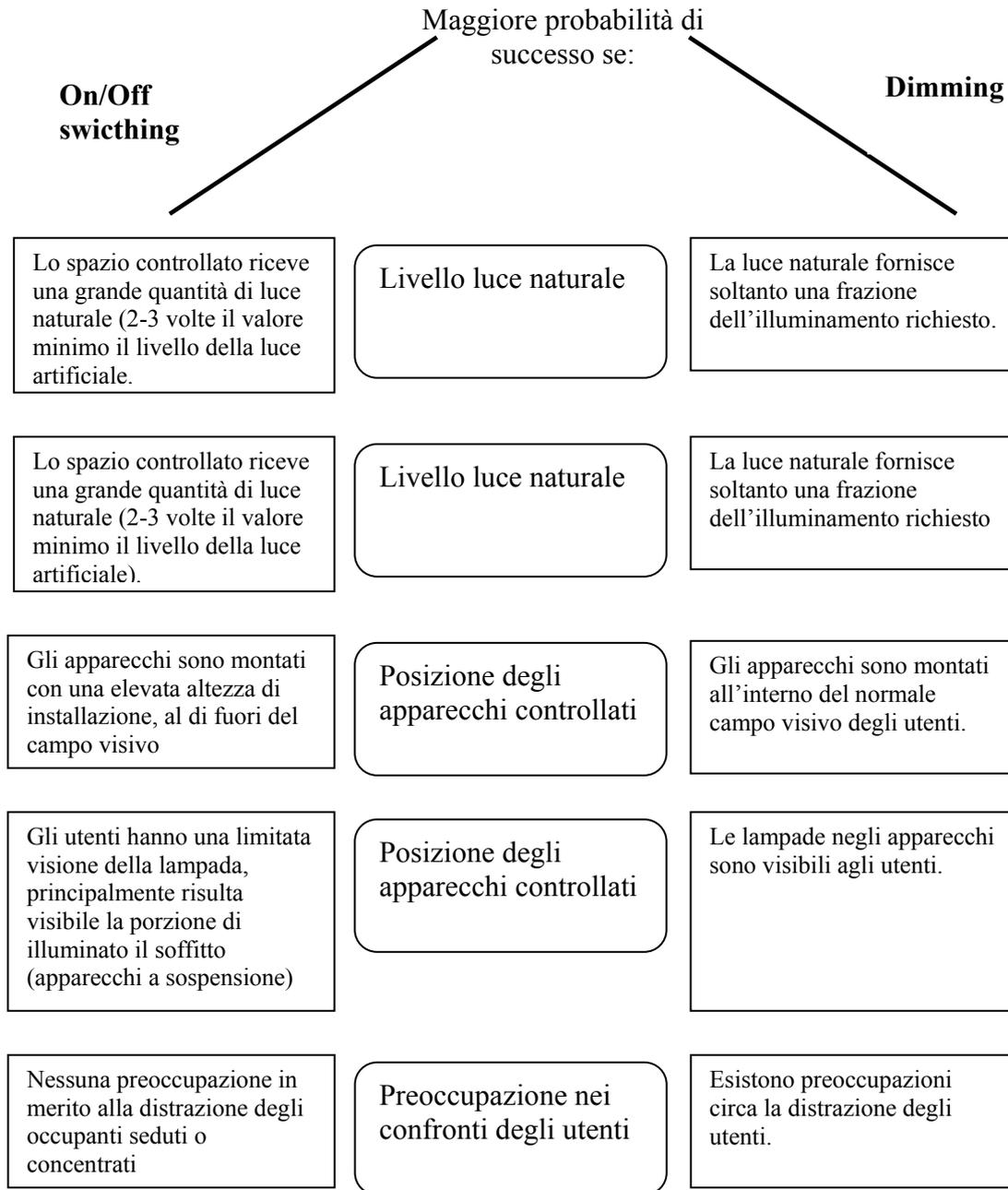


Figura 2 Schema per la scelta tra un sistema switching ON/OFF e un sistema dimming<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Tratto dalla pubblicazione "Daylighting control Design and application Guide", WattStopper Legrand

### 3. Sistemi di controllo

I sensori fotoelettrici di controllo si dividono in due categorie:

- Ad anello chiuso
- Ad anello aperto

Un esempio di sistema ad anello aperto è un sensore montato all'esterno di un edificio che controlla il livello di illuminazione prodotto dagli apparecchi posti all'interno. Nella situazione descritta, il sensore è esposto alla sola luce naturale e il segnale di controllo prodotto dipenderà esclusivamente dal livello di illuminamento raggiunto all'esterno. Per questa configurazione, sono possibili due differenti strategie di controllo: il sensore accende il sistema di illuminazione quando un determinato livello di illuminamento esterno è stato raggiunto; oppure viene modulato, in modo proporzionale al livello di illuminamento esterno, il flusso delle lampade all'interno degli apparecchi collegati al sensore. Il punto debole di questo sistema di controllo è che il sistema non può correggere o compensare, per ogni cambiamento della distribuzione di luce all'esterno dell'edificio, il rapporto di diretta proporzionalità tra il livello di illuminamento all'esterno e quello all'interno dell'edificio. Il sistema, ad esempio, non risponde a cambiamenti della configurazione delle tapparelle o tende sulle finestre che potrebbero essere utilizzate dagli utenti al fine di limitare la luce diretta del sole (la risposta desiderata dovrebbe essere un aumento del contributo della luce artificiale nell'ambiente).

Un esempio di sistema ad anello chiuso è un sensore montato sul soffitto dello stesso ambiente in cui il livello di illuminazione deve essere controllato. Questo genere di sistemi utilizzano un feedback negativo per rispondere alle variazioni delle condizioni ambientali, rilevate dal sensore stesso (Figura 3)

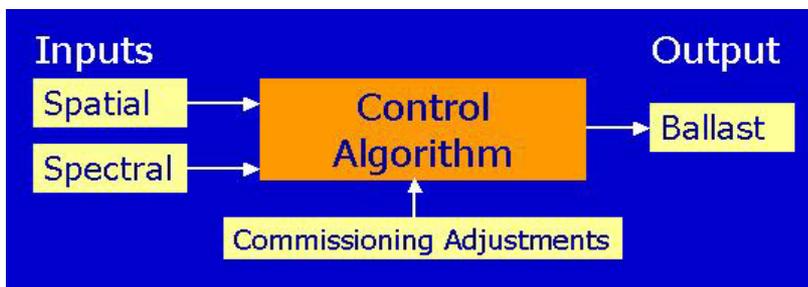
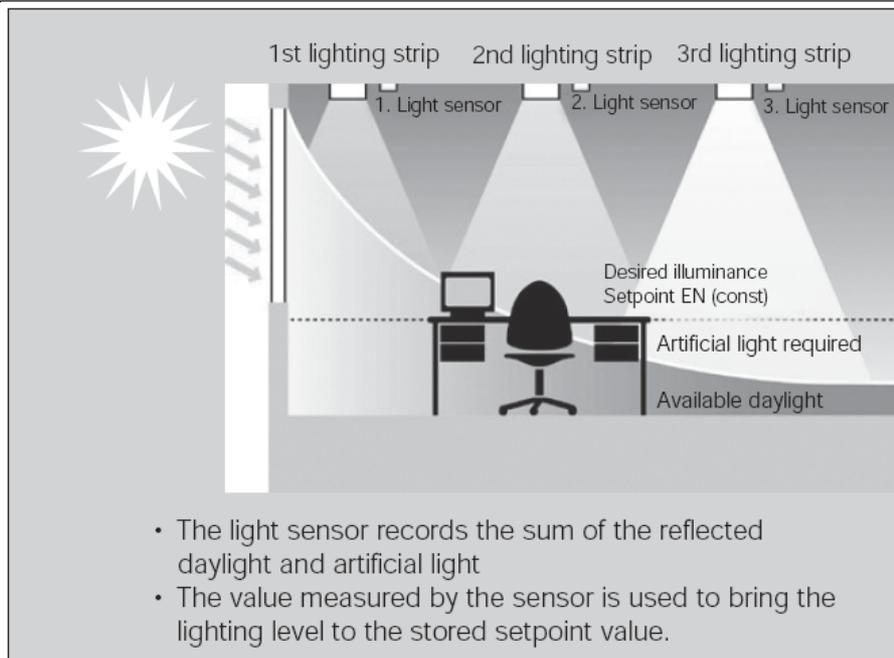


Figura 3 Schema di funzionamento di un sistema ad anello chiuso

La retroazione negativa ha l'effetto di contrastare le deviazioni nel funzionamento del sistema: lo stabilizza opponendosi ai cambiamenti. La retroazione negativa si ottiene dotando l'impianto di un sensore che mette in relazione le prestazioni in uscita (output) del sistema con quelle prestabilite in entrata (input) e, azionando opportuni meccanismi di regolazione, annulla la differenza fra segnale di uscita e quello di entrata. Questo tipo di retroazione ha l'effetto di contrastare le deviazioni nel funzionamento del sistema: lo stabilizza opponendosi ai cambiamenti; se la deviazione causata dal fattore influente è legata a un suo eccesso, il meccanismo provoca la sua diminuzione; se invece è legata a un suo difetto, ne provoca l'aumento.

Questo è il comportamento desiderato per un sensore fotoelettrico, ad una diminuzione del livello di luce rilevato dal sensore nella stanza, deve corrispondere un aumento della potenza elettrica fornita alle lampade e viceversa.



**Figura 4** Controllo di tre file di apparecchi ad anello chiuso

Il controllo ad anello chiuso (Figura 4), si ha quando il detector rileva il livello di illuminamento sulla scrivania e il contributo degli apparecchi è variato automaticamente in modo tale che si mantenga nell'intorno di un valore di riferimento precedentemente impostato. Se una sorgente di luce addizionale, come quella naturale, filtra attraverso una finestra e cade sul piano di lavoro, il sensore regola la luce emessa dagli apparecchi, in modo tale che per l'osservatore seduto alla scrivania, non vi sia un'apprezzabile differenza nel livello della luce.

#### **4. Criteri di scelta tra i sistemi ad anello aperto e chiuso**

Nelle condizioni in cui è presente un ampio contributo della luce naturale e il controllo della luce si attua a un livello significativamente superiore a quello desiderato, e dovendo realizzare comunque un risparmio energetico apprezzabile, un sistema ad anello aperto può essere una buona soluzione. Tuttavia, se si desidera che il livello di illuminamento nell'ambiente interno non scenda mai al di sotto di una soglia prefissata, continuando ad a ottenere un risparmio energetico, è preferibile utilizzare un sistema ad anello chiuso, che garantisce la massimizzazione del risparmio sul consumo energetico e un controllo accurato del livello di illuminazione all'interno dell'ambiente. Questo risulta ancora più vero quando il contributo di luce naturale è trascurabile e il sistema deve mantenere un livello di illuminamento interno circa costante, dovendo allo stesso tempo ottenere significativi risparmi dal punto di vista dei consumi elettrici.

In alcuni edifici, la presenza di lucernai e di pozzi di luce, consente di avere una distribuzione e un livello della luce naturale appropriato per la maggior parte delle ore della giornata o dell'anno, che segue molto strettamente l'andamento del livello di luce naturale esterna. Inoltre se l'ambiente non consente la modulazione della luce naturale, mediante schermi, tende o diffusori, allora il ricorso a sistemi di controllo ad anello chiuso appare del tutto inutile. In questi casi un sistema ad anello aperto è sufficiente a risolvere il problema: tale sensore può essere installato all'interno dell'ambiente, in modo che risulti protetto dalle intemperie, e rivolto verso l'esterno in modo da registrare in modo accurato, il contributo di luce naturale che entra nell'ambiente.

Nella maggior parte degli ambienti destinati ad un uso residenziale, scolastico, ospedaliero, ufficio, la qualità e la quantità dell'illuminazione naturale è descritta mediante un parametro detto **fattore**

**medio di luce diurna**<sup>4</sup> che è definito come il rapporto tra il valore di illuminamento medio sulle superfici interne dell'ambiente e il valore dell'illuminamento esterno, nello stesso istante, valutato per un punto capace di *vedere* l'intera volta del cielo (privo di ostruzioni). Stante questa definizione, possiamo affermare che *tanto più questo parametro è elevato per le diverse ore del giorno, tanto più sarà indicata l'installazione di un sistema di controllo ad anello aperto*.

Anche i problemi di installazione (passaggio cavi), devono essere tenuti in opportuna considerazione per la scelta tra un sistema ad anello aperto o chiuso. Questa situazione è particolarmente evidente nei casi di un intervento di ristrutturazione o ammodernamento dell'impianto di illuminazione esistente. Alcuni costruttori raccomandano di installare i propri sensori in prossimità delle finestre in modo che siano rivolti verso l'esterno. Se l'attività del sensore rimane confinata prevalentemente su quanto osserva attraverso la finestra, possiamo parlare di sistemi ad anello aperto; viceversa se il sensore è posto sufficientemente distante da questa, ecco che lo stesso dispositivo acquista le caratteristiche di sistema ad anello chiuso.

Anche considerazioni di natura economica possono influenzare le scelte: sistemi di controllo ad anello aperto richiedono un numero ridotto di sensori, ma poiché sono posti all'aperto, si dovrà sostenere un maggior costo dal momento che il dispositivo dovrà essere dotato di un più elevato grado di protezione (IP) e di un cablaggio mediamente più lungo. La Tabella 1 riassume le raccomandazioni per la selezione di sistemi ad anello aperto o chiuso, per alcune applicazioni.

**Tabella 1 Criteri di selezione sistemi ad anello aperto o chiuso a seconda del tipo di applicazione**

| Applicazione                  | Open loop   | Closed loop   |
|-------------------------------|---|---|
| High bay con lucernai         | Raccomandato (la fotocellula è montata sul sottotetto del lucernaio, il controller montato in una posizione accessibile).             | Generalmente sconsigliato, a causa delle difficoltà nell'identificare una buona posizione di osservazione per la fotocellula. |
| Ufficio privato con finestra  | Generalmente sconsigliato a causa dei costi.  | Consigliato (soluzione al minor costo).   |
| Aule scolastiche              | Raccomandato, se si desiderano zone di controllo multiple.  | Raccomandato, se si desidera solo una singola zona di controllo, o si ha bisogno di una soluzione economica.                  |
| Uffici aperti                 | Raccomandato per grandi aree (in particolare se l'intenzione è quella di regolare apparecchi in aree adiacenti a livelli differenti). | Raccomandato per piccole aree con una singola zona di controllo.  |
| Zone di regolazione adiacenti | Raccomandato.   | Sconsigliato, probabile mancato funzionamento.  |

## **5. Algoritmi di controllo**

Quando si utilizzano sensori fotoelettrici per il controllo del livello di illuminazione in un locale, l'aspetto più importante da prendere in considerazione è l'algoritmo di controllo, ovvero il legame tra le grandezze di ingresso e quelle di uscita. La funzione di risposta descrive l'uscita del sensore fotoelettrico, in funzione del suo ingresso. L'ingresso è la luce incidente sul sensore, ma può includere anche altri ingressi come l'orario, l'occupazione degli spazi, che influenzano in maniera definita il modo in cui sistema risponde alla luce incidente. Anche le operazioni di setup e calibrazione possono essere assimilate a un ingresso che influenza la risposta del dispositivo.

<sup>4</sup> Publication CIE 16 "International Recommendation for the calculation of natural daylight", 1970

Il segnale di uscita è normalmente una tensione compresa tra 0 e 10V (DC) inviata al ballast al fine di regolare il flusso emesso dalla lampada, oppure per i sensori di tipo swithing, l'uscita è un segnale binario on/off di pilotaggio di un relè.

La caratterizzazione della risposta dei sensori avviene sempre ad anello aperto, senza tenere in alcuna considerazione il comportamento di questi dispositivi quando funzionano ad anello chiuso. Molti possono essere gli algoritmi di controllo utilizzabili, alcuni anche di notevole complessità; tuttavia anche quelli molto semplici, possono essere molto efficaci se utilizzati in modo corretto.

In linea generale, possiamo identificare 3 funzioni di risposta per i sistemi di controllo:

- Integral
- Proportional
- Closed loop proportional

La Figura 5 illustra graficamente i 3 comportamenti dei sistemi di controllo di tipo dimming.

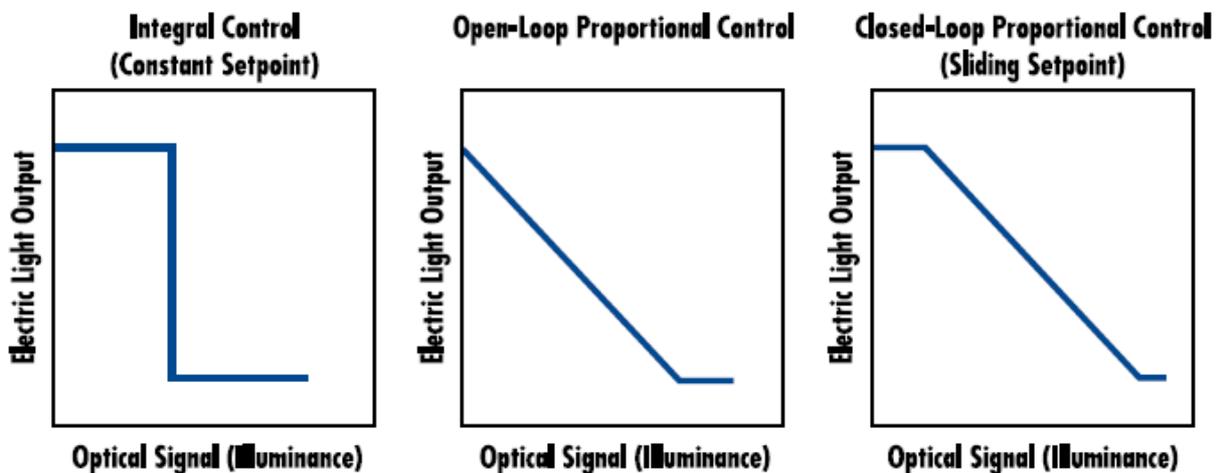


Figura 5 Funzioni di risposta per i sensori di tipo dimming

## 5.1 Risposta Integrativa

Questo tipo di sensori sono costruiti per mantenere un livello di illuminamento costante sulla fotocellula, e devono essere collocati in una configurazione ad anello chiuso per poter funzionare correttamente. Questo sistema di controllo ha un solo parametro modificabile dall'utente (set point). Se il livello dell'illuminazione elettrica non può essere alzato a sufficienza per mantenere costante il segnale sulla fotocellula, la tensione in uscita dal sistema di controllo è al suo massimo valore e il segnale sulla cellula è al di sotto del set point.

Al contrario, se la componente elettrica dell'illuminazione sul sensore non può essere ridotta a sufficienza per mantenere il segnale costante sulla fotocellula, cioè entra troppa luce naturale rispetto a quanto sarebbe necessario a mantenere costante il segnale sul sensore, allora l'uscita del sistema di controllo scende al minimo valore di tensione e il segnale sulla fotocellula supera il valore del set point.

Quando funzionano ad anello aperto, questi controlli si comportano come un semplice switch high/low, come mostra la Figura 5 (primo grafico da sinistra). Il set point determina il livello di illuminamento rispetto al quale si ha una transizione high/low o viceversa. Quando il dispositivo funziona ad anello chiuso, l'uscita può assumere tutti i valori tra il valore minimo di potenza di lampada e il suo valore massimo.

Questo tipo di controllo risulta adatto nelle applicazioni in cui si desidera mantenere costante il livello di flusso emesso dalle lampade (lumen maintenance applications), dove la fotocellula risponde esclusivamente al livello determinato dalla componente elettrica dell'impianto.

Una fotocellula a risposta integrativa, può essere utilizzata per compensare la perdita di flusso delle lampade e il degrado delle superfici ottiche degli apparecchi in applicazioni senza luce naturale. Le lampade, durante la loro vita, riducono progressivamente il flusso emesso e anche i fattori di trasmissione di schermi o i fattori di riflessione delle ottiche possono variare significativamente a seguito di fenomeni di accumulo di sporco e polvere (dal 5% al 20% a seconda del tipo di apparecchio e dell'ambiente in cui viene fatto funzionare).

Inizialmente il sistema deve essere progettato per fornire valori di illuminamento sulle superfici utili maggiori rispetto a quelli richiesti dalla norma; il sistema di controllo provvederà quindi a ridurre i flussi emessi dalle lampade in modo che vengano raggiunti e mantenuti i valori medi di progetto. Trascorso un certo numero di ore di funzionamento, per effetto combinato dei due fenomeni sopra descritti, il livello di illuminamento medio sul compito visivo tenderebbe a ridursi, ma il sistema di controllo provvede ad aumentare il flusso luminoso emesso dalle lampade per mantenere il livello di illuminamento di progetto.

Questo dispositivo non può essere utilizzato in applicazioni di daylighting, dove si ha una differente distribuzione per la componente di luce naturale (influenzata dalla posizione delle finestre, e dalla geometria della stanza) e quella artificiale. Il controllo infatti mantiene un livello costante di illuminamento sulla cellula, ma dal momento che questa non è posizionata sul piano di lavoro, ma generalmente sul soffitto o sulle pareti, il cambiamento di illuminamento sul soffitto non corrisponde bene alle variazioni di livello di illuminamento del compito visivo. Questa differenza è causata dalla diversa distribuzione dei livelli di illuminamento quando nella stanza è presente la luce naturale rispetto a quando questa è assente. In molti ambienti l'illuminamento del soffitto cresce molto di più rispetto a quanto aumenta il livello sul piano di lavoro quando la luce naturale entra all'interno dello spazio. Di conseguenza, un dispositivo che mantiene costante il segnale sulla fotocellula è del tutto equivalente a mantenere costante il livello di illuminamento sul soffitto e di conseguenza il livello sul piano di lavoro risulterà inferiore a quello desiderato/prescritto.

Occorre inoltre tenere conto che la fotocellula non ha una risposta spaziale simile a quella di un luxmetro (che è dotato della nota correzione alla legge del coseno) e di conseguenza il dispositivo può avere risposte differenti al variare della distribuzione della luce artificiale e naturale, anche se producono lo stesso valore di illuminamento sulla fotocellula. Infine, occorre considerare che la risposta spettrale della fotocellula differisce da quella di un luxmetro, infatti molti sensori impiegati nella costruzione di dispositivi di controllo, hanno una sensibilità dal 30% al 40% superiore nella stima della componente di daylight rispetto a quella della luce artificiale (dovuta ad una sensibilità eccessiva nella banda UV e IR). In conseguenza di ciò, l'algoritmo di controllo tende a diminuire troppo la componente artificiale in presenza di daylight, aggravando in questo modo il problema della differente distribuzione spaziale dei livelli, di cui si è discusso in precedenza. L'impiego di questo tipo di controllo determina quindi un eccessivo illuminamento prima che la componente di luce naturale superi la soglia del set-point e un livello insufficiente quando la luce naturale eccede la soglia prefissata.

## **5.2 Risposta anello aperto proporzionale**

Questo tipo di controllo stabilisce una relazione di tipo direttamente proporzionale tra l'illuminamento sulla superficie del sensore e il segnale di controllo (tensione), fornita all'alimentatore delle lampade. Questo tipo di dispositivo è spesso usato in impianti dove è necessario controllare la componente di luce naturale. La Figura 5 mostra un esempio di risposta proporzionale; si osserva che la curva ha una pendenza negativa, in modo tale da ridurre la potenza elettrica degli alimentatori allorché sale il livello di illuminamento sulla fotocellula. Il sistema di

controllo ha un solo parametro di ingresso, la costante di proporzionalità tra la tensione in uscita (che regola il flusso delle lampade) e il segnale ottico sulla fotocellula (cioè il suo illuminamento).

La rapidità della pendenza è collegata al fattore di luce diurna, maggiore è tale fattore, più grande dovrà essere la pendenza della caratteristica per mantenere un illuminamento costante. Il dispositivo di controllo riduce la potenza elettrica per ogni aumento dell'illuminazione incidente; tuttavia il sensore deve trovarsi completamente al buio perché la potenza elettrica controllata sia al suo massimo livello. Per questo motivo, questo genere di controllo funziona bene con sistemi ad anello aperto dove la fotocellula è posta all'esterno dell'edificio: in questo modo, quando la fotocellula è completamente oscurata (sera/notte), il sistema regola gli alimentatori in modo da fornire la massima potenza alle lampade.

Quando il livello di illuminamento all'esterno aumenta, cresce il contributo della luce naturale all'interno dell'ambiente e di conseguenza la potenza dell'illuminazione artificiale può essere ridotta. Il guadagno è un fattore moltiplicativo applicato al segnale di ingresso che determina quanto deve variare l'uscita a fronte di una variazione dell'ingresso; elevati guadagni significa elevata sensibilità. Impostare il guadagno di un fotocellula significa scegliere la pendenza della curva di risposta, guadagni elevati significano pendenze molto ripide. Per sistemi di controllo on/off, guadagni elevati significano che il punto di commutazione viene raggiunto per variazioni contenute nel segnale incidente sulla fotocellula; per sistemi di controllo dimming alti guadagni significano ampie variazioni del livello di uscita (potenza lampade) a fronte di piccole variazioni del segnale di ingresso. Quando il sistema di controllo in esame è utilizzato in anello chiuso, l'algoritmo di controllo proporzionale non consente mai di avere la massima potenza di lampada, dal momento che il contributo di luce artificiale nell'area controllata dal sensore, determina la necessità di ridurre la potenza delle lampade collegate, di una certa quantità. In altre parole, se il guadagno dell'anello è basso (il sensore guarda fuori dalla finestra), il funzionamento ad anello chiuso non pone problemi, dal momento che gli alimentatori hanno sempre un certo offset di qualche volt prima di iniziare a dimmerare il flusso delle lampade. Questo offset degli alimentatori, rende la caratteristica di questo tipo di controllo, molto simile a quella di un controllo proporzionale, utilizzato ad anello chiuso. Qualche problema, nel funzionamento ad anello chiuso, si può verificare se l'offset di intervento degli alimentatori non è controllabile, ma ciascuno di essi presenta una soglia differente, variabile in funzione del costruttore considerato.

### **5.3 Anello chiuso proporzionale**

L'aggiunta di una soglia variabile ad un controllo proporzionale ad anello aperto, consente di ottenere la gamma completa delle potenze di lampade anche nella configurazione di funzionamento ad anello chiuso. Il valore di offset si può osservare nella Figura 5, come segmento orizzontale e indica il range di variazione dell'illuminamento sul sensore prima che questo inizi a regolare il flusso delle lampade.

Ad anello chiuso, l'offset ha la funzione di mantenere escluso il dimming fino a che il livello di illuminamento è maggiore di quello prodotto dalla sola componente elettrica controllata; tale livello di offset viene regolato in modo da avere i valori di illuminamento desiderati in assenza di daylight e di conseguenza il suo settaggio avviene durante le fasi iniziali di messa a punto dell'impianto, nelle ore serali o notturne. L'offset dovrà essere fissato in modo tale che sia maggiore o uguale al segnale sulla fotocellula rilevato durante le ore serali o notturne, al fine di ottenere il 100% della potenza sulle lampade. Nel funzionamento ad anello chiuso, la retroazione assicura che l'uscita verso gli alimentatori segua la curva di risposta in accordo alle variazioni del contributo di luce naturale.

Il sistema ad anello chiuso usa la retroazione negativa per confrontare il segnale della fotocellula rispetto ad un valore di riferimento, rispetto al quale un segnale di errore viene generato. Quest'ultimo segnale determina la quantità e la direzione del cambiamento nel segnale di controllo verso gli alimentatori che modula la potenza di lampada. Dato che viene utilizzata una retroazione

negativa, un segnale di errore positivo porta ad una diminuzione della potenza elettrica della lampade e viceversa. Il sistema ad anello chiuso a controllo proporzionale, consente di tenere conto delle differenze di distribuzione spaziale e spettrale tra luce naturale e artificiale, dato che il sistema ha la flessibilità di settare la costante di proporzionalità tra il livello di uscita dal controllo e il segnale ottico sulla fotocellula.

Esempio di funzionamento

Valori desiderati:

- a) 500 lux sul piano di lavoro deve essere ottenuto senza contributo di daylight
  - b) 100 lux sul soffitto senza contributo di daylight
- Il rapporto è di 5:1

Sensore:

- a) fissato sul soffitto ed è settato con un offset pari a 100 lux
- b) pendenza della curva è di -0.25% per lux

Evento:

Modifica delle schermature sulla finestra e ingresso di luce naturale nella stanza

- a) aumento di 250 lux sul soffitto
- b) aumento di 250 lux piano di lavoro

Azioni:

Il sensore cerca di raggiungere un nuovo stato di equilibrio a seguito della modifica del contributo di luce naturale.

Calcolo del livello di dimming degli apparecchi

$$0.25\% \text{ per lux} * 250 \text{ lux} = 62.5\%$$

Uscita apparecchi dopo la regolazione del flusso:

$$100 \text{ lux} - (100 \text{ lux} * 62.5\%) = 37.5 \text{ lux}$$

L'illuminamento sul soffitto, sarà quindi pari a:

$$250 \text{ lux per il daylight} + 37.5 \text{ lux apparecchi} = 287.5 \text{ lux}$$

L'illuminamento del soffitto è superiore alla soglia fissata (100 lux) di 187.5 lux (segnale di errore), di conseguenza la fotocellula calcola il nuovo valore di dimming

Calcolo del livello di dimming degli apparecchi

$$0.25\% \text{ per lux} * 187.5 \text{ lux} = 46.9\%$$

L'uscita degli apparecchi di illuminazione è settata a :

$$100 \text{ lux} - (46.9\% * 100 \text{ lux}) = 53.1 \text{ lux}$$

L'illuminamento totale del soffitto è ora pari a:

$$53.1 \text{ lux apparecchi} + 250 \text{ lux daylight} = 303.1 \text{ lux}$$

L'illuminamento del soffitto è superiore alla soglia fissata (100 lux) di 203.1 lux (segnale di errore), di conseguenza la fotocellula calcola il nuovo valore di dimming

Calcolo del livello di dimming degli apparecchi

$$0.25\% \text{ per lux} * 203.1 \text{ lux} = 50.8\%$$

L'uscita degli apparecchi di illuminazione è settata a :

$$100 \text{ lux} - (50.8\% * 100 \text{ lux}) = 49.2 \text{ lux}$$

L'illuminamento totale del soffitto è ora pari a:

$$49.2 \text{ lux apparecchi} + 250 \text{ lux daylight} = 299.2 \text{ lux}$$

L'illuminamento del soffitto è superiore alla soglia fissata (100 lux) di 199.2 lux (segnale di errore), di conseguenza la fotocellula calcola il nuovo valore di dimming

Calcolo del livello di dimming degli apparecchi

$$0.25\% \text{ per lux} * 199.2 \text{ lux} = 49.8\%$$

L'uscita degli apparecchi di illuminazione è settata a :

$$100 \text{ lux} - (49.8\% * 100 \text{ lux}) = 50.2 \text{ lux}$$

L'illuminamento totale del soffitto è ora pari a:

$$50.2 \text{ lux apparecchi} + 250 \text{ lux daylight} = 300.2 \text{ lux}$$

L'illuminamento del soffitto è superiore alla soglia fissata (100 lux) di 200.2 lux (segnale di errore), di conseguenza la fotocellula calcola il nuovo valore di dimming

Calcolo del livello di dimming degli apparecchi

$$0.25\% \text{ per lux} * 200.2 \text{ lux} = 50.1\%$$

Il livello di dimming degli apparecchi si avvicina al 50%; l'illuminamento del piano di lavoro è pari a 250 lux dovuti al contributo di daylighting e circa 250 lux (apparecchi al 50%) dovuto alla componente artificiale, per un totale di 500 lux, come da richiesta iniziale.

La Figura 6 mostra i parametri di un dispositivo di controllo ad anello chiuso di tipo proporzionale.

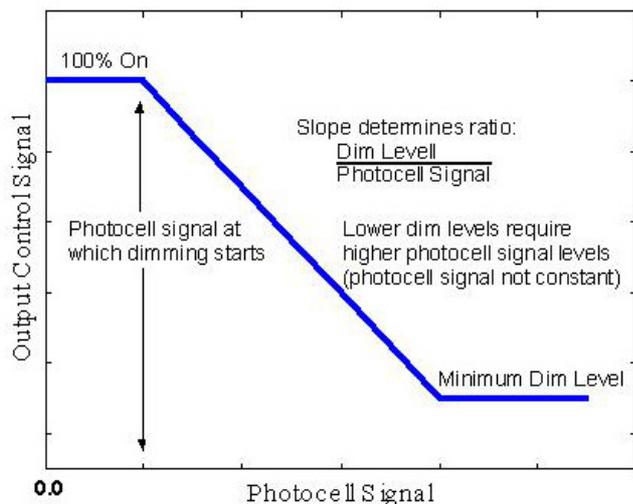


Figura 6 Parametri di un controllo ad anello chiuso proporzionale<sup>5</sup>

## 6. Disposizione dei sensori nell'ambiente

I sensori misurano il livello di luminanza in una precisa area del locale e inviano il dato misurato al sistema di controllo. La loro dislocazione all'interno dell'ambiente è critica perché un errato posizionamento determina un cattivo funzionamento dell'intero impianto; occorre quindi selezionare una posizione in cui il sensore riceva una porzione rappresentativa di luce naturale presente all'interno dell'ambiente.

Si devono inoltre verificare, con un luxmetro, i livelli di illuminamento in tutte le possibili posizioni candidate prima di scegliere la posizione definitiva, dal momento che le performance della fotocellula possono variare in dipendenza della dislocazione e dell'orientamento.

Il posizionamento del sensore dipende dallo specifico tipo di controllo utilizzato; per i sistemi ad anello chiuso si utilizzano generalmente sistemi fissati al soffitto che osservano aree rappresentative

<sup>5</sup> Immagine tratta dal sito internet <http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/tutorials/photosensors/controlE.asp>

dell'ambiente, come ad esempio tavoli o pavimento (Figura 7). I sensori sono generalmente installati nell'ambiente da controllare al di sopra della superficie da controllare (ad esempio il piano di un tavolo), in modo tale che rilevino la luce naturale o artificiale riflessa.

I sistemi di controllo ad anello chiuso devono inquadrare le zone di cui controllano il flusso luminoso, senza che nel loro campo di vista entrino una visione diretta della finestra o dell'apparecchio (come talvolta accade con le sospensioni). Sono quindi da evitarsi quelle posizioni che ricevono la luce diretta del sole, oppure la luce del sole riflessa dalle superfici lucide presenti nel locale, oppure le zone molto luminose in prossimità delle finestre così come quelle in ombra completa.

Le posizioni migliori sono quelle che ricevono quasi lo stesso contributo di luce naturale ed artificiale. Negli impianti che utilizzano apparecchi a luce indiretta o diretta/indiretta, sono da evitare quelle posizioni che ricevono luce direttamente dall'apparecchio; in questi casi il sensore può essere montato sulla faccia inferiore o sul lato dell'apparecchio o sospeso alla stessa altezza dei centri luminosi, oppure modificando la schermatura del sensore per bloccare la vista dell'apparecchio.

Sono da evitare tutte quelle zone che sono troppo vicine al movimento di persone o oggetti; occorre inoltre tenere in debita considerazione le istruzioni di montaggio fornite a corredo del sensore, che forniscono indicazioni su posizionamenti e orientamento (si veda il paragrafo sulla risposta spaziale).

La suddivisione dello spazio in zone può influenzare anche il posizionamento dei sensori; si definisce zona un'area dell'ambiente in cui tutti gli apparecchi sono controllati allo stesso modo.

La suddivisione dello spazio in zone dipende da molti fattori, tra i quali possiamo citare:

- la dimensione e la profondità dello spazio da controllare;
- l'altezza delle finestre e del soffitto;
- il numero di suddivisioni dello spazio;
- la configurazione e il layout degli apparecchi;

Per i sistemi ad anello chiuso, normalmente vale la regola che ogni zona abbia la propria fotocellula (occorre fare attenzione che se la fotocellula è posizionata al di fuori della zona che controlla, allora non è più possibile parlare di sistemi ad anello chiuso, ma di sistemi ad anello aperto).

Negli spazi interni in cui vi è una parete che si affaccia all'esterno e con la presenza di setti separatori degli spazi occupati, è possibile utilizzare un sensore in configurazione ad anello chiuso per ciascuno di essi in modo da consentire un livello di illuminamento accettabile in ogni punto.

Per i sistemi ad anello chiuso è anche possibile ipotizzare che due o più zone coprano la stessa area del locale; una zona può controllare la lampada esterna nell'apparecchio, un'altra quella centrale e infine l'ultima quella interna. Lo schema di Figura 8 può essere un valido aiuto al posizionamento di un sistema di controllo ad anello chiuso.

Per un sistema di controllo ad anello aperto, i sensori sono ancora montati sul soffitto, ma guardano attraverso la finestra o attraverso il lucernaio, in modo da vedere solo la componente di luce naturale e non il contributo dell'illuminazione elettrica (Figura 9). Per i controlli ad anello aperto, dove la fotocellula è collocata all'esterno, un singolo sensore può controllare diverse zone, per differenti esposizioni della facciata (nord, sud, est, ovest) e per diverse distanze dalla finestratura. In questo caso però è difficile ottenere risultati soddisfacenti utilizzando un solo elemento di controllo (anche se l'impianto risulta particolarmente economico).

Quando il sensore è posto sotto un lucernaio (sistema ad anello aperto), questo normalmente controlla gli apparecchi nelle sue immediate vicinanze; se il cielo fornisce un contributo di luce naturale uniforme all'interno dell'edificio, allora può essere utilizzato un singolo sensore. Occorre assicurarsi che la fotocellula possa sopportare la dinamica del segnale, se esposta direttamente alla luce del sole; in caso contrario uno schermo risulta necessario.

Quando possibile, i sensori vanno posti alla normale altezza del soffitto in modo tale che l'area inquadrata non sia troppo piccola e quindi la risposta eccessivamente influenzata dalle variazioni di riflettanza della zona inquadrata.

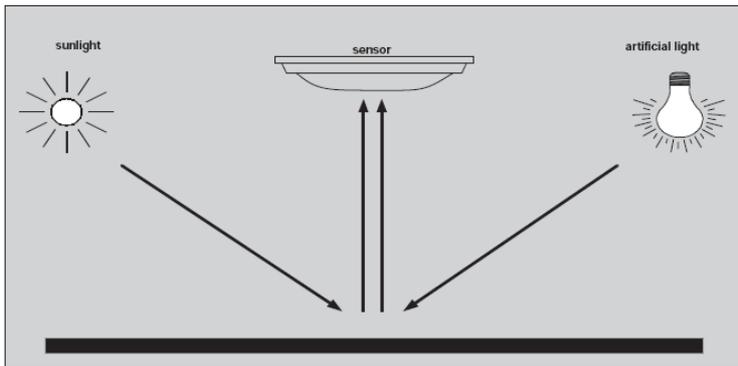


Figura 7 Fattori che influenzano la risposta dei sensori di luce

Il livello di illuminamento viene controllato dal sensore automaticamente ad intervalli di tempo tali per cui gli occupanti non si accorgono delle variazioni e correzioni applicate.

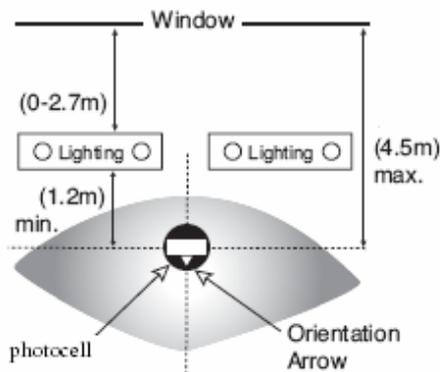


Figura 8 Posizionamento per sistemi di controllo ad anello chiuso

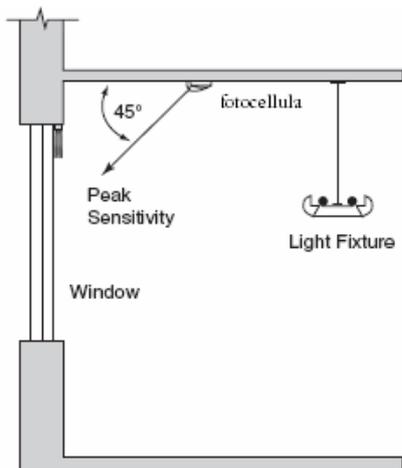


Figura 9 Disposizione di sistemi di controllo ad anello aperto

Quando i sensori vengono posizionati all'interno dell'ambiente, occorre prestare attenzione che la variazione di flusso emesso da una qualsiasi fila di apparecchi non influisca sul funzionamento delle altre; occorre inoltre rispettare una distanza minima tra i sensori e tra le file adiacenti. La Figura 10 mostra il criterio per il calcolo della minima distanza tra due sensori.

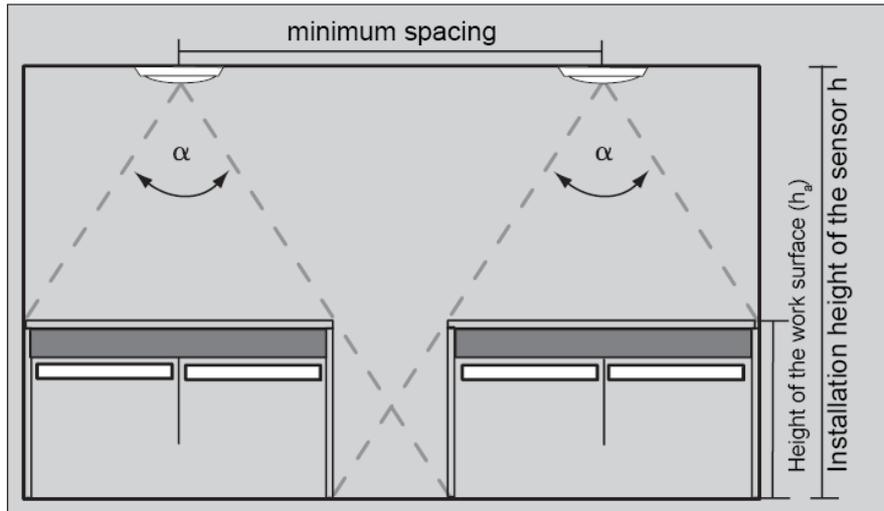


Figura 10 Criteri per l'installazione sensori<sup>6</sup>

$$d = 2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * (h - h_a)$$

L'angolo di apertura dei sensori, varia di norma tra 60° e 100° a seconda del modello e del fabbricante (maggiori dettagli saranno forniti nel paragrafo sulla risposta spaziale)

## 7. Risposta spettrale

Nelle applicazioni di controllo della luce naturale, la fotocellula dovrebbe avere una risposta spettrale simile a quella dell'occhio umano, in modo che risponda solo alle radiazioni nella banda del visibile (380 nm-780 nm) e non ad altre radiazioni nella banda dell'infrarosso o dell'UV, che possono entrare dalla finestra o dai lucernai. A tale scopo occorre fare riferimento alla documentazione tecnica rilasciata dal costruttore che dovrebbe assicurare che l'elemento sensibile sia corretto spettralmente e che la sua sensibilità nelle bande UV e IR sia limitata a pochi punti percentuali rispetto alla risposta complessiva.

Alcune metodologie sviluppate per la caratterizzazione di luxmetri<sup>7</sup>, potrebbero essere applicate anche in questi ambiti, ma occorre tenere ben presente che il livello di accuratezza di questi dispositivi è di gran lunga inferiore a quello adottato per gli strumenti di misura.

Per i sensori che sono utilizzati con un solo tipo di distribuzione spettrale, il matching con la curva  $V(\lambda)$ , non è molto importante, dal momento che l'errore dovuto alla scadente correzione spettrale può essere compensato tramite una semplice costante moltiplicativa. Invece, per i sensori che osservano una miscela di due o più distribuzioni spettrali, come ad esempio quello prodotto da una lampada fluorescente e quello originato dal daylight, la correzione spettrale è più importante dal momento che non è possibile compensare l'errore mediante una costante moltiplicativa (particolarmente vero in applicazioni ad anello aperto, come si è visto quando sono stati descritti gli algoritmi dei sistemi di controllo).

Nella maggior parte dei casi, la scelta di un algoritmo di controllo proporzionale ad anello chiuso può limitare gli effetti di una correzione spettrale imperfetta.

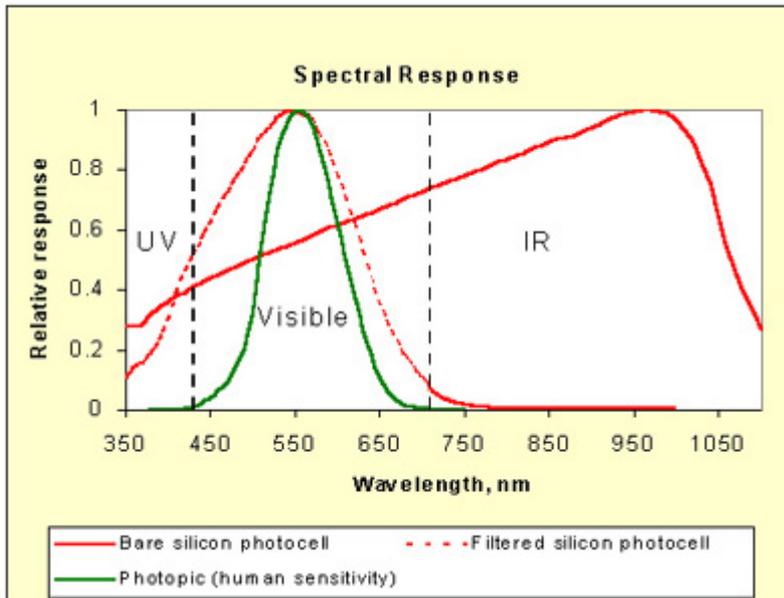
La Figura 11 mostra un esempio di sensibilità spettrale per un diodo al silicio, prima e dopo l'applicazione di un filtro di correzione spettrale rispetto alla curva di visibilità dell'occhio umano. Algoritmi di controllo ad anello chiuso risultano comunque inefficaci quando nell'ambiente sono

<sup>6</sup> "Dali technical guide. Lighting control system with DALI interface", OSRAM September 2006

<sup>7</sup> CIE 53 Methods of characterizing the performance of radiometer and photometer, 1982.

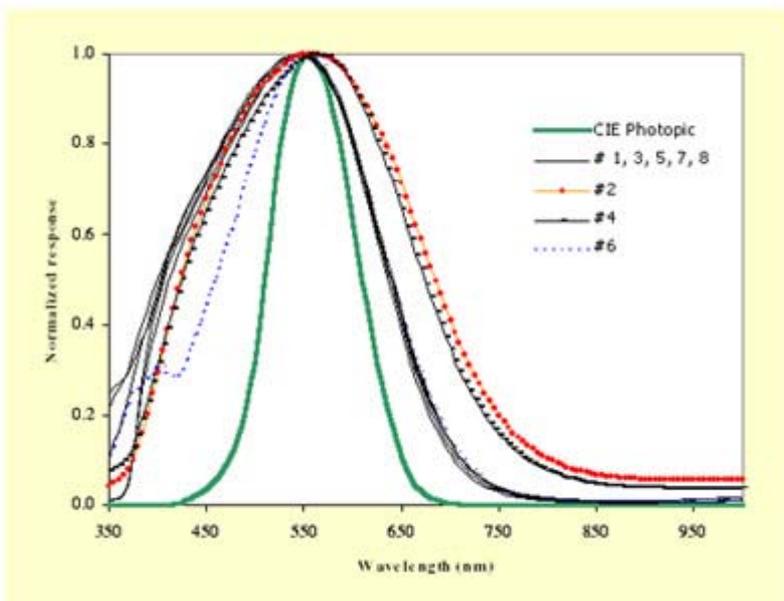
CIE 69 Methods of characterizing illuminance meter and luminance meters, 1987. In particolare l'errore nella risposta spettrale, fa riferimento all'induce  $f_1$ , mentre l'errore dovuto la sensibilità alla radiazione UV e IR è indicato rispettivamente da  $u_0$  e  $r_0$

presenti più di due distribuzioni spettrali (ad esempio luce naturale, lampade fluorescenti, lampade ad incandescenza).



**Figura 11** Confronto tra la sensibilità spettrale di una cellula la silicio nuda e filtrata rispetto alla curva  $V(\lambda)$  dell'occhio umano<sup>8</sup>.

Dall'esame della Figura 12, si osserva la sensibilità spettrale di 8 differenti tipi di fotocellule; in particolare si osserva che il comportamento di 6 di esse è praticamente identico (probabilmente dovuto all'impiego, da parte dei differenti costruttori, di sensori molto simili). Due andamenti si discostano notevolmente dai precedenti per una maggiore sensibilità nel campo degli IR. In linea generale, si può affermare che un maggiore filtraggio nella banda tra 470 nm e 625 nm porterebbe ad un matching più stretto con la curva di visibilità CIE  $V(\lambda)$ .



**Figura 12** Diversi tipi di risposta spettrale misurati su otto diverse fotocellule<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Immagine tratta dal sito <http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/tutorials/photosensors/spectral.asp>

<sup>9</sup> Immagine tratta dal sito <http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/tutorials/photosensors/measspec.asp>

## 8. Risposta spaziale

La risposta spaziale descrive la sensibilità dell'elemento sensibile alla radiazione incidente da diverse direzioni. Si tratta di un concetto analogo alla distribuzione delle intensità nello spazio per gli apparecchi, ma descrive la sensibilità piuttosto che una uscita. La risposta spaziale può essere misurata ponendo il sensore su un goniometro e misurando l'ampiezza del segnale di uscita quando il dispositivo è orientato in diverse direzioni rispetto alla posizione assunta da una sorgente puntiforme posta davanti al sensore, ad una certa distanza da quest'ultimo. Prendendo molte misure ad intervalli angolari molto piccoli, è possibile mappare la risposta del sensore nello spazio. La misura ottenuta viene divisa per la massima risposta registrata in modo da avere un valore relativo in ciascuna direzione, compreso tra 0 ed 1. La mappa della risposta spaziale ottenuta con il metodo descritto, può essere rappresentata con i consueti sistemi di rappresentazione della fotometria (curve polari, cartesiane, solido tridimensionale).

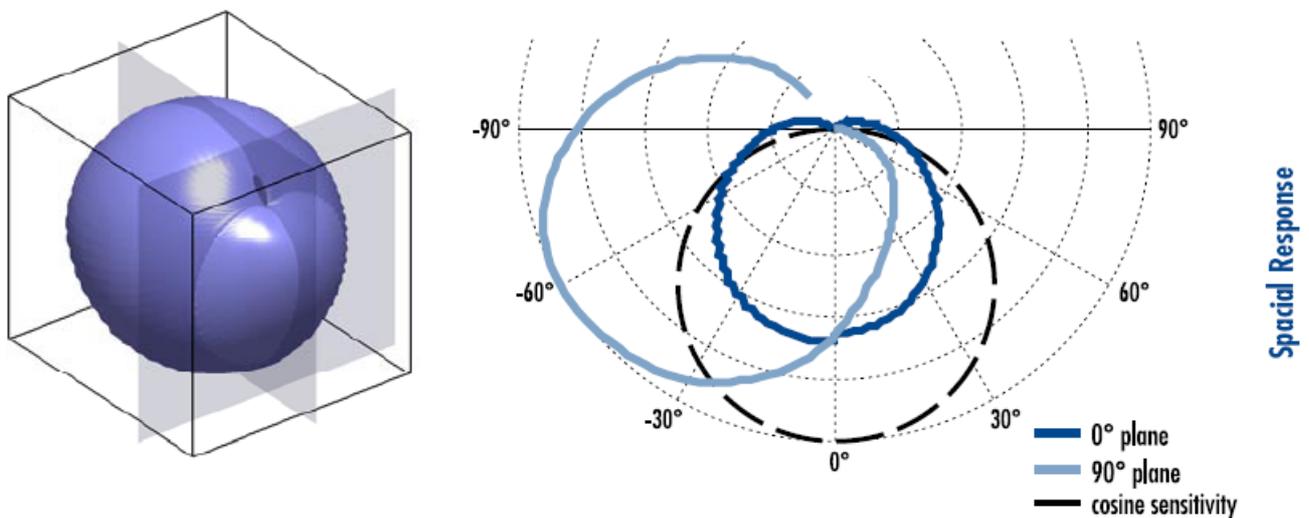


Figura 13 Esempio di rappresentazione della risposta spaziale di un sensore

La Figura 13 mostra un esempio di rappresentazione grafica (polare e 3D)<sup>10</sup> dei dati di misura della risposta spaziale di una fotocellula. La risposta spaziale di un sensore può essere classificata, in maniera grossolana, in due categorie:

- a) fascio stretto
- b) fascio largo

I dispositivi a fascio stretto rispondono principalmente in funzione della brillantezza della superficie verso la quale sono orientati. Supponendo che la riflettanza della superficie non vari durante la giornata, allora possiamo concludere che questo sensore segue le variazioni di illuminamento del compito visivo, anzi più stretto sarà il fascio, meglio il sensore sarà in grado di cogliere le variazioni di illuminamento. Ma più il sensore ha un fascio stretto, più ciò che inquadra deve essere rappresentativo dell'intera superficie del piano di lavoro; in pratica la riflettanza del compito visivo, non è costante ma varia in funzione delle attività che vengono svolte nell'ambiente, come ad esempio dei fogli di carta bianca su un tavolo scuro, il colore dei vestiti degli occupanti, la disposizione degli arredi. Piccole aperture del fascio presentano problemi anche quando sono indirizzati verso superfici con caratteristiche speculari, infatti la proporzionalità tra luminanza ed illuminamento vale soltanto per superfici diffondenti in maniera lambertiana. Molte delle superfici che costituiscono gli arredi degli ambienti interni hanno un comportamento diffondente, ma alcuni oggetti come ad esempio il vetro sopra il piano della scrivania, hanno un comportamento speculare:

<sup>10</sup> NLPSP Specifier Report The objective source of lighting product information, "Phosensors. Dimming and switching System for daylight Harvesting", Volume 11, Number 1, October 2007

la componente riflessa che si origina, incide direttamente sulla fotocellula determinandone un comportamento imprevedibile.

Una risposta spaziale più ampia corrisponde meglio a ciò che un luxmetro potrebbe misurare: questo strumento è dotato di una correzione angolare, in modo tale che la sensibilità dello strumento vari a seconda della direzione della radiazione incidente, rispetto alla normale. Tale correzione è direttamente proporzionale ai valori assunti dalla funzione coseno dell'angolo di incidenza misurato dalla perpendicolare. Tale comportamento è ben osservabile sui diagrammi Figura 13 ed è costituito da un cerchio nel grafico polare e da una sfera perfetta nella rappresentazione tridimensionale. La principale difficoltà con i sistemi a fascio largo è rappresentata dal fatto che l'illuminamento del soffitto di solito non corrisponde al livello presente sul compito visivo<sup>11</sup>; questa difficoltà è in parte ridotta dall'utilizzo di appositi meccanismi di controllo come si è visto nei paragrafi precedenti. L'utilizzo di un sensore a fascio ampio consente di avere delle informazioni più rappresentative dell'intero piano di lavoro e che risultano meno dipendenti dalle attività degli utenti dell'ambiente.

## **9. Luce naturale e artificiale negli ambienti**

La distribuzione della luce naturale e il rapporto tra illuminamento del compito visivo e del soffitto hanno un impatto diretto sulle performance dei sistemi di controllo. Il legame tra luce naturale, artificiale e rapporto di illuminamento sul compito visivo e sul soffitto risulta critico per determinare la posizione migliore per i sensori.

Quando la luce entra da una finestra verticale, l'illuminamento delle superfici verticali è maggiore rispetto a quelle orizzontali. La luce naturale utile è quella diffusa dalla volta celeste, riflessa dal terreno e dagli edifici circostanti: quella proveniente direttamente dal sole è generalmente troppo intensa per creare un ambiente confortevole e quindi deve essere bloccata o diffusa.

La luce nelle giornate di cielo sereno, anche per edifici esposti a sud, entra nell'ambiente quasi orizzontale o addirittura verso l'alto dovuto ai trattamenti diffondenti della finestra o di re-indirizzo della luce verso l'alto. Di conseguenza, in uno spazio illuminato dalla luce naturale, soffitto e pareti tendono ad essere egualmente illuminati.

Gli apparecchi di illuminazione sono generalmente montati al soffitto e indirizzano il flusso luminoso verso il basso dove è posto il compito visivo. Fatta eccezione per gli apparecchi a sospensione con doppia emissione, la luce che raggiunge il soffitto è quella che viene riflessa dalle altre superfici del locale (pareti, pavimento e fregio). Di conseguenza il soffitto e in misura minore le pareti, sono meno illuminate rispetto al compito visivo; inoltre l'illuminamento del soffitto varia in funzione della geometria della stanza e delle caratteristiche delle superfici, come ad esempio il colore.

A parità di illuminamento del piano di lavoro, si avrà un minore illuminamento del soffitto in un ambiente con elevate altezze e superfici scure delle pareti, rispetto alla situazione opposta di superfici chiare e ridotta altezza del locale. Negli uffici, il rapporto tra illuminamento del soffitto e del piano di lavoro può variare da 1:5 a 1:10<sup>12</sup>.

Come si è detto nel paragrafo precedente, i sensori sono generalmente montati sul soffitto e ricevono luce riflessa dal piano di lavoro e da tutte le altre superfici della stanza. Per un controllo accurato dell'illuminamento sul piano di lavoro, la collocazione 'ideale' del sensore dovrebbe essere sul piano stesso, ma ciò è impossibile per ragioni pratiche e quindi i sensori sono collocati sul soffitto per non intralciare le normali attività che si svolgono all'interno dell'ambiente. La collocazione dei sensori sul soffitto complica il processo di controllo, dal momento che il sensore risulta sensibile alla distribuzione luminosa dell'intera scena.

<sup>11</sup> Il contributo di luce naturale tende a illuminare in modo quasi uguale sia il soffitto che il piano di lavoro; al contrario la luce artificiale, ad esclusione dei casi in cui si abbiano apparecchi a sospensione con emissione diretta ed indiretta, tende a illuminare meno il soffitto rispetto al piano di lavoro.

<sup>12</sup> NLRIP Specifier Report The objective source of lighting product information, "Phosensors. Dimming and switching System for daylight Harvesting", Volume 11, Number 1, October 2007.

## **10. Tempo di risposta**

Fluttuazioni momentanee del valore di illuminamento sul sensore possono essere originate dal passaggio di nubi (nel caso di installazioni all'esterno) o dal passaggio di un utente nella zona inquadrata dal dispositivo di controllo (posizionamento in ambienti interni). Per evitare una fluttuazione di flusso luminoso emesso, dovuto a cambiamenti momentanei delle condizioni di illuminamento nelle zone di misura, molti sensori con controllo proporzionale implementano un filtro passa basso che esegue una media temporale del segnale proveniente dalla fotocellula. Costanti di tempo tipiche per questi filtri vanno da qualche secondo a un minuto. Anche sensori con controllo integrativo, implementano filtri di questo tipo con costanti di tempo dell'ordine di qualche secondo.

Valori elevati della costante di tempo evitano che gli utenti siano disturbati da continue variazioni dei livelli di illuminamento prodotti dalla componente artificiale, dovuti alla modulazione, da parte del sensore, del flusso luminoso emesso dalle lampade. Occorre però considerare che costanti di tempo troppo lunghe possono essere controproducenti ai fini del confort; si supponga infatti che il livello di illuminamento sia troppo basso e che, a causa di una costante di tempo del filtro troppo elevata, l'ambiente rimanga in penombra per un periodo di tempo più lungo del dovuto. Valori asimmetrici della costante di tempo per aumenti e diminuzioni della luce misurata, possono risolvere entrambe le situazioni esposte.

Per i controlli di tipo swithing, la costante di tempo, tipicamente nell'intorno dei 30 minuti, evita il continuo intervento del controllo sull'impianto. Anche in questo caso valori asimmetrici della costante, possono essere utili: l'accensione dell'impianto deve essere immediata, cioè non appena il livello di illuminamento sulla fotocellula raggiunge il set-point (si evita che gli utenti rimangano nell'oscurità più del tempo necessario), mentre lo spegnimento sarà soggetto all'effetto della costante di tempo.

Alcuni costruttori offrono la possibilità all'utente di fissare la costante di tempo all'interno di un intervallo (in questo modo valori differenti della costante possono essere immediatamente testati sull'installazione) e inoltre possibile disabilitare temporaneamente questa funzionalità durante le fasi di set-up del sensore. La possibilità di regolazione della risposta del sistema è particolarmente utile quando il sensore lavora in combinazione con lampade a scarica, in cui la riaccensione dopo lo spegnimento non è possibile a caldo, ma solo dopo che un certo intervallo di tempo è trascorso dallo spegnimento.

## **11. Intervallo di risposta**

È l'intervallo dei valori assunti dall'uscita del controllo in corrispondenza del quale si ha un'accurata misura della luce incidente (senza fenomeni di saturazione o di influenza del rumore). Il limite inferiore è dato dal rumore dell'elemento fotosensibile e dalla risoluzione dell'elettronica utilizzata; il valore massimo è dato dalla specifica dell'alimentatore delle lampade (10 V nel caso di ballast 0-10V), oppure dalla saturazione della fotocellula.

Talvolta il sistema è dotato di scale differenti, in modo da garantire l'adattabilità alle diverse situazioni impiantistiche. Il progettista si deve assicurare che il sistema di controllo funzioni correttamente con i livelli di illuminamento che si possono rilevare nella posizione di installazione; ad esempio un sistema ad anello aperto con fotocellula all'esterno sarà soggetto a una variazione più ampia e a valori mediamente più levati rispetto a quelli registrati da un sistema ad anello chiuso installato all'interno di un edificio.

Valori indicativi per i livelli di illuminamento possono essere i seguenti:

- fotocellula montata sul soffitto in uno spazio interno con finestre: 10-5000 lux
- fotocellula montata in un atrio, in un pozzo di luce : 100 -50 000 lux

- fotocellula montata all'esterno dell'edificio: 1000 lux a 100 000 lux (ammesso che non sia schermata)

## 12. Regolazione manuale

Questo tipo di regolazione deve essere preso in considerazione perché trova larga applicazione in uffici destinati ad una sola persona. Gli utenti regolano il livello della luce artificiale in funzione della componente di luce naturale presente e il controllo personale dei livelli di illuminazione aumenta il grado di soddisfazione e gradimento verso l'impianto. Alcuni studi hanno evidenziato che un controllo manuale (più facile da installare e da utilizzare) della luce in uffici utilizzati da una singola persona, ha portato ai medesimi risparmi, ottenuti da un sistema di regolazione automatico basato su sensori<sup>13</sup>.

## 13. Sensori di presenza

Esistono fondamentalmente due diverse tecnologie per questo tipo di sensore:

- a) PIR
- b) Ultrasuoni

I sensori PIR reagiscono ai raggi infrarossi emessi da persone e oggetti (come ad esempio di radiatori per il riscaldamento). Questi sensori suddividono l'area monitorata in segmenti (grid), il cui numero è indice della qualità del sensore stesso. Maggiore è il numero di segmenti, più grande sarà la risoluzione del sensore e quindi maggiore sarà l'altezza di installazione possibile. Al crescere dell'altezza di installazione, maggiore sarà l'area coperta da ciascun segmento sul pavimento e quindi minore sarà la sensibilità del sensore.

I sensori ad ultrasuoni sfruttano l'effetto doppler per rilevare l'occupazione degli spazi emettendo onde acustiche, non udibili, nello spazio circostante. L'effetto doppler è un fenomeno fisico che consiste in un'apparente variazione della frequenza, di un'onda percepita da un osservatore che si trovi in moto relativo rispetto alla sorgente emittente. Il fenomeno interessa qualunque tipo di onda, e in particolare le onde sonore, per le quali è più facilmente rilevabile. L'effetto prende il nome dal fisico austriaco, Christian Johann Doppler che osservò che se una sorgente sonora, che emette un suono ad una frequenza costante, si muove verso l'osservatore, questi percepisce un suono più acuto, mentre se essa si allontana egli ne percepisce uno più grave. Il fenomeno si osserva, ad esempio, quando si ode il fischio di un treno dalla banchina di una stazione o da un altro treno.

La Tabella 2 riassume le tecnologie disponibili e le caratteristiche degli spazi che dovrebbero favorire una tecnologia piuttosto che un'altra.

Tabella 2 Tecnologie applicabili in funzione delle caratteristiche degli spazi da controllare<sup>14</sup>

|                                     | <b>PIR<br/>Commutatori a<br/>parete</b> | <b>PIR a soffitto e<br/>parete</b>                                     | <b>Sensori ultrasuoni<br/>a soffitto</b>          | <b>Tecnologia mista</b>   |
|-------------------------------------|---|--|---|---|
| <b>Tipo di copertura</b>            | - linea di vista<br>- cut off           | - linea di vista<br>- cut off <sup>15</sup>                            | - volume<br>- manca un cut-off<br>definito        | - copertura<br>completa<br>- cut off                                    |
| <b>Applicazioni<br/>compatibili</b> | - piccoli spazi chiusi                  | - spazi in cui il<br>sensore ha<br>visibilità delle<br>attività svolte | - spazi aperti<br>- spazi con ostacoli<br>- bagni | - aule scolastiche<br>- spazi con<br>movimenti lenti<br>degli occupanti |

<sup>13</sup> C. DiLouie, "Personal vs Automatic" Architectural Lighting 10(3):46-49

<sup>14</sup> Tratto dalla pubblicazione, "Occupancy sensor Design and Application Guide", Watt Stopper Legrand

<sup>15</sup> "Cut-off" indica la possibilità di definire chiaramente un limite per la copertura del sensore, in modo tale non sia sensibile a movimenti che avvengono negli spazi adiacenti

|   | <b>PIR<br/>Commutatori a<br/>parete</b>  | <b>PIR a soffitto e<br/>parete</b>   | <b>Sensori ultrasuoni<br/>a soffitto</b>                      | <b>Tecnologia mista</b>                            |
|---|--|--|---|--|
| <b>Caratteristiche<br/>Applicazioni<br/>incompatibili</b> | - movimenti lenti degli occupanti<br>- ostacoli che bloccano la direzione di vista del sensore | - movimenti lenti degli occupanti<br>- ostacoli che bloccano la direzione di vista del sensore | - soffitti alti<br>- alti livelli di vibrazione o flusso aria | - alti livelli di portata dell'aria<br>- magazzini |

Lo schema di flusso della Figura 14, consente di determinare, in maniera rapida, la tecnologia più adatta per la propria applicazione.

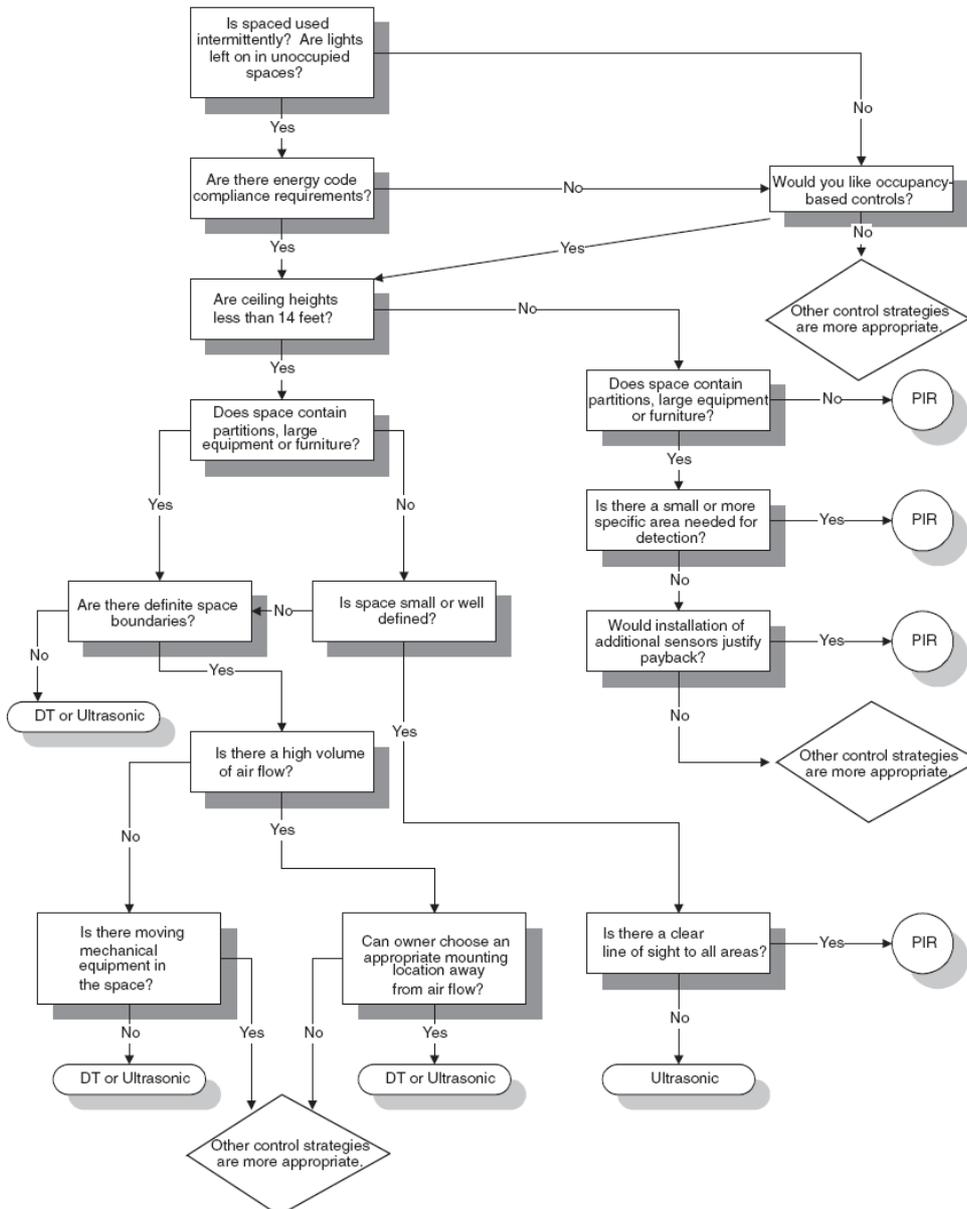
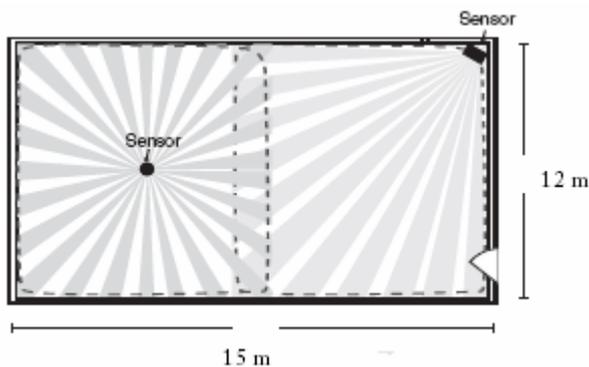


Figura 14 Scelta della tecnologia più adatta alla propria applicazione<sup>16</sup>

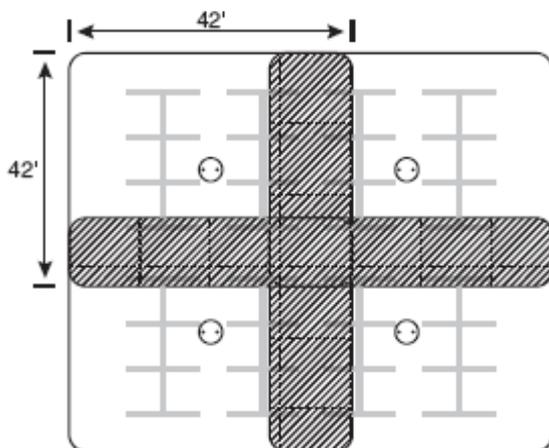
<sup>16</sup> Tratto dalla pubblicazione, "Occupancy sensor Design and Application Guide", Watt Stopper Legrand

### 13.1 Disposizione dei sensori di presenza



Per ciascuna tecnologia, sono disponibili coperture di diversa forma e dimensione. Mentre piccole applicazioni possono essere coperte da un solo sensore, aree più grandi beneficiano della suddivisione in zone differenti, ciascuna controllata dal proprio sensore. Nello stesso ambiente è possibile combinare sensori con diverse tecnologie, come mostrano gli esempi applicativi che seguono.

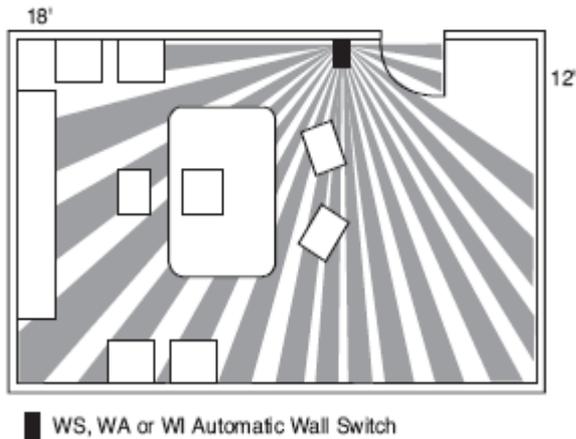
Particolare attenzione deve essere dedicata al posizionamento dei sensori in modo da evitare la possibilità di false accensioni e spegnimenti; ad esempio un sensore ad ultrasuoni non dovrebbe mai essere posto nei pressi di una porta. In uno spazio ampio, come una sala di lettura, si consiglia un sensore a doppia tecnologia a causa dei diversi livelli di movimento che si possono avere nell'ambiente. Il sensore a infrarossi è montato nell'angolo, in modo che sia possibile sfruttare la direzionalità della sua risposta (cut off) al fine di escludere il movimento della porta. La parte restante dello spazio è coperta da un sensore con una copertura su 360°.



**Descrizione:** ampio spazio destinato ad uffici, suddivisi in box. Il lavoro avviene per la maggior parte all'interno di ciascuno dei box.

**Richieste:** Il sensore deve poter vedere attorno agli ostacoli rappresentati dalle pareti dei box e deve avere sufficiente sensibilità per cogliere movimenti 'fini', come la scrittura a videoterminale.

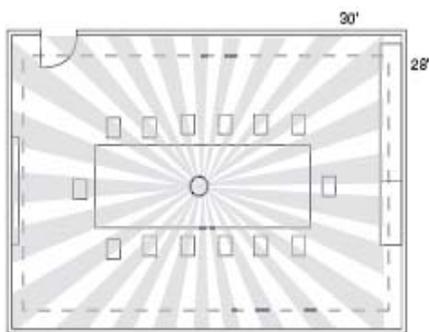
**Soluzione:** sensore ad ultrasuoni che non è disturbato dagli ostacoli, in modo che l'attività del personale all'interno dei box, sia rilevata accuratamente. Per assicurare la copertura completa porre i sensori in modo che le singole coperture si sovrappongano tra loro (20%).



**Descrizione:** Ufficio singolo con una finestra, dove si svolgono attività di lettura, riunioni e lavoro al PC.

**Richieste:** Controllo ON/OFF con elevata sensibilità. Il detector deve essere in grado di cogliere movimenti fini, come la videoscrittura.

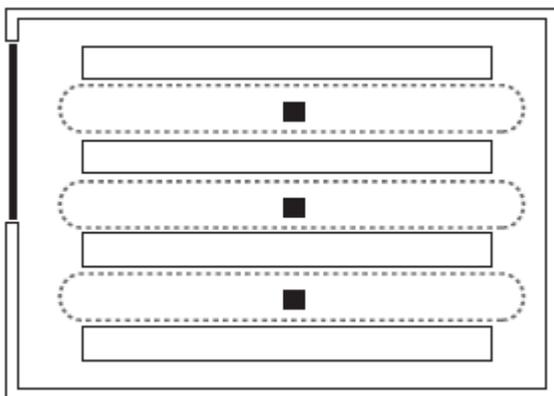
**Soluzione:** il sensore deve avere una visione diretta e chiara della scena. Il sensore non deve essere ostacolato da porte o altri ostacoli che ne blocchino la vista. Il dispositivo deve essere dotato di una soglia che consenta di lasciare spento l'impianto quando il livello di luce ambientale nella stanza è ritenuto sufficiente.



**Descrizione:** Sala conferenze di media grandezza, utilizzata per riunioni e presentazioni.

**Richieste:** sensore con controllo ON/OFF. Il sensore deve avere grande sensibilità, dal momento che ci possono essere piccoli movimenti durante i meeting. Occorre che la luce possa essere spenta durante le presentazioni.

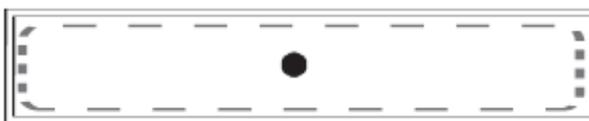
**Soluzione:** sensore ibrido posto al centro della stanza, con possibilità di esclusione per consentire di avere una bassa illuminazione durante le presentazioni.



**Descrizione:** magazzino, con scaffali e soffitto molto alto. Gli scaffali sono occupati in maniera sporadica durante la giornata.

**Richieste:** controllo di tipo ON/OFF che lasci la luce accesa quando gli scaffali sono occupati.

**Soluzione:** sensore PIR installato come nello schema, in modo che la luce rimanga accesa solo dove serve.



**Descrizione:** corridoio in un palazzo destinato ad uffici. Ci sono pareti da entrambi i lati. Non ci sono finestra, ma porte lungo entrambi i lati.

**Richieste:** controllo ON/OFF e accensione immediata dell'impianto quando un utente entra da uno dei due lati o da una porta.

**Soluzione:** sistema ad ultrasuoni, ponendo il sensore al centro del corridoio, in mezzo ai due ingressi.

Milano 31.10.08

Il responsabile scientifico  
Prof. Maurizio Rossi  
Dip. Indaco  
Politecnico di Milano