

ENEA

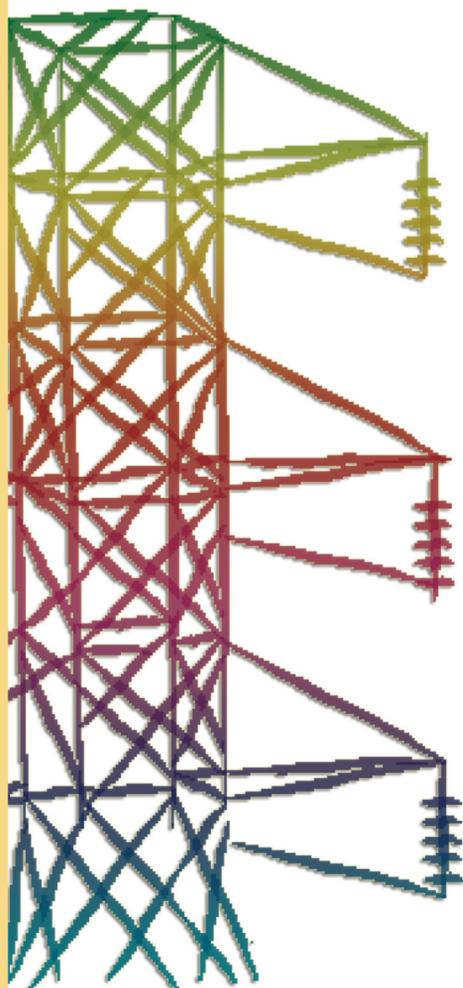
Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

**Determinazione dell'influenza dei sistemi semitrasparenti
sulle prestazioni energetiche e luminose degli edifici e
interazione condizionamento-illuminazione**





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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Determinazione dell'influenza dei sistemi semitrasparenti sulle prestazioni energetiche e luminose degli edifici e interazione condizionamento-illuminazione

DETERMINAZIONE DELL'INFLUENZA DEI SISTEMI SEMITRASPARENTI SULLE PRESTAZIONI
ENERGETICHE E LUMINOSE DEGLI EDIFICI E INTERAZIONE CONDIZIONAMENTO-
ILLUMINAZIONE

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione.

Interazione condizionamento e illuminazione

Responsabile Tema: Marco Citterio, ENEA

Premessa	4
1 Andamento dei consumi, potenzialità di risparmi conseguibili.....	5
2 Normativa	7
2.1 La norma europea UNI EN 15193-2008.....	7
2.1.1 Metodo rapido (quick method)	8
2.1.2 Metodo dettagliato (comprehensive method)	8
3 Strategie per il risparmio energetico nell'illuminazione.....	8
3.1 Principi generali.....	8
3.2 L'illuminazione artificiale	11
3.2.1 L'efficienza luminosa delle sorgenti.....	11
3.2.2 L'alimentazione elettronica delle lampade fluorescenti	18
3.2.3 Il rendimento ottico degli apparecchi e il fattore di utilizzo	20
3.3 Integrazione luce artificiale/naturale.....	25
3.3.1 Principi generali.....	25
3.3.2 Componenti trasparenti.....	27
3.3.3 Sistemi di schermatura.....	28
3.3.4 Sistemi di trasporto della luce naturale.....	31
3.3.5 Sistemi di illuminazione diurna	32
3.3.6 Sistemi PSALI e HSC.....	33
3.4 Sistemi di controllo.....	34
3.4.1 Obiettivi di gestione e controllo della luce	34
3.4.2 Benefici derivanti dall'utilizzo dei sistemi di gestione e controllo della luce	34
3.4.3 Dispositivi sui quali i sistemi attuano il controllo	35
3.4.4 Architettura del sistema	35
3.4.5 Strategie di controllo.....	35
3.4.6 Tecniche di controllo	36
3.4.7 Dispositivi presenti nei sistemi di controllo:	36
3.4.8 Protocolli di gestione e comunicazione dei dati	36
3.4.9 Ambito spaziale di riferimento	36
3.4.10 Analisi di mercato: aziende e prodotti analizzati.....	38
3.5 Metodologie di Modellazione e Calcolo.....	42
3.5.1 Metodi di calcolo manuali	42
3.5.2 I modelli in scala.....	42
3.5.3 Software di calcolo computerizzato.....	44
3.5.4 Verifica dell'attendibilità delle simulazioni.....	47
4 Influenza delle prestazioni dell'involucro trasparente sui consumi per illuminazione e climatizzazione	47
4.1 Introduzione al problema	47
4.2 Analisi illuminotecnica	49
4.3 Analisi energetica.....	52
4.4 Potenzialità e criticità dell'analisi.....	56
5 Casi Applicativi e Casi studio.....	56
5.1 Sistema di controllo di base in edificio scolastico.....	57
5.1.1 Risultati.....	59

Premessa

Gli indicatori della qualità ambientale visiva, termo-igrometrica e di qualità dell'aria sono divenuti sempre più complessi, numerosi ed intercorrelati. In particolare nell'ambiente luminoso i livelli di illuminamento e l'abbagliamento sono ormai considerati come elementi di primo livello per la valutazione del comfort e vengono sempre più spesso affiancati da parametri di secondo livello, atti ad affinare la caratterizzazione ambientale: gli aspetti colorimetrici nella loro distribuzione spaziale, integrando le informazioni relative alle rese cromatiche ed alle temperature di colore delle sorgenti luminose, rappresentano un esempio del secondo livello. Una metodologia efficace e affidabile di progettazione, orientata alla realizzazione di ambienti confortevoli ed al tempo stesso energeticamente efficienti, non è ancora stata sviluppata.

Dal punto di vista della sola illuminazione artificiale è opinione comune che il risparmio energetico nell'illuminazione si ottenga semplicemente con la sostituzione delle sorgenti luminose con altre a maggiore efficienza. Questo, tuttavia, è solo uno dei possibili interventi che, per altro, se applicato isolatamente, rischia di essere del tutto inefficace. Occorre considerare, infatti, che il risparmio avviene sì installando lampade con consumo inferiore a parità di flusso luminoso emesso, ma soprattutto, molto semplicemente, spegnendole o riducendone il flusso quando possibile. Ecco che, nell'illuminazione di interni, intervengono tutti quei dispositivi (rilevatori di presenza, sensori di luminosità, dimmer, sistemi di controllo) in grado di modulare automaticamente il flusso delle sorgenti luminose spegnendole se non vi sono utenti nei locali o riducendone il flusso se vi è un apporto di luce naturale dall'esterno (

Fig. 1).

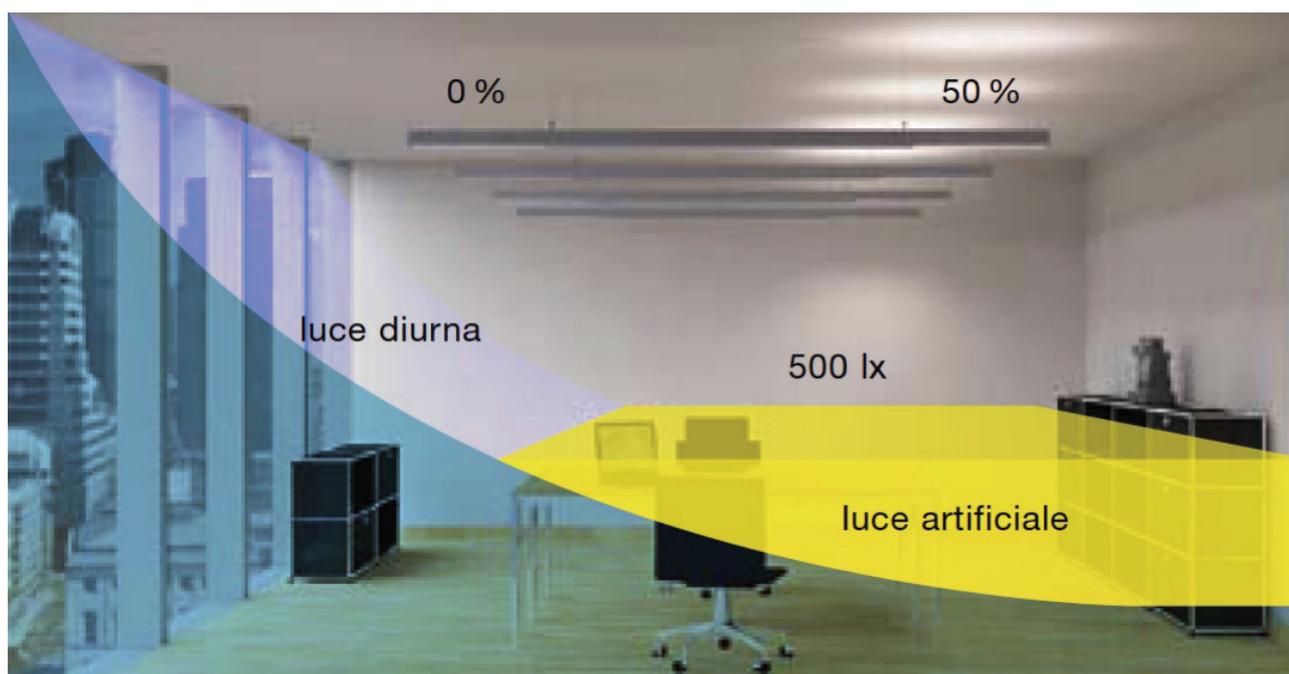


Fig. 1 - Lo scopo dell'integrazione della luce naturale e artificiale è di ottenere un notevole risparmio energetico garantendo il massimo benessere psicofisiologico (fonte: Zumtobel).

Naturalmente il risparmio energetico si ottiene anche facendo lavorare nelle migliori condizioni le sorgenti luminose a scarica attraverso l'uso di ballast elettronici in grado di mantenere alta l'efficienza della lampada per tutta la sua durata. Il risparmio si consegue, inoltre, utilizzando apparecchi di qualità con ottiche di precisione tali da garantire un alto rendimento dell'intero sistema e attuando una progettazione illuminotecnica mirata e consapevole. Un serio programma di risparmio energetico, dunque, deve basarsi sulla scelta delle sorgenti adatte alla specifica applicazione, sull'alta qualità degli alimentatori, sull'elevato rendimento degli apparecchi e sull'uso di sistemi di gestione dell'impianto.

Al fine di trarre i massimi vantaggi di comfort visivo che di risparmio energetico, derivanti da un maggior utilizzo della luce naturale disponibile, ai più tradizionali metodi di controllo solare, ottenuto

attraverso elementi architettonici esterni (frangisole e sistemi esterni di ombreggiamento fissi) ed elementi di schermatura interni (tende e veneziane), si sono affiancate, negli ultimi anni, differenti tipologie di materiali trasparenti e sistemi di controllo attivo della luce, nonché sistemi di captazione e conduzione della luce e sistemi vetrati intelligenti ("smart windows") capaci di cambiare la propria trasparenza in risposta a parametri ambientali; la possibilità di integrare tali sistemi con sistemi commerciali di controllo della luce è ormai realizzabile.

In questa tematica più generale si inserisce la problematica relativa agli ambienti di grandi dimensioni e profondi, oppure con superfici vetrate insufficienti, che hanno generalmente bisogno di integrare l'illuminazione naturale con quella artificiale in maniera permanente (impianti PSALI, Permanent Supplementary Artificial Light for Interiors) oppure saltuaria. In ambedue i casi si pone il problema della contemporanea presenza di sorgenti di luce, quella naturale e artificiale, che possono avere, se non opportunamente studiate, caratteristiche spettrali e distributive totalmente diverse, tali da creare un ambiente luminoso non gradevole e/o inadeguato ai compiti visivi svolti. Pertanto gli apparecchi e le sorgenti luminose artificiali vanno scelte in maniera opportuna per evitare fenomeni di discomfort visivo; tali scelte sono fortemente condizionate, in termini di resa cromatica e di distribuzione spettrale, non solo dalla variabilità della luce naturale esterna, ma anche dalla presenza delle superfici vetrate e dai sistemi di ombreggiamento, statici e dinamici, che ne possono alterare la composizione.

Le problematiche connesse all'interazione ed al controllo della luce naturale tramite sistemi tradizionali e/o superfici trasparenti di tipo innovativo, ovvero all'integrazione della luce naturale con impianti di illuminazione artificiale (PSALI), sono essenzialmente caratterizzate dalla diversità degli spettri di emissione, dalla variabilità temporale delle caratteristiche spettrali e di flusso, e dalla diversa provenienza della luce naturale ed artificiale. L'utilizzo invece di lampade a diversa tecnologia, tradizionale e/o innovativa (Led, o-led, sistemi biodinamici etc..) all'interno di uno stesso impianto d'illuminazione (MTLS, Multi-Type Lamps System), in alternativa ai più tradizionali STLS (Single-Type Lamps System), può opportunamente essere perseguito quando esiste incompatibilità delle esigenze ambientali con i periodi di messa a regime delle lampade, necessità di risparmio energetico, ovvero necessità di controllo colorimetrico.

I vantaggi in termini estetici, di esigenze visive o tecniche, e di risparmio energetico, introdotti da soluzioni di questo tipo d'altra parte introducono una serie di problematiche dovute alle diverse caratteristiche prestazionali delle differenti lampade, ed alla integrazione di differenti spettri, il naturale e l'artificiale.

L'effetto della luce naturale come regolatore chiave dei processi biologici, della produttività negli ambienti commerciali e lavorativi, dei SAD (Seasonal Affective Disorder) è da molti anni conosciuta, anche se studi sistematici e statisticamente significativi sono piuttosto recenti; questa importante funzione della luce naturale ha fatto nascere in questi anni, grazie alle tecniche ormai disponibili, una nuova tipologia di illuminazione ibrida, nota come HSL (Hybrid Solar Lighting), i cui componenti e sistemi stanno facendo il loro primo ingresso nel mercato; scopo della HSL è quello di portare la luce naturale anche nelle zone più lontane dalle aperture esterne, per le quali sino ad ora si ricorreva a impianti PSALI con apparecchi tradizionali.

Infine dal punto di vista progettuale l'ottimizzazione visiva ed energetica, basata su parametri di primo e secondo livello, può essere ottenuta solo attraverso l'analisi di numerosi parametri intercorrelati. I metodi di ottimizzazione generalmente usati richiedono che la funzione obiettivo, di cui si vuole trovare un massimo, sia differenziabile, e forniscono di conseguenza una soluzione del problema che rappresenta un ottimo locale per tale funzione. La presenza di molti parametri tuttavia comporta la definizione di una funzione obiettivo caratterizzata da molti massimi locali, e non necessariamente continua e differenziabile in tutto il dominio, impone l'uso di tecniche di ottimizzazione globale attualmente scarsamente applicate in campo illuminotecnica, quali gli algoritmi genetici e le simulazioni annealing.

1 Andamento dei consumi, potenzialità di risparmi conseguibili

Per verificare la valenza economica degli interventi per il risparmio energetico e i benefici ottenibili occorre individuare l'incidenza percentuale dei consumi per l'illuminazione sul totale dei consumi elettrici negli edifici. Dai dati ad oggi disponibili il 3,5% del consumo nazionale di energia è costituito dall'illuminazione. In ogni settore il consumo per l'illuminazione incide per le seguenti percentuali (fonte Elettrico-Plus - Reed Business Information):

- uffici 20-40%
- ospedali 15%-30%;
- industria 15%;
- scuole 10%-15%,
- abitazioni 5%-10%.

Secondo le stime dell'Istituto per la Sostenibilità Ambientale (IES) della Commissione Europea, è possibile conseguire in questo settore un risparmio, a livello europeo, di 36 TWh/anno entro il 2015. La stima non è ripartita in base al paese: tuttavia, ipotizzando una ripartizione proporzionale ai consumi, si può stimare per l'Italia circa il 10% del risparmio europeo; cioè circa 3,6 TWh/anno, pari al 4% del consumo di energia elettrica del settore, e l'1,1% del consumo complessivo nazionale (Fig. 2 e Fig. 3).

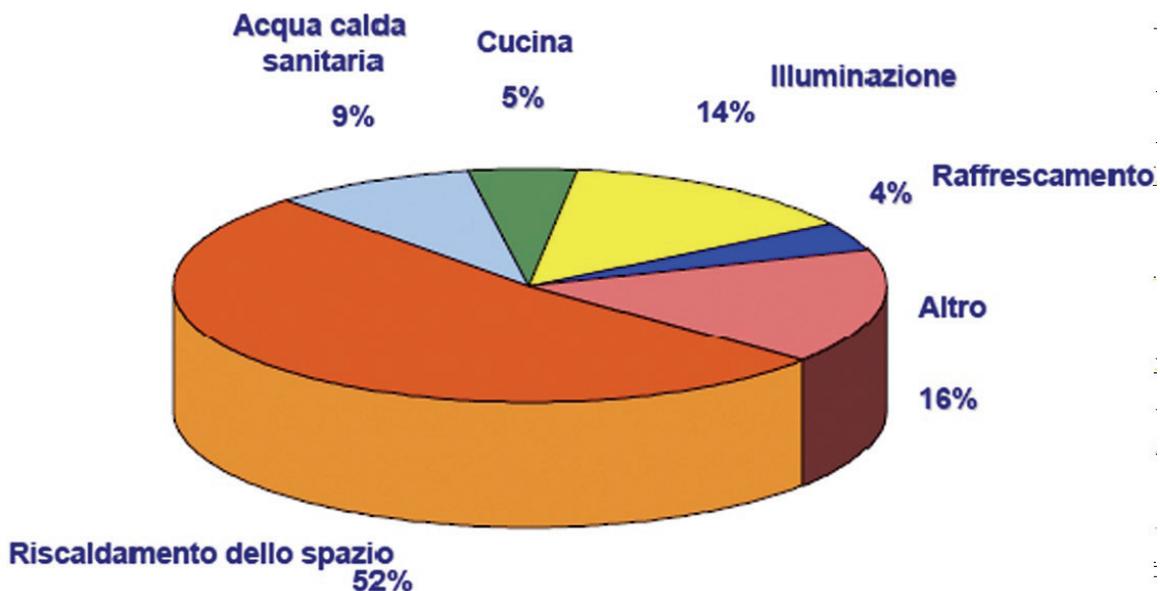


Fig. 2 - Ripartizione attuale dei consumi nel settore terziario secondo dati ENEA.

Potenziale Tecnico di risparmio di energia elettrica al 2020 valutabile dal punto di vista dei costi					
Settore	Totale	Residenziale	Terziario commerciale	Terziario Pubblico	Industriale
Uso finale	[TWh/anno]	[TWh/anno]	[TWh/anno]	[TWh/anno]	[TWh/anno]
Illuminazione	45,4	4,5	20,7	4,7	15,5
Motori elettrici	39,4	1,1	10,7	1,0	26,6
Elettrodomestici	7,5	7,5	0,0	0,0	0,0
Altro	10,7	0,0	5,9	1,6	3,2
Totale	103,0	13,1	37,2	7,3	45,3

Fig. 3 - Potenziale Tecnico di risparmio di energia elettrica al 2020 valutabile dal punto di vista dei costi secondo Greenpeace (contenuto nel rapporto "La rivoluzione dell'efficienza, il potenziale di efficienza energetica negli usi finali di energia elettrica in Italia al 2020 e i benefici connessi").

L'illuminazione domestica, invece, consuma circa 7 TWh/anno, poco più dell'11% del consumo elettrico residenziale. Si tratta di un settore dove sussistono maggiori margini per il miglioramento dell'efficienza rispetto a quello terziario; tuttavia il risparmio presumibile - in valore assoluto - è ancora più esiguo.

La maggior parte delle lampade installate in Italia per l'illuminazione domestica è ad incandescenza o ad alogeni, di efficienza molto bassa; solo il 4,4% è rappresentato da lampade ad alta efficienza. Secondo lo studio IES, il ricorso a tecnologie più recenti (vedi i LED) ai fini del risparmio energetico viene citato solo marginalmente: esse vengono considerate ancora troppo giovani e costose per un uso generalizzato e l'attenzione viene rivolta principalmente alla migrazione verso le lampade FLC. Lo studio indica nel 25% la percentuale di penetrazione di lampade FLC auspicabile in tempi ragionevolmente brevi, e ne ricava un'ipotesi realistica di risparmio di 16 TWh/anno, a livello europeo, entro il 2015 da cui è possibile desumere per l'Italia un risparmio di 2,3 TWh/anno (14,6% del risparmio europeo), pari a ben il 29% del consumo per l'illuminazione residenziale, ma a solo il 3,4% del totale dei consumi residenziali e ad un misero 0,7% del consumo complessivo nazionale (Tab. 1).

	Risparmio perseguibile (TWh/anno)	% sul consumo per illuminazione del settore	% sul consumo complessivo del settore	% del consumo nazionale
Terziario	3,6	15,72	4,08	1,13
Residenziale	2,3	28,75	3,40	0,72

Tab. 1 - Risparmi realisticamente perseguibili per illuminazione, al 2015, elaborazione dei dati contenuti in: Joint Research Centre of the European Community (JRC) - Institute for Environment and Sustainability (IES); "Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union: Status Report 2006", 2007; effettuata da Massimo Iarussi in "La luce e il risparmio energetico", su Luce e Design n. 2 – 2008

L'obiettivo (pur non esaltante se rapportato al consumo totale nazionale) sembra realistico ed effettivamente perseguibile. Occorre tuttavia essere consapevoli dell'esiguità dei numeri in gioco, per evitare facili ottimismo. Al contrario, le campagne informative spesso propagandano valori che non tengono conto di una percentuale realistica di penetrazione, ma si basano sull'ipotesi, puramente teorica, di migrazione di tutto il parco lampade esistente verso le FLC. L'ambiente domestico, invece, è caratterizzato da un gran numero di punti luce usati solo occasionalmente: ingressi, bagni, corridoi, ripostigli ecc. Solo un numero limitato di punti luce (soggiorno, cucina) viene usato per più ore al giorno, e solo per questi ultimi la conversione verso lampade FLC è effettivamente conveniente per l'utente.

Una descrizione più estesa del tema è riportata in [1] pagg.1-13.

2 Normativa

2.1 La norma europea UNI EN 15193-2008

La norma UNI EN 15193-2008 (Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione) definisce una procedura di valutazione del fabbisogno di energia elettrica per illuminazione artificiale degli edifici e propone un indicatore numerico di consumo chiamato LENI (Lighting Energy Numeric Indicator). Il LENI può essere ottenuto attraverso due differenti approcci: rapido e dettagliato.

In entrambi i metodi non vengono presi in considerazione alcuni aspetti che contribuiscono a determinare la reale prestazione dei sistemi, quali la presenza di sistemi di schermatura mobili e l'interazione degli utenti con gli apparecchi di illuminazione e/o i sistemi di schermatura.

Il LENI è calcolato attraverso la seguente formula:

$$\text{LENI} = W / A$$

dove:

W[kWh/anno]: energia complessiva consumata su base annua per l'illuminazione;

A[m²]: superficie totale di pavimento dell'edificio analizzato.

L'energia totale consumata su base annua per l'illuminazione artificiale W può essere calcolata attraverso la seguente formula:

$$W = W_L + W_P$$

dove:

W_L [kWh/anno] è l'energia complessiva consumata su base annua per il funzionamento dell'impianto di illuminazione artificiale;

W_P [kWh/anno] è l'energia parassita consumata su base annua per ricaricare le batterie dell'illuminazione di emergenza e per far funzionare i dispositivi dei sistemi di controllo in modalità standby.

2.1.1 Metodo rapido (quick method)

Consente una stima approssimata dei consumi annuali derivanti dall'uso dell'impianto di illuminazione artificiale. La potenza assorbita per l'illuminazione artificiale viene pesata in funzione del potenziale contributo della luce naturale e dell'incidenza dell'occupazione mediante valori tabellari definiti in funzione delle tipologie di edificio e dei criteri di controllo (manuale, automatico, automatico con regolazione del flusso luminoso, etc.), a questo vengono aggiunti i consumi parassiti imputabili ai componenti del sistema di controllo e agli apparecchi di illuminazione di emergenza. La descrizione dettagliata del metodo è riportata in [1], pagg. 14-17.

2.1.2 Metodo dettagliato (comprehensive method)

Consente di valutare in maniera più dettagliata i consumi annuali e mensili derivanti dall'uso dell'impianto di illuminazione artificiale considerando le caratteristiche architettoniche e impiantistiche specifiche di ciascuna zona dell'edificio. Anche in questo approccio la potenza assorbita dall'impianto è opportunamente pesata in funzione di alcuni fattori: la disponibilità di luce naturale in ambiente (componente diffusa); i criteri di controllo della luce (manuale, automatico, automatico con dimmeraggio); le ore di utilizzo della zona. In questo metodo, pur essendo previsto un maggior livello di dettaglio nell'analisi delle caratteristiche dell'edificio e del sistema di controllo progettato, l'influenza dei fattori citati viene considerata nel calcolo attraverso l'introduzione di valori ricavati da tabelle e riferiti a certe tipologie edilizie, ad alcune località ed a determinati criteri di controllo.

Una descrizione dettagliata del metodo è riportata in [2], pagg. 6-24.

3 Strategie per il risparmio energetico nell'illuminazione

3.1 Principi generali

La progettazione illuminotecnica mirata al contenimento dei consumi e al comfort degli utenti segue due modalità di intervento differenti nel caso in cui si realizzi un impianto ex-novo per un edificio in progettazione e in quello in cui si debba intervenire per migliorare le prestazioni di un impianto già esistente. Nel primo caso si possono ottenere risultati senz'altro più incisivi che nel secondo. In fase di progetto architettonico si può, infatti, prevedere un'articolazione degli spazi e delle aperture tale da massimizzare l'apporto di luce naturale durante le ore diurne. Per sfruttare al massimo la luce naturale occorre cominciare già con la distribuzione planimetrica dell'edificio (Fig. 4): l'orientamento a sud è quello che permette il massimo accesso alla radiazione solare e il migliore controllo degli eccessivi carichi termici estivi. Le aperture a sud sono quelle che permettono il migliore utilizzo della luce naturale a patto che sia accettabile una variabilità della qualità e quantità di luce a disposizione. Per finestre orientate fino a 30° sud-est o sud-ovest si hanno solo scarse diminuzioni delle prestazioni.

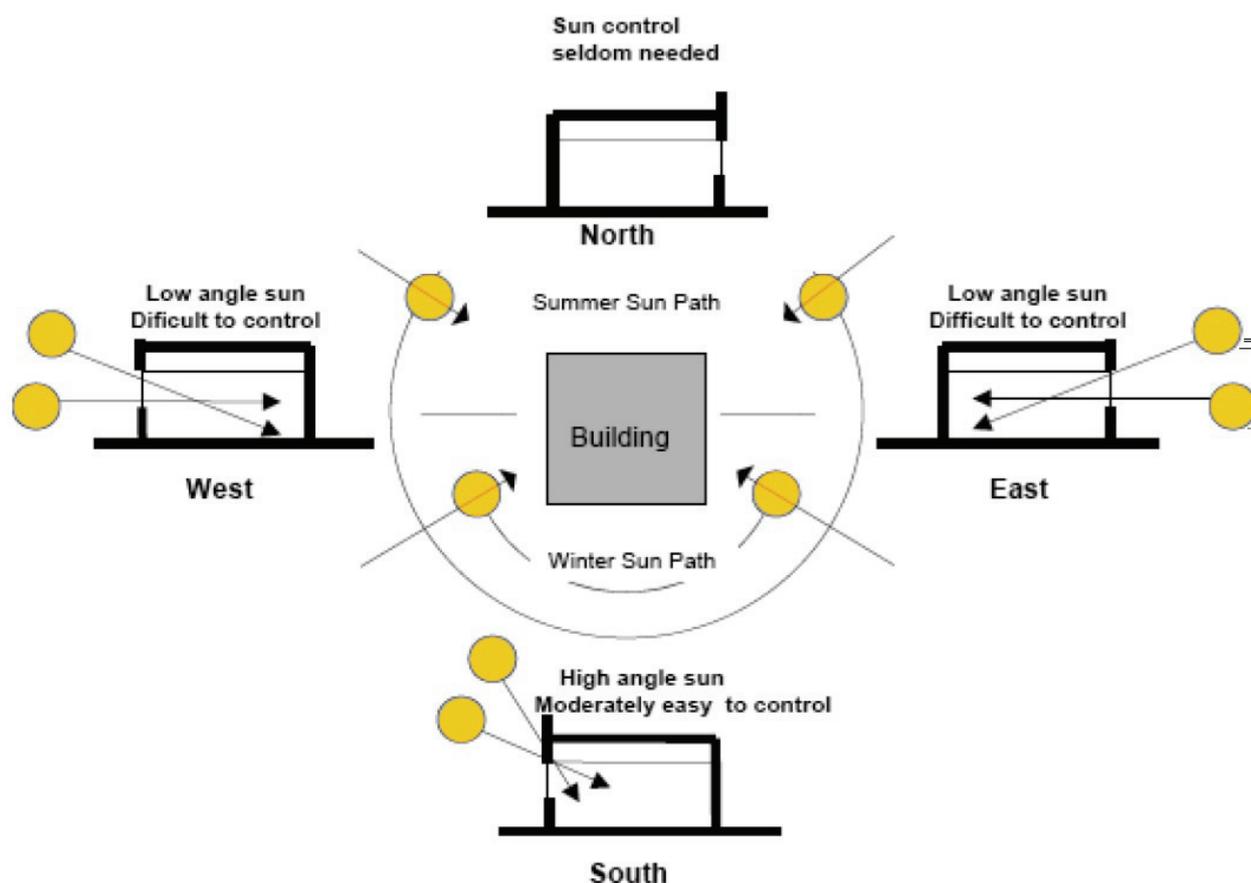


Fig. 4 - L'orientamento dell'edificio e delle aperture è una scelta fondamentale ai fini dello sfruttamento della luce naturale.

La luce che entra nell'ambiente lateralmente (side-lighting) riesce a penetrare per una profondità di circa 2-2,5 volte l'altezza della finestra (Fig. 5). Al massimo, comunque, una decina di metri. Una finestra più alta, a parità di superficie, porta più luce in profondità ma in ogni caso un ambiente non dovrebbe essere più profondo di due volte l'altezza del bordo superiore della finestra.

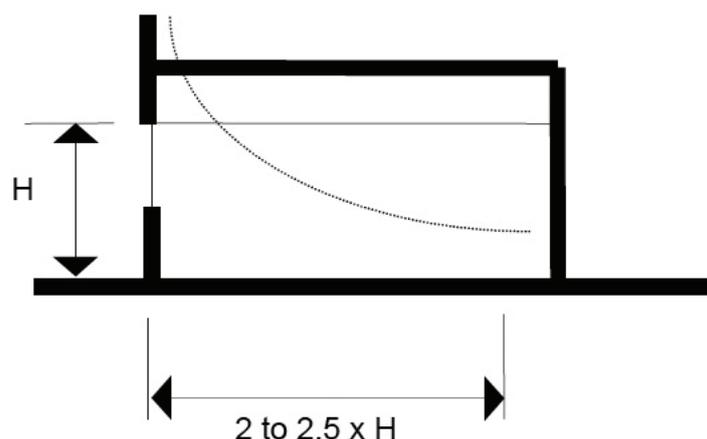


Fig. 5 - Profondità di penetrazione della luce naturale in un ambiente in rapporto con l'altezza dell'apertura

Per quantificare l'apporto di luce naturale negli ambienti si utilizza il Fattore di luce diurna, valore che rappresenta il rapporto tra l'illuminamento E su una superficie orizzontale posta dentro il locale dovuto alla luce proveniente dalla volta celeste (non si considera la radiazione diretta proveniente

dal sole) e quello che contemporaneamente si ha su una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione E_0 .

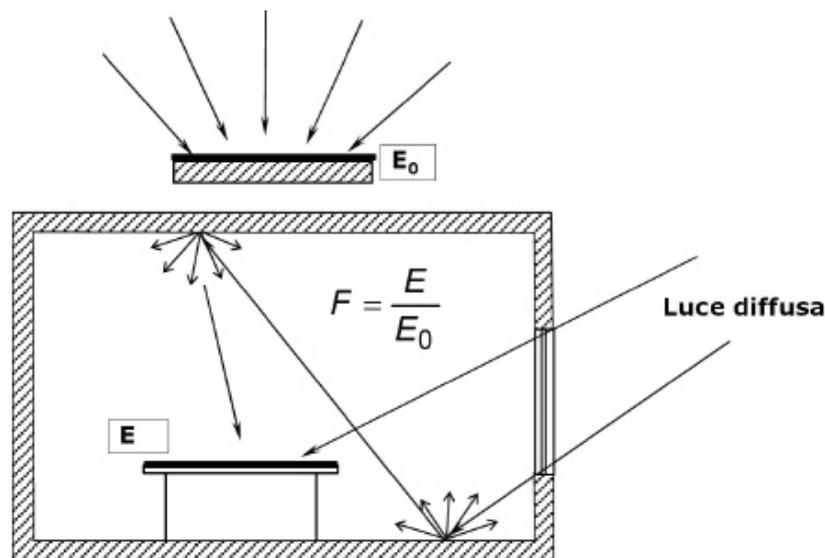


Fig. 6 - Schema del fattore di luce diurna

Si può calcolare facilmente il fattore medio di luce diurna globale ammettendo all'interno dell'ambiente considerato un campo luminoso perfettamente diffuso, ossia uguale in tutti i punti, con la seguente formula:

$$F_{mld} = \frac{\sum_i A_i \tau_i \varepsilon_i \psi_i}{S(1 - r_m)}$$

A_i , è l'area della finestra i-esima;

τ_i , è il coefficiente di trasmissione luminosa del vetro;

r_m , è il coefficiente di riflessione medio nel visibile delle superfici che costituiscono l'involucro dell'ambiente considerato;

ε_i , è il fattore finestra ossia il fattore di vista della volta celeste da parte della superficie della finestra, tiene conto delle ostruzioni;

ψ_i , è un fattore che tiene conto dell'ombreggiamento indotto sulla finestra dall'imbotte.

I valori di riferimento del fattore di luce diurna F indicano:

- $F < 0,3\%$ - insufficiente;
- $0,3\% < F < 2\%$ - discreto;
- $2\% < F < 4\%$ - buono;
- $F > 4\%$ - ottimo.

I valori consigliati per il fattore medio di luce diurna globale F_{mld} sono riportati nella Tab. 2.

ambito	residenze	palestre e refettori	uffici, scale, servizi igienici, spogliatoi	aule, laboratori	ambiti di degenza	ambulatori e locali per diagnostica	edilizia pubblica sovvenzionata
F _{mid}	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06

Tab. 2 - Fattore medio di luce diurna consigliato per diverse tipologie edilizie.

3.2 L'illuminazione artificiale

3.2.1 L'efficienza luminosa delle sorgenti

La scelta della sorgente luminosa ha un ruolo determinante: la qualità illuminotecnica dell'ambiente dipende in gran parte dalla fonte di luce con cui si equipaggiano gli apparecchi.

In questa sede si riportano alcuni cenni necessari alla comparazione tra l'efficienza luminosa delle sorgenti per perseguire l'obiettivo del risparmio energetico.

Occorre quindi avere una panoramica generale delle famiglie di sorgenti oggi disponibili, divise per principio di funzionamento: radiatori termici, lampade a scarica, emettitori luminescenti (Fig. 7).

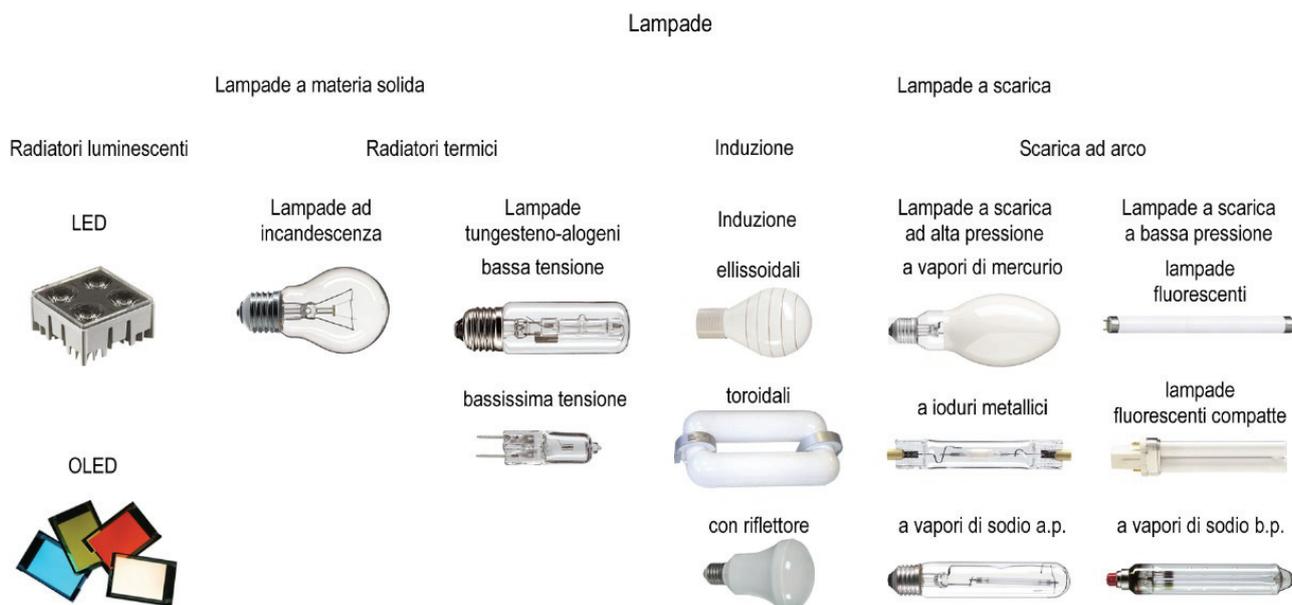


Fig. 7 - Schema delle principali famiglie di sorgenti luminose comunemente usate nell'illuminazione di interni ed esterni.

Tra le lampade esistenti solo alcune sono utilizzate nell'illuminazione di interni: quelle ad incandescenza, quelle ad alogeni, quelle fluorescenti (lineari o compatte), quelle a ioduri metallici e, da qualche anno, i LED.

Le sigle standard delle sorgenti luminose sono indicate nella Tab. 3 mentre la Tab. 4 mostra il confronto tra l'efficienza luminosa delle singole sorgenti, cioè il rapporto espresso in lumen/Watt tra il flusso luminoso emesso e la potenza assorbita.

Lampada ad incandescenza generica	A
Lampada ad incandescenza con riflettore parabolico	PAR
Lampada ad incandescenza con riflettore	R
Lampada ad alogeni con riflettore	QR
Lampada ad alogeni con riflettore dicroico aperta	QR-CB
Lampada ad alogeni con riflettore dicroico chiusa	QR-CBC
Lampada ad alogeni tubolare	QT
Lampada ad alogeni tubolare doppio attacco	QT-DE
Lampada a vapori di mercurio ellissoidale	HME
Lampada a vapori di mercurio con riflettore	HMR
Lampada a ioduri metallici ellissoidale	HIE
Lampada a ioduri metallici con riflettore	HIR
Lampada a ioduri metallici tubolare	HIT
Lampada a ioduri metallici tubolare doppio attacco	HIT-DE
Lampada a vapori di sodio alta pressione ellissoidale	HSE
Lampada a vapori di sodio alta pressione tubolare	HST
Lampada fluorescente	T
Lampada fluorescente compatta	TC
Lampada fluorescente compatta non integrata	TC-EL
Lampada fluorescente compatta con quattro tubi	TC-D
Lampada fluorescente compatta con 4 tubi, integrata	TC-DSE
Lampada fluorescente compatta con 4 tubi, non integrata	TC-DEL
Lampada fluorescente compatta allungata	TC-L
Lampada a vapori di sodio bassa pressione	LST

Tab. 3 - Sigle standard delle sorgenti luminose più diffuse

A		#											
QT,QPAR		#											
QT,NV		#											
T											#		
TC								#					
HIT-CE									#				
HST						#							
LED						#							
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		□(lm/W)

Tab. 4 - Comparazione tra l'efficienza luminosa delle varie famiglie di sorgenti

	W	lumen	lumen/W	°K	Ra	Durata h	Dimmer	Brillanza
A	15-150	90-2.220	12	2.700	100	1.000	++	+
QT,QPAR	60-1.000	820-22.000	16	2.900	100	2.000	++	+
QT-NV	10-150	140-3.200	22	3.000	100	3-4.000	++	+
T	24-58	1.750-5.200	100	3.000-4.200	40-90	12-20.000	+	-
TC	5-55	250-4.800	80	2.700-6.500	80-89	8-12.000	+	-
HIT	20-400	1.650-35.000	90	2.700-6.500	80-95	9-12.000	+	+
HST	50-400	5.000-60.000	150	2.200	40	15.000	-	+
LED	0,1-5	2-250	50	2.500-8.000	80-89	50.000	++	+

Tab. 5 - Comparazione tra le principali caratteristiche qualitative e operative delle famiglie di sorgenti luminose.

Nel comparto delle tradizionali lampade ad alogeni si registrano miglioramenti certamente significativi anche se non molto marcati (Fig. 8 e

Fig. 9).

Grazie alle tecnologie che perseguono il recupero delle radiazioni infrarosse per contribuire al riscaldamento del filamento incandescente, l'efficienza raggiunge valori intorno ai 26-27 lm/W consentendo un risparmio del 30% rispetto alle precedenti versioni.



**OSRAM HALOPAR® 16
ENERGY SAVER**

The OSRAM HALOPAR® ES for line voltage.

- 20 % energy savings⁴
- 1:1 replacement for standard halogen reflector lamps
- Average life time of 2000 hours
- Much lower CO₂ emissions⁴
- Lower thermal output
- With whole glass reflector for brilliant lighting effects
- Innovative bulb pinch technology for the discharge vessel and with integrated fuse function; complies with the safety requirements of IEC 60432-2
- Approved for use in open luminaires (to IEC 60598-1)
- No transformer required
- Color temperature approx. 2800 K
- Fully dimmable

OSRAM HALOPAR® Standard	OSRAM HALOPAR® 16 ENERGY SAVER
35 W →	28 W ES
50 W →	40 W ES



**HALOLINE®
ENERGY SAVER**

Slim classic for inside and outside.

- 20 % energy savings⁵
- 1:1 replacement for standard halogen floodlight lamps
- Average life time of 2000 hours
- Much lower CO₂ emissions⁵
- Lower thermal output
- Ideal for emphasising and accentuating the structure of a room
- Can be used anywhere
- No transformer required
- Color temperature approx. 3000 K
- Fully dimmable

HALOLINE® Standard 74.9 mm	HALOLINE® ENERGY SAVER
100 W →	80 W ES
150 W →	120 W ES
HALOLINE® Standard 114.2 mm	HALOLINE® ENERGY SAVER
300 W →	230 W ES
500 W →	400 W ES



**HALOPIN®
ENERGY SAVER**

Our smallest lamp for line voltage.

- 20 % energy savings⁶
- 1:1 replacement for standard halogen lamps
- Average life time of 2000 hours
- Much lower CO₂ emissions⁶
- Lower thermal output
- Extremely compact dimensions
- Robust filament design thanks to innovative, unique bulb pinch technology
- Complies with IEC 60432-2 thanks to integrated fuse function
- Approved for use in open luminaires (to IEC 60598-1)
- No transformer required
- Simple handling thanks to G9 plug-in base/holder system
- Color temperature approx. 2800 K
- Fully dimmable

HALOPIN® Standard	HALOPIN® ENERGY SAVER
40 W →	33 W ES

Fig. 8 - Lampade ad alogeni a tensione di rete per la sostituzione degli analoghi modelli meno efficienti (Osram).



**HALOSTAR®
ENERGY SAVER**

Our smallest energy saver.

- 30 % energy savings⁷
- 1:1 replacement for standard pin base bulbs GY6.35 and G4 bases
- Long average life time of 4000 hours
- Significantly lower CO₂ emissions⁷
- Lower thermal output
- High luminous efficacy of up to 26 lm/W
- Meets IEC 60598 requirements: can be used in free-burning applications in open luminaires thanks to low-pressure design
- Axial filament for optimum directional light
- Gold-plated/platinized base pins for corrosion protection
- Fully dimmable

Standard pin-base lamp	→	HALOSTAR® ENERGY SAVER
20 W	→	14 W ES G4
35 W	→	25 W ES GY6.35
50 W	→	35 W ES GY6.35
75 W	→	50 W ES GY6.35
90 W	→	65 W ES GY6.35



**DECOSTAR®
ENERGY SAVER**

Our most beautiful energy saver.

- 30 % energy savings⁸
- 1:1 replacement for standard dichroic reflector lamps
- Extra long average life time of 5000 hours
- Significantly lower CO₂ emissions⁸
- Lower thermal output
- Constant luminous intensity and constant colour location throughout the life of the lamp thanks to the longlife coating
- Integrated shield so the lamps can be used in open luminaires to IEC 60598-1
- Fully dimmable

Standard dichroic reflector lamp	→	DECOSTAR® ENERGY SAVER
35 W	→	20 W ES
50 W	→	35 W ES
65 W	→	50 W ES



**HALOSPOT® 111
ENERGY SAVER**

The power pack for accent lighting.

- 30 % energy savings⁹
- 1:1 replacement for standard 111 lamps
- Long average life time of 4000 hours
- Significantly lower CO₂ emissions⁹
- Lower thermal output
- Better quality lighting thanks to optimum illumination and reduced scatter
- More light thanks to precision-engineered shape and greater reflectance
- Loss of light due to dirt and impurities is reduced thanks to a smoother reflector surface
- Cap for reduced glare and ease of handling
- Meets IEC 60598 requirements: can be used in free-burning applications in open luminaires thanks to low-pressure design
- Fully dimmable

Standard 111 lamp	→	HALOSPOT® 111 ENERGY SAVER
50 W	→	35 W ES
75 W	→	50 W ES
100 W	→	65 W ES

Fig. 9 - Lampade ad alogeni a bassissima tensione per la sostituzione degli analoghi modelli meno efficienti (Osram).

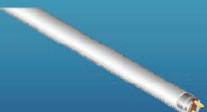
I progressi sono assai rilevanti nel comparto delle lampade fluorescenti. Alcuni modelli raggiungono durate di alcune decine di migliaia di ore con decadimento del flusso a fine vita compreso tra l'8 e il 10% del flusso originario. Le efficienze variano in funzione della potenza delle lampade: a 18 Watt un modello lineare con tubo fluorescente da 26 mm (diametro della sezione trasversale del tubo) emette circa 1350 lumen con un'efficienza di 75 lm/W. Con una potenza di 58 Watt l'efficienza si attesta intorno a 89 lm/W. La durata di vita arriva a 58.000 ore, con un tasso di mortalità del 10 per cento.

Le lampade fluorescenti tradizionali (quelle lineari da 26 mm di diametro, denominate T8) stanno lasciando il posto alle tipologie lineari da 16 mm di diametro (denominate T5) e alle compatte. Tra le compatte si distinguono altre due famiglie: quelle "integrate" nelle quali bulbo e ballast sono integrati in un'unica unità e quelle "non integrate" nelle quali l'alimentatore è esterno alla sorgente luminosa che, quindi, non può essere utilizzata con i comuni portalampada. L'equivalenza con le incandescenti è indicata in Tab. 6

INCANDESCENT LIGHT BULBS	MINIMUM LIGHT OUTPUT	COMMON ENERGY STAR QUALIFIED LIGHT BULBS
WATTS	LUMENS	WATTS
40	450	9-13
60	800	13-15
75	1,100	18-25
100	1,600	23-30
150	2,600	30-52

Tab. 6- Confronto tra lampade incandescenti e lampade fluorescenti compatte integrate.

Tra le sorgenti fluorescenti quelle con maggiore efficienza, tuttavia, non sono quelle compatte ma quelle lineari T5 nelle versioni "high efficiency" come riportato in Tab. 7. Un ulteriore miglioramento delle prestazioni della sorgente si ha con la sostituzione del circuito di controllo, tradizionalmente di tipo elettromagnetico, con il tipo elettronico.

T8 (Ø 26 mm)	600 mm	900 mm	1.200 mm	1.500 mm
	 flussi luminosi a 25°C	18 W 1.350 lm	30 W 2.400 lm	36 W 3.350 lm
T5 (Ø 16 mm)	550 mm	850 mm	1.150 mm	1.450 mm
	 flussi luminosi a 25°C	14 W 1.200 lm	21 W 1.900 lm	28 W 2.600 lm
	24 W 1.750 lm	39 W 3.100 lm	54 W 4.450 lm	49 W / 80 W 4.300 lm / 6.200 lm

Tab. 7 - Confronto tra tubi fluorescenti lineari T8 e T5 nelle varie potenze disponibili.

La sorgente su cui si stanno puntando gli sforzi di tutte le aziende è, tuttavia, il LED (Light Emitting Diode). I LED sono sorgenti che sfruttano le proprietà ottiche di materiali semiconduttori (in genere silicio) che, una volta eccitati da una tensione diretta, emettono una luce visibile in un determinato colore.

I LED offrono moltissimi vantaggi nell'illuminazione sia da interno che da esterno. Funzionano a bassissima tensione, con un'efficienza luminosa molto superiore a quella delle sorgenti ad incandescenza e assolutamente competitiva con quella delle lampade fluorescenti (Fig. 10). L'elevata efficienza è sicuramente una delle caratteristiche più significative: in molti impieghi, il risparmio energetico rispetto a una tradizionale sorgente a incandescenza è stimato tra l'80 e il 90%. Altri vantaggi concreti sono la grande affidabilità e la lunga vita, con una durata media valutata attorno alle 100.000 ore, le dimensioni ridotte e l'estrema flessibilità alle esigenze di design e di

progettazione. Inoltre, i LED non emettono raggi ultravioletti, non producono calore, non contengono mercurio, non risentono di vibrazioni, si accendono istantaneamente, possono essere facilmente dimmerabili, consentono di realizzare piccoli punti luce, sorgenti puntiformi e infiniti effetti cromatici.

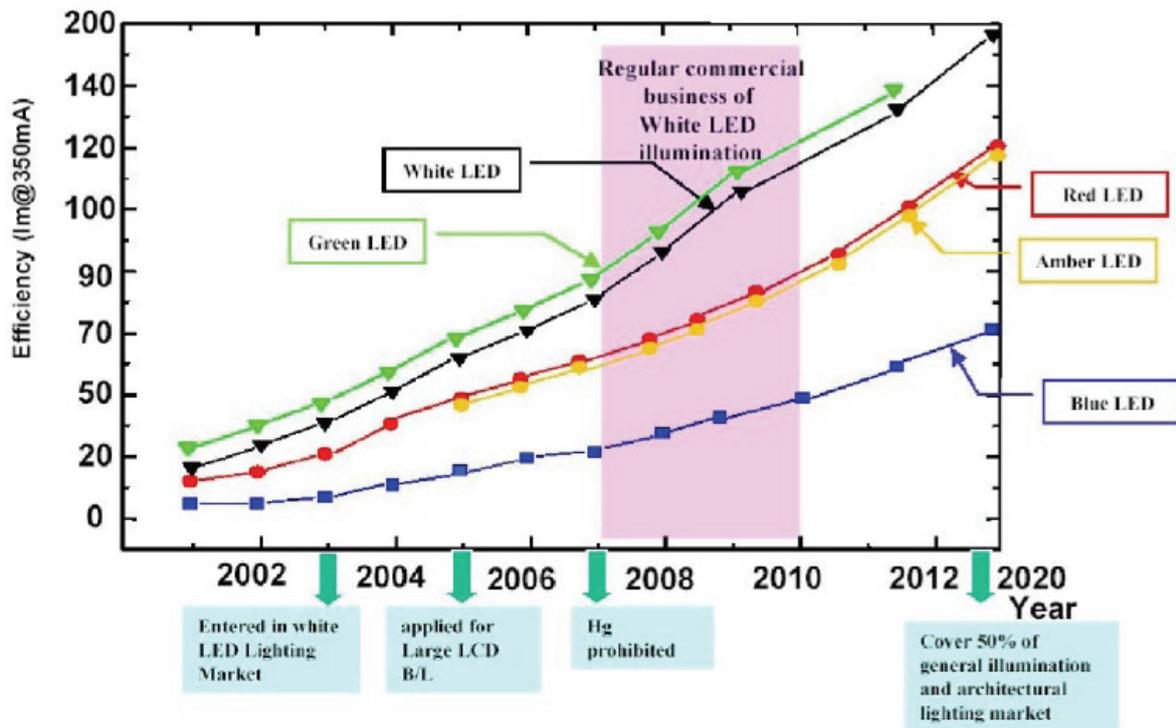


Fig. 10 - L'aumento del flusso luminoso dei LED nei vari colori con il passare degli anni ha portato ad oggi ad avere delle sorgenti paragonabili a quelle tradizionali per efficienza e superiori per caratteristiche operative.

I LED vengono prodotti con una precisa curva fotometrica (lambertiana, batwing o ad emissione laterale, Fig. 11) che viene comunque manipolata attraverso un'ampia gamma di accessori (micro-lenti) per ottenere fasci molto stretti, dell'ordine di qualche grado di apertura o altre forme di fascio.

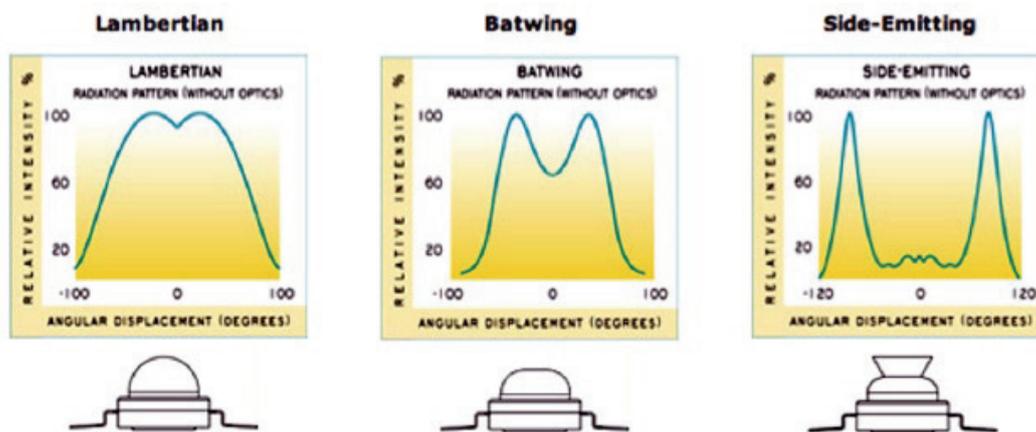


Fig. 11 - Curve fotometriche cartesiane dei LED prodotti da Luxeon. Ogni tipo di curva si utilizza per uno specifico apparecchio di illuminazione.

Le temperature di colore del LED a luce bianca variano da 2.670°K a 10.000°K (fig. 58) con una resa cromatica che ha superato, nelle ultime generazioni di LED prodotti da Luxeon, l'indice di 90. Nell'illuminazione di interni i LED possono costituire un interessante contributo alla creazione di accenti e di effetti cromodinamici ma, da qualche tempo, anche un possibile sostituto dei tradizionali sistemi fluorescenti nell'illuminazione funzionale degli uffici o delle lampade ad incandescenza e ad alogeni negli interni residenziali

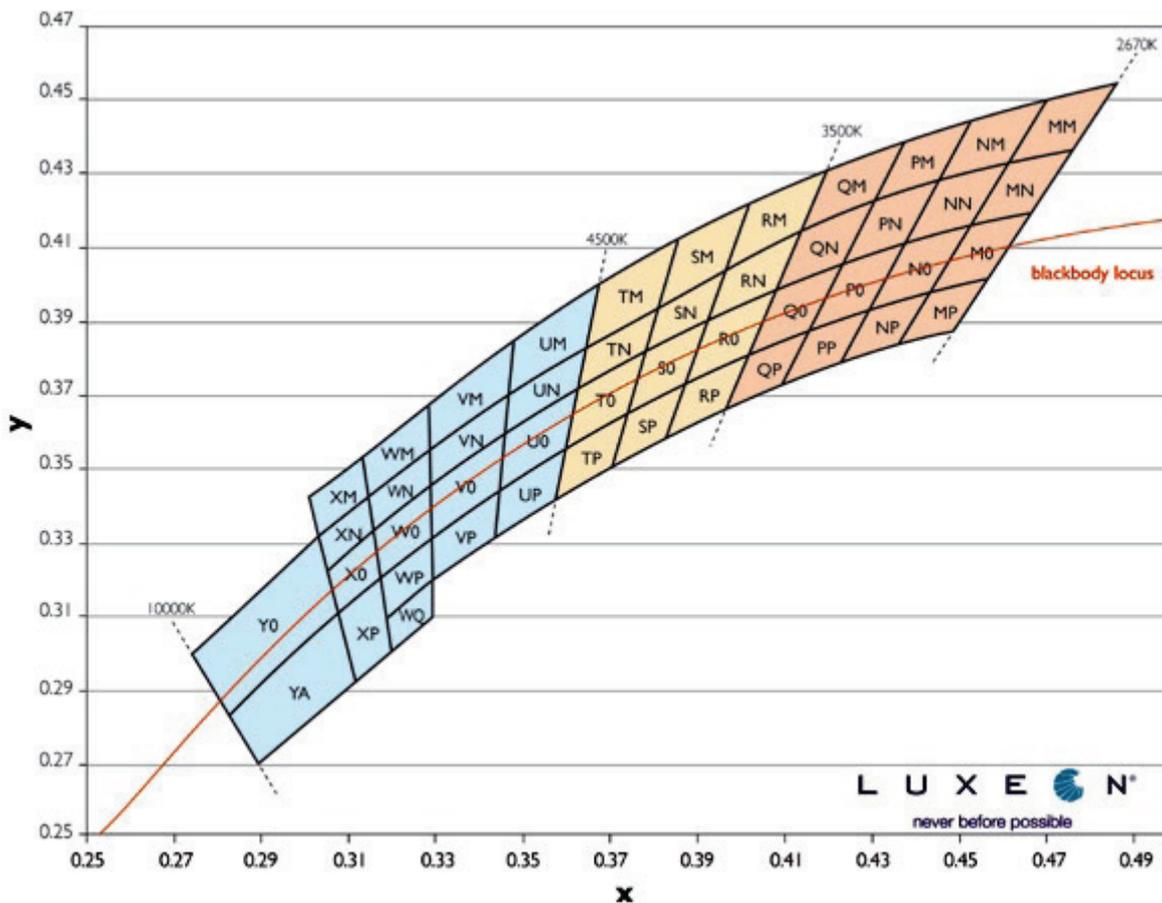


Fig. 12 - Temperature di colore disponibili per i LED bianchi prodotti da Luxeon visualizzate sulla curva del corpo nero

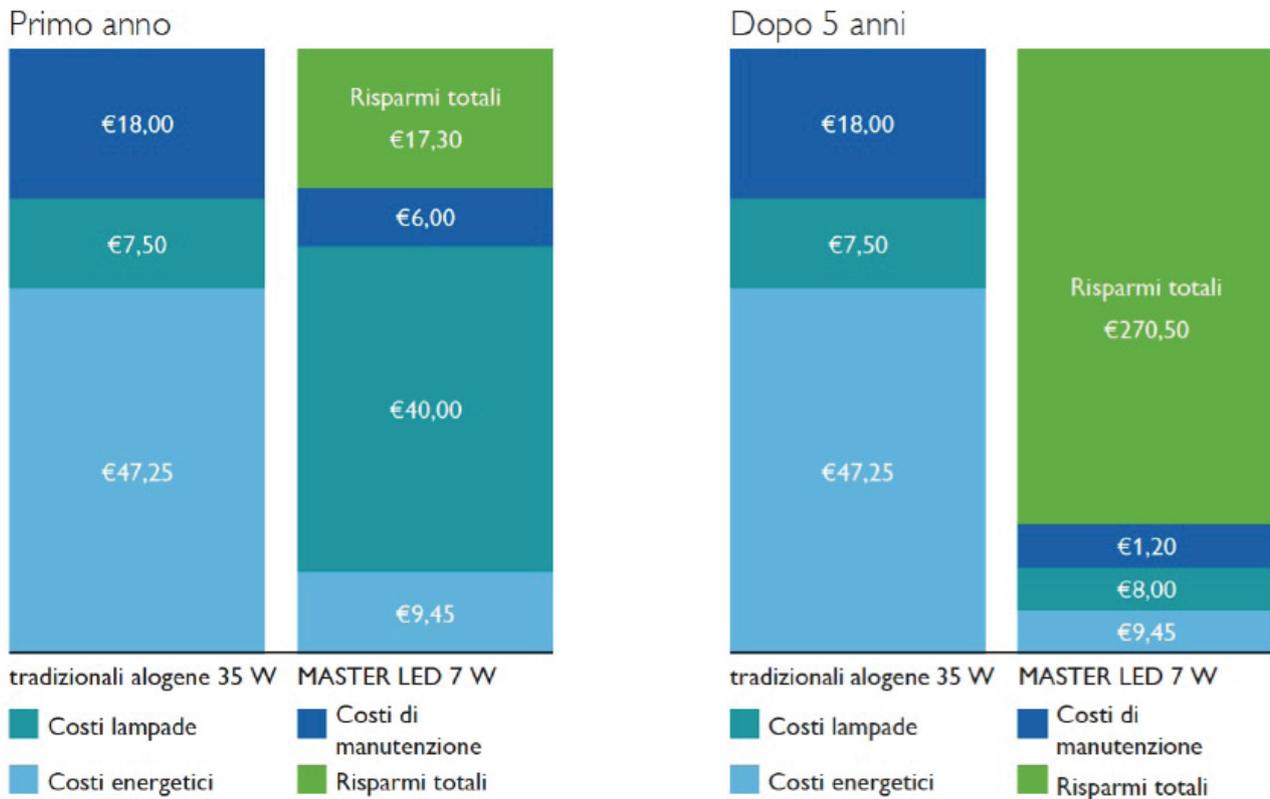
Le lampade Philips MasterLED, utilizzando la tecnologia LUXEON Rebel, introducono tutti i vantaggi dei LED all'interno delle tradizionali applicazioni di illuminazione funzionale. Realizzata in tre tipi diversi, MasterLED è disponibile con luce bianca calda o fredda priva di UV e IR. La sorgenti MasterLED possono essere utilizzate in apparecchi di illuminazione con attacchi E27 e GU10 rappresentando un'interessante soluzione retrofit con costi di esercizio e di manutenzione fortemente ridotti (Fig. 13).



Fig. 13 - Lampade Philips MasterLED da 7W: la prima sostituisce un'incandescenza da 40W, la seconda un'incandescenza con riflettore sempre da 40W e fascio 25° o 40°, la terza una lampada ad alogeni con riflettore dicroico da 35W con fascio da 25° o 40°.

Il consumo è dell'80% inferiore a quello delle normali lampade alogene dicroiche a bassissima tensione e alle lampade a incandescenza mentre la durata è pari a 45.000 ore (fino a 45 volte superiore alle lampade a incandescenza, fino a 25 volte superiore alle normali lampade alogene e

fino a 10 volte superiore alle lampade fluorescenti compatte, Fig. 14). Una descrizione più estesa del tema è riportata in [1] pagg.33-51.



* Sulla base di 24 ore al giorno, 365 giorni all'anno, €0,15 per kWh di elettricità e €6,- costi di manutenzione per la sostituzione di lampade

Fig. 14 - Risparmio ottenibile dalla sostituzione di una lampada ad alogeni 35W con una Philips MasterLED 7W.

3.2.2 L'alimentazione elettronica delle lampade fluorescenti

Per migliorare le prestazioni delle lampade fluorescenti e conseguire un maggiore risparmio energetico occorre utilizzare alimentatori elettronici in alta frequenza. I ballast di tipo elettromagnetico, composti da un reattore induttivo (in serie al bulbo) e da uno starter (in parallelo) sono circuiti molto semplici, economici ed affidabili e per decenni hanno costituito l'unico metodo di alimentazione i tubi fluorescenti. I motivi che oggi inducono a prediligere più complessi (e costosi) circuiti elettronici sono da ricercare sia nei limiti prestazionali del sistema tradizionale, sia nella possibilità di ottenere migliori performance dal punto di vista energetico e visivo. Le soluzioni tecnologiche adottate allo scopo consentono di aumentare il rendimento complessivo della sorgente fino al 20%, estendere la vita utile del bulbo fino al 25%, aumentare fino al 10% il flusso luminoso prodotto, e migliorare la qualità della luce emessa. Gli alimentatori per lampade fluorescenti presentano, per un dato tipo di lampada, livelli di potenza assorbita diversi e quindi rendimenti energetici variabili. La direttiva 2000/55/CE ha per finalità l'aumento di efficienza degli alimentatori per lampade fluorescenti passando progressivamente ad alimentatori a maggior rendimento. La direttiva, infatti, fissa i limiti massimi della potenza assorbita in ingresso dal circuito alimentatore-sorgente luminosa.

L'efficienza energetica dei circuiti di illuminazione a fluorescenza dipende, quindi, dalla combinazione alimentatore-lampada (Fig. 15).

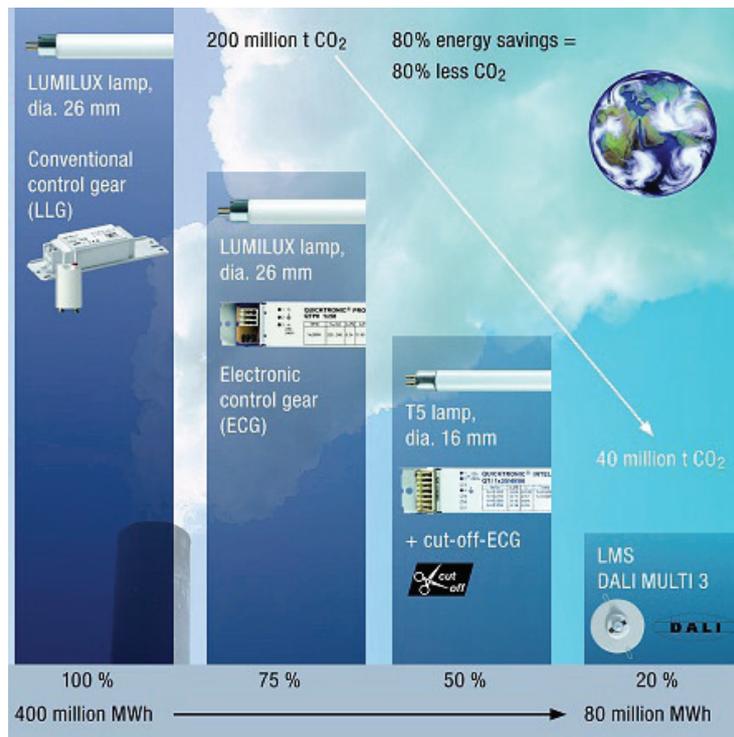


Fig. 15 - Risparmi in termini percentuali riferibili alla sostituzione di alimentatori e lampade fluorescenti e all'introduzione di sistemi di gestione della luce (Osram).

La CELMA ha sviluppato un sistema di classificazione di alimentatori in sette categorie (Fig. 16). La massima potenza corretta in ingresso nel circuito alimentatore-lampada è definita come: "Indice di Efficienza Energetica" del sistema lampada-alimentatore (EEI). Una descrizione più estesa del tema è riportata in [1] pagg.52-55.

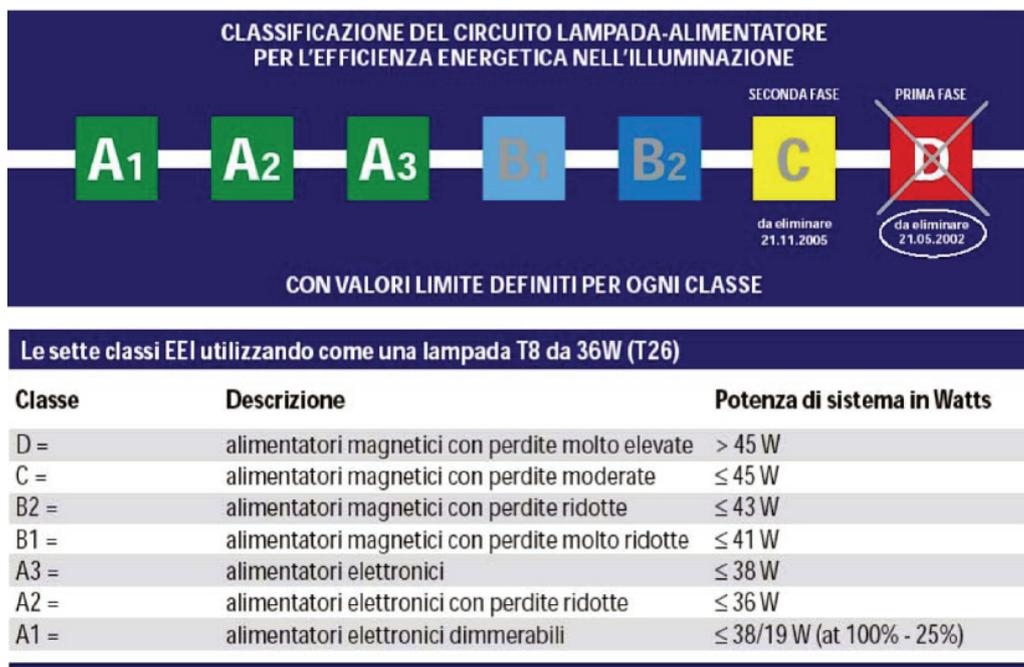


Fig. 16 - Classificazione del circuito lampada-alimentatore secondo le classi EEI

3.2.3 Il rendimento ottico degli apparecchi e il fattore di utilizzo

Non tutto il flusso emesso dalle sorgenti va ad incidere sul piano di riferimento. Parte di esso viene assorbito dalle superfici interne dell'apparecchio di illuminazione. Il primo contributo alle perdite dipende dal layout delle ottiche dell'apparecchio e dai materiali in esse utilizzati. Tali perdite possono venire quantificate dal rendimento ottico η_{OTT} di quest'ultimo, definito come rapporto tra flusso uscente Φ_{OUT} dall'apparecchio e il flusso generato Φ_0 dalla sorgente in esso alloggiata. Le perdite che si hanno invece sul flusso uscente dall'apparecchio di illuminazione, vengono normalmente quantificate mediante un coefficiente detto "utilanza" U che tiene conto dei fattori di riflessione dell'ambiente, della geometria di quest'ultimo e della posizione della sorgente. Rendimento ottico " η_{OTT} " ed "utilanza" U determinano la percentuale utile del flusso generato che concorre, in condizioni ordinarie, a creare il richiesto illuminamento sul compito visivo. Il loro prodotto definisce in particolare il cosiddetto fattore di utilizzo UF dell'impianto:

$$UF = \eta_{OTT} \times U$$

Il fattore di utilizzo è generalmente fornito dal costruttore dell'apparecchio di illuminazione il quale, tenendo conto del rendimento ottico, fornisce l' UF in apposite tabelle riferite a specifiche geometrie del locale e di installazione e a specifici coefficienti di riflessione dell'ambiente. La geometria del locale è tenuta in considerazione mediante il cosiddetto indice " K " il quale, nel caso di locali a forma di parallelepipedo (caso più frequente), è definito come:

$$K = 1/h \times (a \times b) / (a + b)$$

essendo " a " e " b " le dimensioni di base ed " h " l'altezza dei centri luminosi dal piano di riferimento. Poiché non è possibile intervenire efficacemente sull'utilanza (tranne per ciò che riguarda la collocazione del corpo illuminante e la colorazione delle pareti) gli interventi per migliorare il fattore di utilizzazione di un impianto si concentrano soprattutto sull'innalzamento del rendimento ottico dell'apparecchio. In particolare si può agire sulle ottiche ottimizzandone la geometria in funzione delle lampade utilizzate e della distribuzione di luce desiderata e utilizzando solo alluminio ad alta riflettanza o materiali plastici con caratteristiche analoghe o superiori. La limitazione dell'abbagliamento e il convogliamento del flusso luminoso nelle direzioni richieste per l'espletamento più confortevole dei compiti visivi riducono necessariamente il flusso luminoso della lampada schermandone e assorbendone una certa quota.

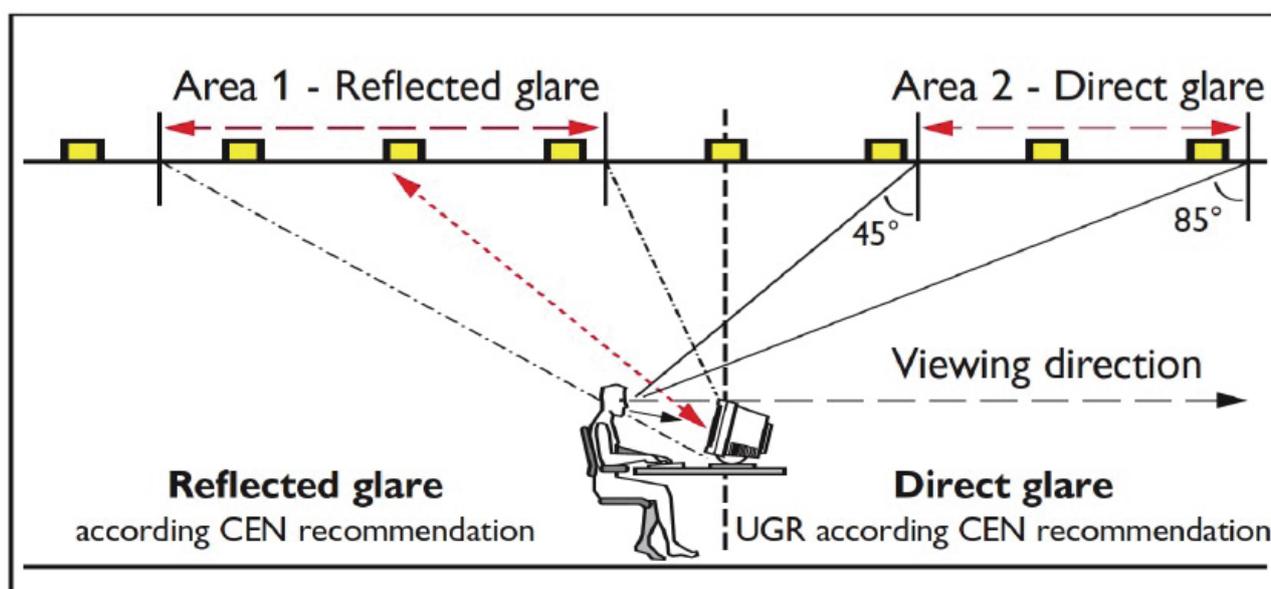


Fig. 17 - Schema delle aree che procurano abbagliamento diretto e riflesso in uffici con videoterminali

Per compiti visivi da ufficio, ad esempio, la limitazione dell'abbagliamento diretto implica che le intensità luminose emesse nelle direzioni più prossime a quella usuale d'osservazione (considerata quest'ultima orizzontale, le direzioni più prossime sono quelle discoste dall'orizzontale di un angolo

uguale o inferiore ai 45°) siano opportunamente schermate mentre il flusso luminoso deve essere in prevalenza indirizzato verso il basso, privilegiando le zone comprese fra i 60° e i 30° rispetto alla verticale, allo scopo di garantire le migliori condizioni di comfort visivo e per ottenere gli adeguati valori di contrasto fra lo sfondo bianco delle pagine e i caratteri scuri della scrittura. Nel caso di uffici con videoterminali (oggi quasi la totalità) le emissioni devono essere ancora più controllate per evitare abbagliamento diretto e riflesso (Fig. 17), a scapito del rendimento ottico: la luminanza, infatti, deve essere inferiore a 200 cd/mq per angoli di emissioni superiori a 50° (ottica denominata BAP, Fig. 18).

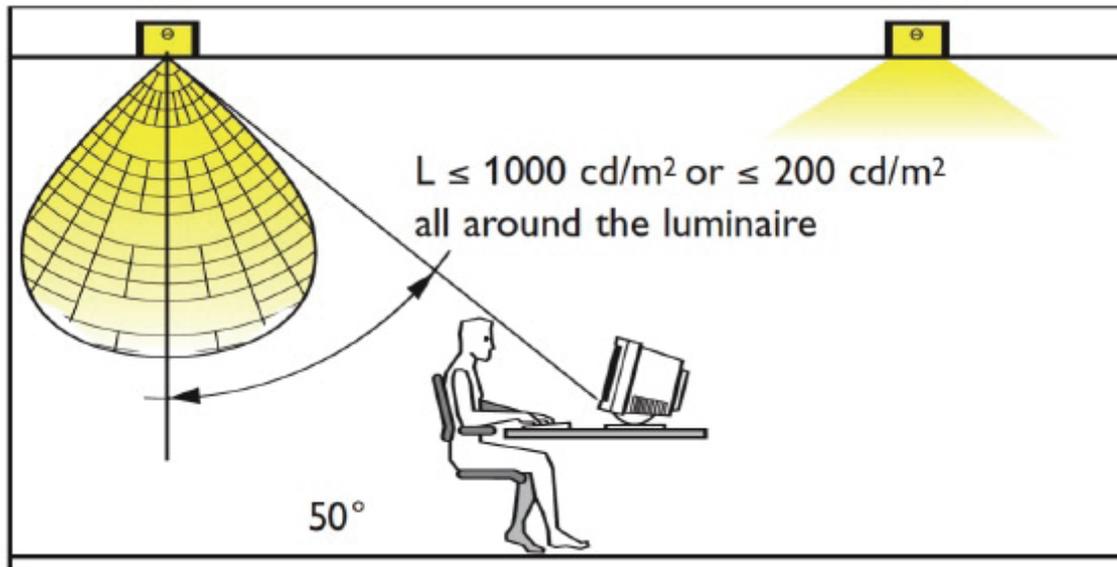


Fig. 18 - Limitazioni della luminanza dell'apparecchio negli uffici con videoterminali: le necessarie schermature possono provocare una riduzione del rendimento ottico dell'apparecchio.

I fattori che determinano le prestazioni di un apparecchio sono essenzialmente:

- il materiale di cui è costituito il riflettore, che deve presentare e conservare nel tempo un alto fattore di riflessione;
- il disegno ottico del riflettore, che deve indirizzare il flusso luminoso nelle direzioni desiderate e minimizzare il flusso riflesso sulla lampada stessa;
- l'apertura della bocca, che deve essere rapportata alle dimensioni della lampada (per un apparecchio per tubi fluorescenti, ad esempio, ad ogni tubo deve corrispondere una propria ottica con apertura di almeno 5 volte il 60 diametro del tubo; con tali proporzioni la sorgente può essere considerata puntiforme e quindi il riflettore può lavorare al meglio).

Per quanto riguarda il miglioramento dei riflettori il settore di materiali su cui si stanno orientando le ricerche è quello dei polimeri metallizzati. Le tradizionali ottiche in alluminio sono in genere in lamiera piegata o imbutita: entrambe le lavorazioni non consentono una precisione millimetrica del direzionamento delle varie superfici del riflettore e la tendenza alla miniaturizzazione delle sorgenti luminose ha fatto emergere questo problema in maniera evidente. Le ottiche di precisione, infatti, hanno bisogno di faccette perfettamente delineate e con spigoli netti tra l'una e l'altra superficie (Fig. 19). Né la lamiera piegata, né quella imbutita possono dare questa precisione di dettaglio poiché la loro lavorazione non è sufficientemente raffinata.

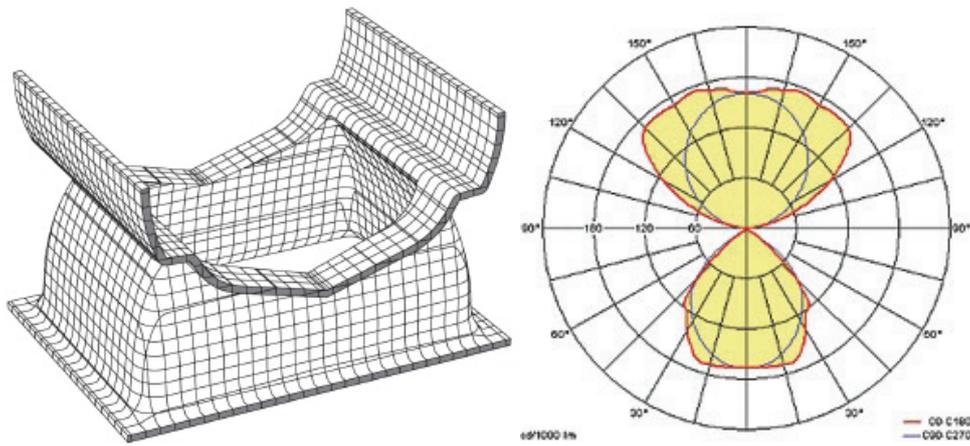


Fig. 19 - Modulo di un'ottica alveolare della piantana Minium Lite prodotto in pezzo unico, quindi stabile e regolare, rivestito di alluminio applicato a vapore. La distribuzione è prevalentemente indiretta (Zumtobel).

Lo studio dei riflettori lamellari per lampade fluorescenti si è spinto negli ultimi anni alla definizione di ottiche molto particolari che consentono un rilevante aumento del rendimento ottico. In particolare si possono menzionare le ottiche OLC (Omnidirectional Luminance Control) di Philips realizzate con lamelle concave tridimensionali munite di un struttura di tipo Fresnel (Fig. 20)

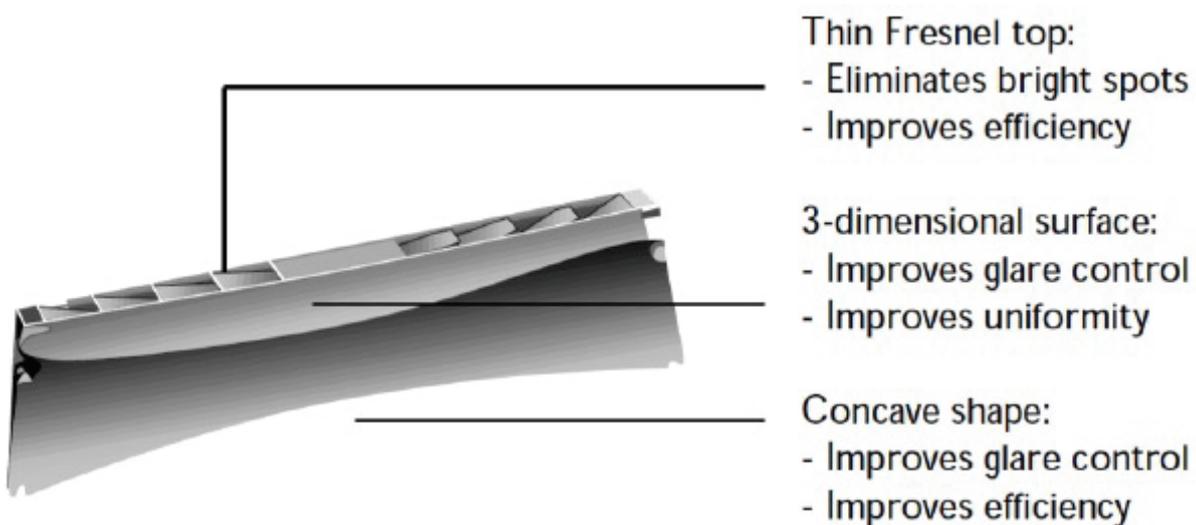


Fig. 20 - Particolare di una lamella trasversale dell'ottica OLC di Philips

sulla parte superiore che migliorano del 15% il rendimento dell'apparecchio rispetto a quelli con riflettori tradizionali (si arriva fino al 94%). Inoltre le ottiche OLC permettono il controllo dell'abbagliamento a 360° senza presentare macchie brillanti sulla superficie. Tutto ciò permette di creare uffici flessibili dato che i display possono essere posizionati in qualunque punto dell'ambiente senza avere riflessi, Fig. 21, e di ottenere forti risparmi energetici.

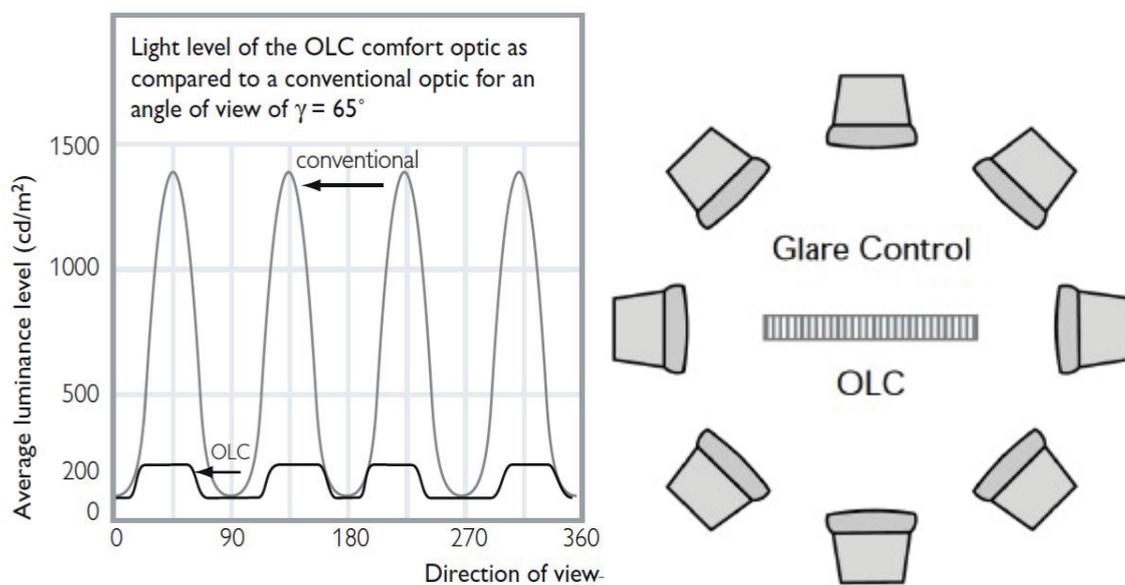


Fig. 21- Confronto tra la luminanza a 65° di un apparecchio convenzionale e quella di un'ottica OLC in relazione alla direzione di osservazione

Altre aziende stanno proponendo sistemi ottici molto differenti dal classico schermo lamellare: è il caso della sospensione Aero II di Zumtobel (Fig. 22) in cui entra in gioco un rifrattore microprismatizzato che si comporta come una guida di luce per i 48 LED da 75 lm/W disposti lateralmente (in corrispondenza del profilo zigrinato che ne consente la dissipazione del calore), mentre due tubi fluorescenti T5 provvedono all'illuminazione indiretta (Fig. 23). Questo consente di avere un apparecchio di grande comfort visivo, di alto rendimento e non vincolante per il layout dell'ufficio (Fig. 24). Un griglia di questi apparecchi collegati ad un sistema di controllo con sensori di luminosità e di presenza (si veda il successivo capitolo sui sistemi integrati luce naturale/artificiale) permette di arrivare in un ufficio ad un LENI pari a 26,35 kWh/mq x anno.

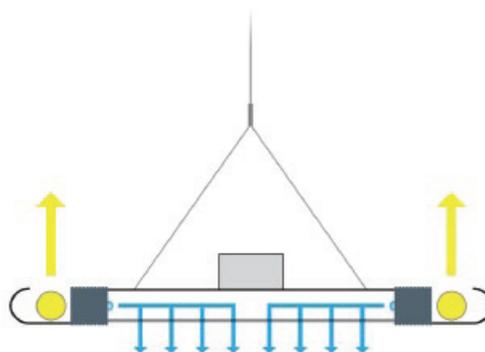


Fig. 22 – Sospensione Zumtobel Aero II.

Fig. 23 - Schema di emissione delle sorgenti LED (in azzurro) e dei tubi fluorescenti (in giallo).

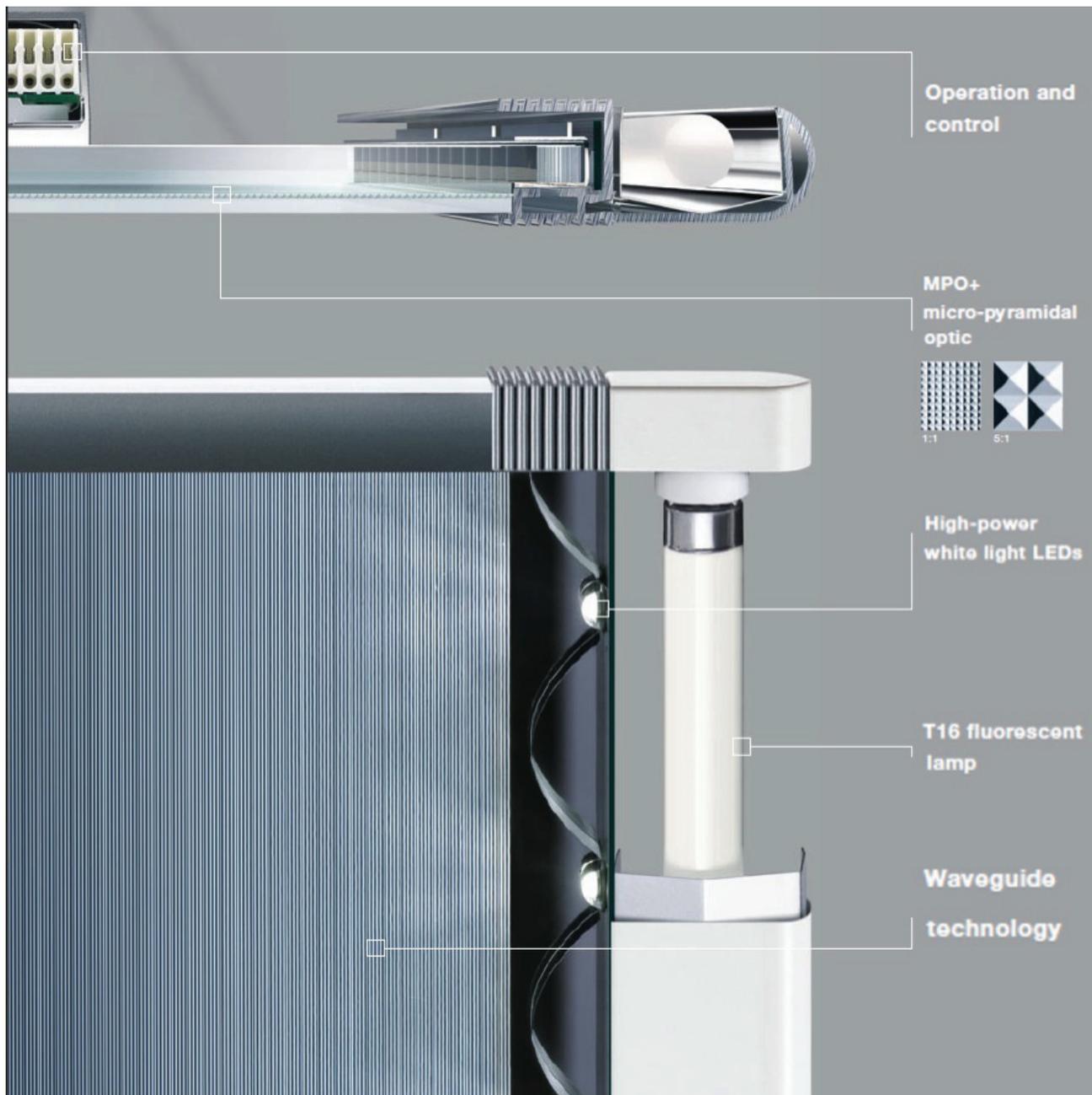


Fig. 24 - Sezione della sospensione nella quale sono evidenziati i sistemi ottici di trasporto e diffusione della luce.

3.3 Integrazione luce artificiale/naturale

3.3.1 Principi generali

L'integrazione tra luce naturale e artificiale non è soltanto una interessante possibilità di risparmio energetico, bensì un preciso vincolo normativo dettato dalla UNI-EN 12464-1 "Luce e illuminazione - Illuminazione dei luoghi di lavoro - Parte 1: Luoghi di lavoro interni" che all'articolo 4.10 cita testualmente: "4.10 - Illuminazione naturale. L'illuminazione naturale può fornire tutta o parte dell'illuminazione di un compito visivo. Essa varia col tempo in intensità e in composizione spettrale e perciò produce condizioni luminose variabili in un interno. La luce naturale può creare modellato e distribuzione di luminanze specifiche, dovute alla luce che entra quasi orizzontalmente dalle finestre laterali. Le finestre che forniscono un contatto visivo con l'esterno sono preferite dalla maggior parte delle persone. Negli interni con finestre laterali, l'illuminazione naturale diminuisce rapidamente all'aumentare della distanza dalla finestra. È necessaria quindi una illuminazione supplementare per garantire l'illuminamento richiesto sul posto di lavoro e per bilanciare la distribuzione delle luminanze all'interno del locale. Si possono usare interruttori automatici o manuali e/o regolatori di flusso luminoso per assicurare un'appropriata integrazione tra illuminazione naturale e artificiale. Se vi è abbagliamento dalle finestre, si devono utilizzare schermi appropriati per ridurlo".

Dunque ogni impianto di illuminazione di un luogo di lavoro realizzato secondo la normativa Uni EN 12464-1 dovrebbe avere un sistema di controllo per l'integrazione dell'illuminazione naturale con quella artificiale.

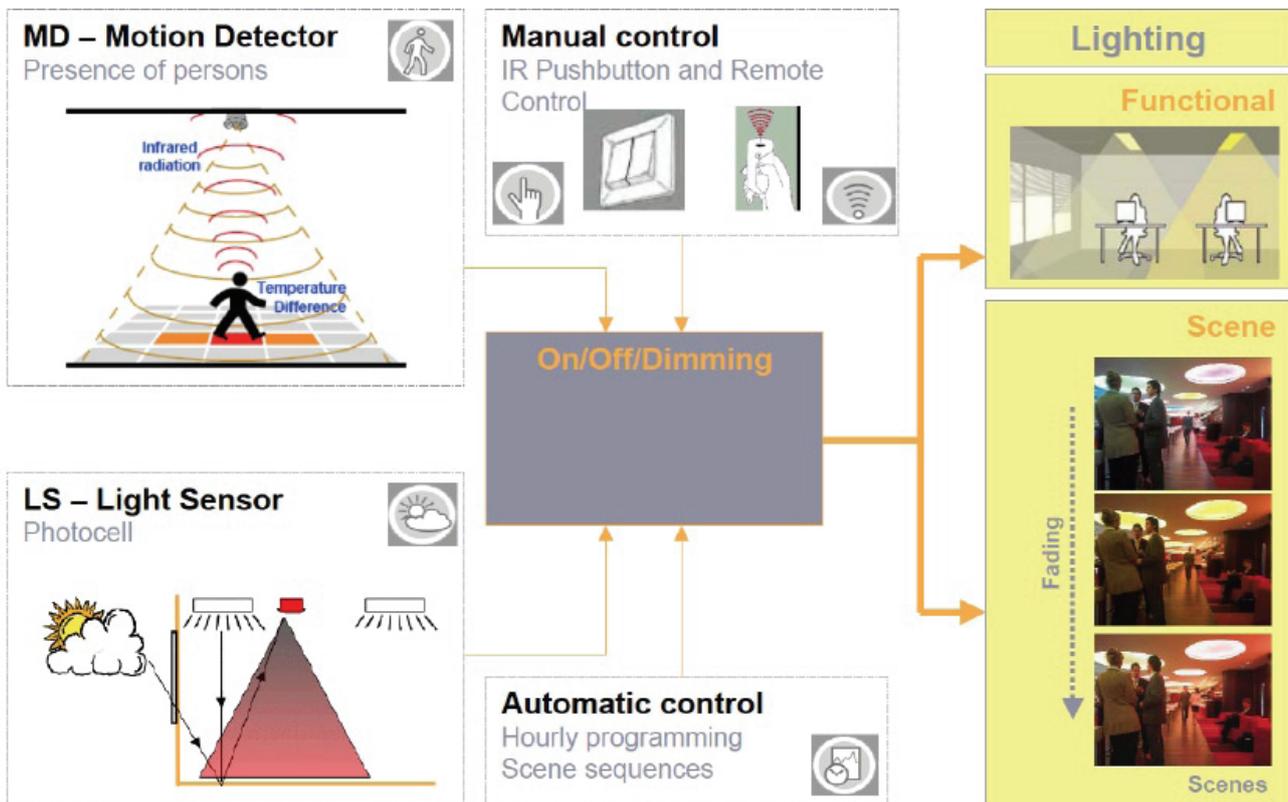


Fig. 25 - Schema di un sistema completo con tutte le possibilità di controllo della luce: sensore presenza, sensore luminosità, controllo manuale da interruttori o telecomando, controllo automatico con timer. Gli scenari che si possono così ottenere saranno sia di tipo funzionale (riduzione del flusso di alcuni apparecchi per risparmiare energia), sia di tipo architettonico-percettivo (atmosfere luminose in sequenza). Elaborazione Philips

Esistono diverse tecniche per creare un sistema di controllo per l'integrazione di luce naturale e artificiale. Il più semplice ed economico è quello di realizzare dei circuiti differenziati in modo da separare l'accensione degli apparecchi di illuminazione più vicini alle finestre da quella degli apparecchi più distanti. Questo sistema (dove gli apparecchi possono essere solo accesi o spenti manualmente) garantisce un risparmio energetico solo se gli occupanti sono particolarmente attenti

ad accendere e spegnere gli apparecchi di illuminazione nei vari momenti della giornata quando non necessari.

Un sistema di controllo un po' più raffinato consente di avere uno step intermedio tra on e off permettendo di spegnere - nel caso di apparecchi multilampada - una delle due o più sorgenti dell'apparecchio. Il livello intermedio, ancora più sofisticato, è costituito da una serie di dimmer regolabili manualmente che agiscono sul flusso emesso direttamente dalla lampada. Si tratta di un sistema particolarmente valido perché, consentendo una regolazione senza soluzione di continuità, offre un'enorme gamma di livelli di regolazione. Anche in questo caso, però, il risparmio energetico è garantito solo se viene eseguita l'azione manuale di regolazione da parte dell'utente.

Il sistema migliore e più completo (

Fig. 25) è quello che, oltre ad avere tutte le possibilità di controllo manuale sopra descritte permette la regolazione del flusso luminoso con analisi in continuo della quantità di illuminamento in ambiente. Il sistema provvede in automatico

a regolarsi a secondo del maggiore o minore apporto di luce naturale.

L'azione umana di regolazione è assente, il sistema si modifica automaticamente per garantire illuminamenti costanti, garantendo un elevato risparmio energetico. Aggiungendo al sensore di luminosità anche un sensore di presenza (agli infrarossi, ad ultrasuoni o a micro-onde) il sistema spegne tutti i punti luce in assenza di utenti a prescindere dalle condizioni di illuminazione naturale. Questo semplice dispositivo aggiuntivo permette in alcuni casi, in relazione al tipo di utilizzo dell'ambiente, di ottenere ulteriori risparmi che vanno dal 10 al 50%.

Se si sommano i benefici della corretta scelta di lampade, corpi illuminanti e disposizione degli stessi, della presenza di sensori di luminosità e di presenza si può arrivare ad un risparmio maggiore del 70% rispetto ad un impianto tradizionale privo delle caratteristiche elencate (Fig. 26).

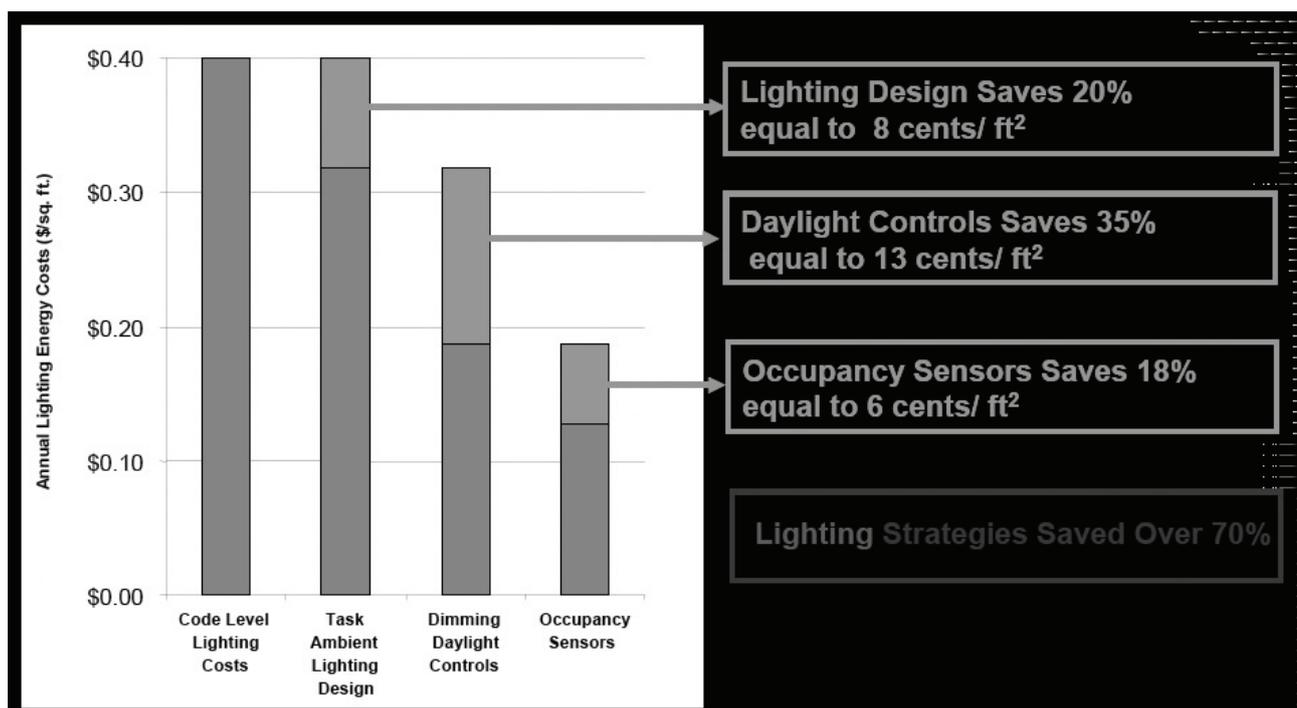


Fig. 26 - Risparmi conseguibili mettendo in atto tutte le strategie.

Gli elementi che compongono un sistema di integrazione tra luce naturale e artificiale a regolazione automatica sono i seguenti (Fig. 27):

- il sensore di luminosità che ha lo scopo di verificare il livello di illuminamento presente in ambiente misurandolo sul piano di lavoro o sulla superficie delle finestre;
- apparecchi di illuminazione con sorgenti a fluorescenza, dotati di reattore elettronico dimmerabile con segnale proporzionale 0-10 V o sistemi regolabili con tecnologia Dali (Digital Addressable Light Interface);

- una suddivisione in gruppi di apparecchi corrispondenti ai vari canali di cui viene controllato lo spegnimento e l'accensione delle lampade e la loro dimmerazione;
- una centralina di controllo e programmazione dove vengono impostate le soglie di regolazione e i *set-point* di taratura, nonché le regolazioni in uscita.

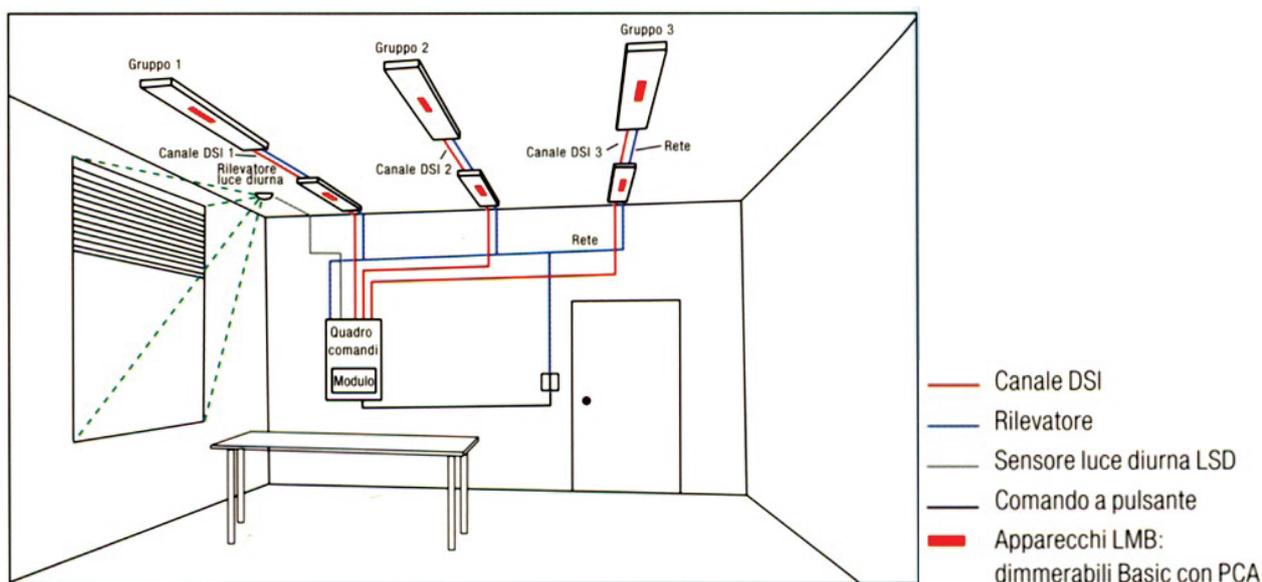


Fig. 27 - Elementi del sistema di integrazione luce naturale/artificiale (fonte: Zumtobel)

La descrizione appena fornita della logica di funzionamento del sistema è il modello teorico; a questo modello teorico, bisogna però aggiungere alcune considerazioni di dettaglio che sono riportate in [1], pagg. 71 – 74.

Resta chiaro che il sistema ha enormi valenze economiche in tutti i casi; tuttavia occorre sempre eseguire uno studio di fattibilità tecnico-economica per poter valutare la convenienza della scelta progettuale che si andrà a realizzare. È comunque necessario, nella valutazione dei costi, basarsi non solo sul costo iniziale dell'impianto, ma soprattutto sull'incidenza economica dell'intera vita dell'edificio in modo tale che il costo dell'impianto di illuminazione venga valutato globalmente, considerando tutti i costi futuri che appartengono alla sua vita economica, resi attuali al momento dell'analisi mediante un idoneo tasso di attualizzazione. Troppo spesso l'attenzione è limitata al solo costo iniziale dell'impianto, in realtà il suo funzionamento comporta un gravoso e costante impegno finanziario (in particolare legato agli oneri di energia elettrica), che deve essere quantificato per eseguire un'analisi corretta. Non tenerne conto significa escludere dal totale l'addendo più consistente, scartando sistemi che sono potenzialmente molto più validi solo per errori di valutazione economica.

3.3.2 Componenti trasparenti

I materiali trasparenti più comuni sono pannelli o lastre di vetro o sostanze plastiche ed altri materiali con buone proprietà illuminotecniche. Il controllo dei flussi termici per conduzione, convezione e irraggiamento verso l'interno e l'esterno, avviene attraverso l'utilizzo di una o più lastre di materiale trasparente (isolante) e di sistemi di schermatura interna e esterna. Analogamente, si possono controllare la luce solare e/o della volta celeste attraverso l'uso di lastre oscurate o di schermatura fisse e/o mobili.

I componenti trasparenti tradizionali sono costituiti da vetri chiari, vetri trattati in massa (colorati), vetri trattati in superficie (sia tramite pellicole che vetri riflettenti). Per cercare di rispondere a tutte le esigenze presenti nella maniera più efficace, sono però in fase di sviluppo, dimostrazione o commercializzazione, una serie di materiali trasparenti innovativi che presentano delle qualità specifiche e delle proprietà molto interessanti sia da un punto di vista funzionale che estetico. I componenti trasparenti innovativi sono i vetri cromogenici, più nello specifico composti da: vetri fotocromici, vetri termocromici, vetri elettrocromici, vetri a cristalli liquidi. La Fig. 28 mostra le diverse

tipologie di materiali trasparenti attualmente presenti in commercio o in fase di pre-commercializzazione.

CLASSIFICAZIONE DEI COMPONENTI

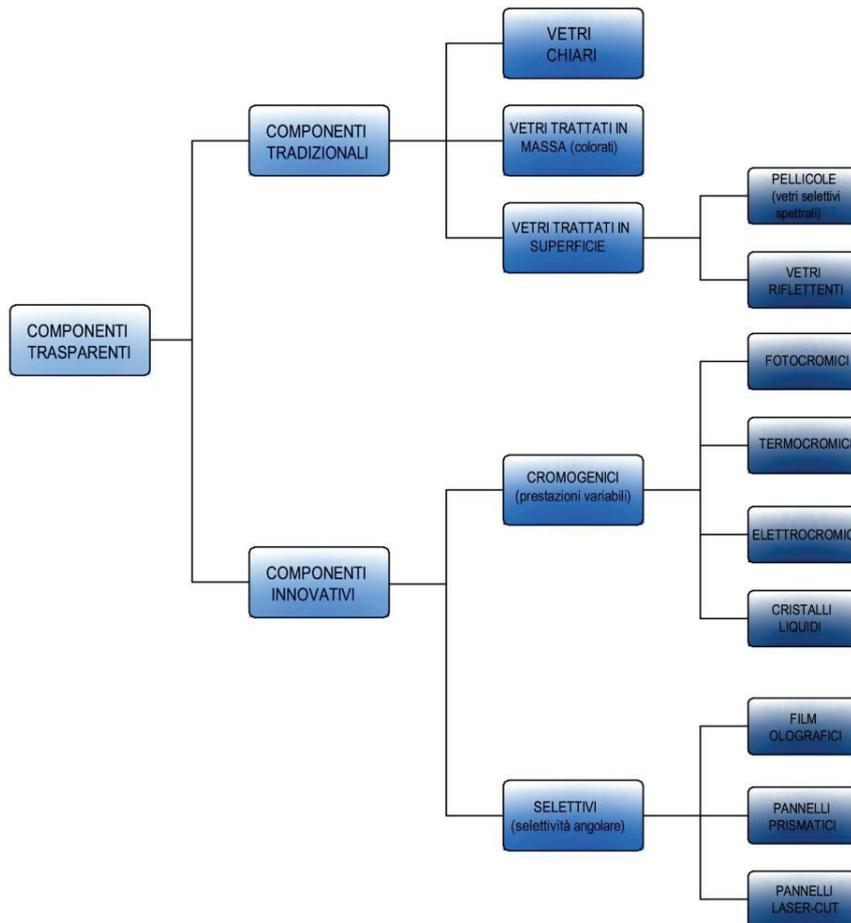


Fig. 28 - Classificazione dei materiali trasparenti

I materiali trasparenti sono descritti in dettaglio in [4] pagg. 91 – 111 e sono:

1. Vetri chiari
2. Vetri colorati in massa
3. Vetri trattati in superficie
 - a. Pellicole
 - b. Vetri riflettenti
4. Vetri cromogenici
 - a. Vetri fotocromici
 - b. Vetri termocromici
 - c. Vetri elettrocromici
 - d. Vetri a cristalli liquidi

3.3.3 Sistemi di schermatura

I sistemi di schermatura si presentano come il necessario complemento agli elementi vetrati: i primi consentono l'immissione di luce naturale all'interno, gli altri consentono un controllo della luce

naturale immessa in ambiente per la protezione contro abbagliamento ed eventualmente contro eccessivi carichi termici. Con riferimento agli elementi schermanti, è possibile procedere ad una classificazione basata su diversi criteri, i vantaggi e gli svantaggi proposti da ciascuna soluzione, in relazione ai criteri elencati, sono esplicitati in [4] pagg. 7-10:

La

mostra le diverse tipologie di materiali schermanti attualmente presenti in commercio o in fase di pre-commercializzazione.

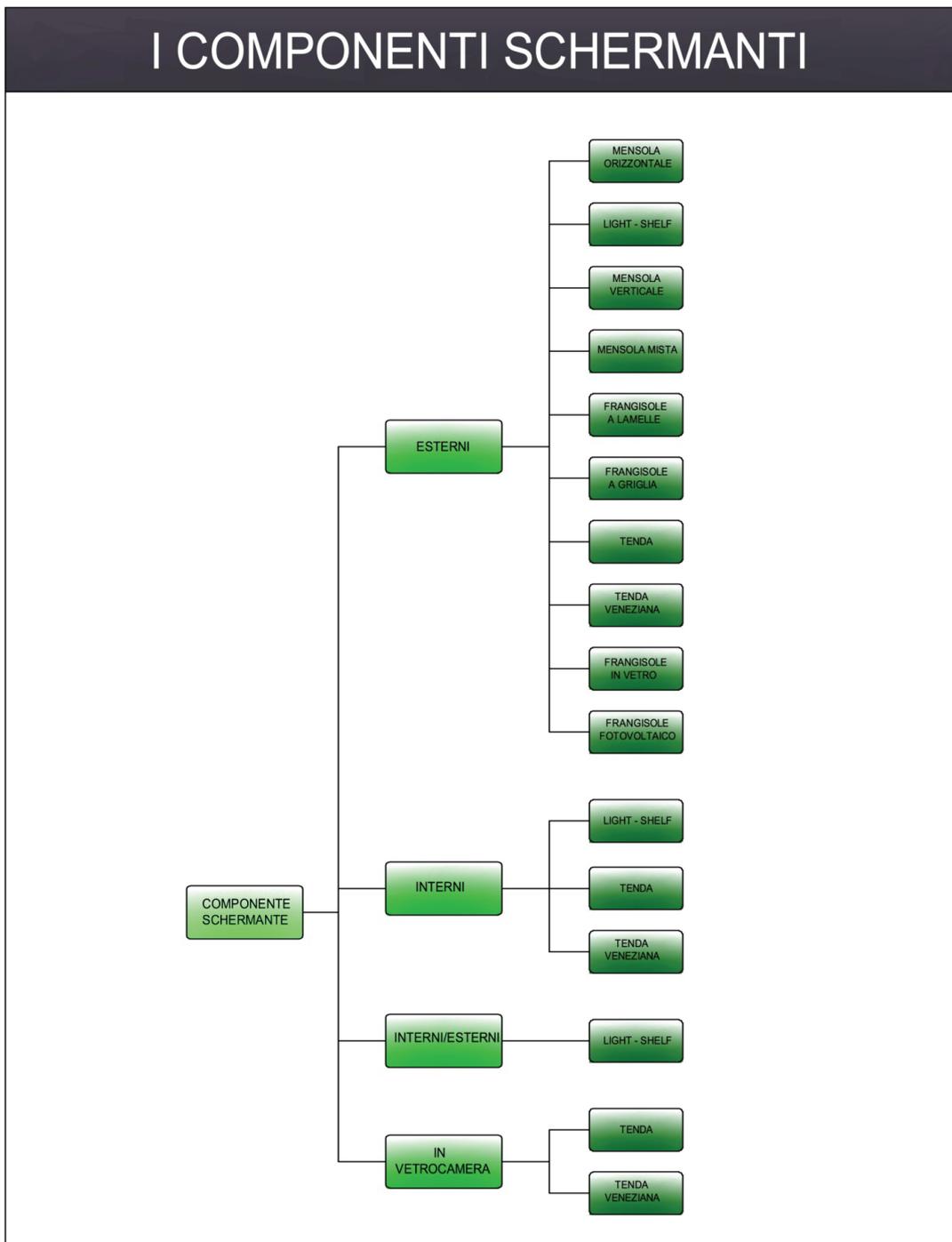


Fig. 29 Classificazione dei componenti schermanti.

- 1. Posizione dell'elemento schermante rispetto al componente trasparente:**
sistemi interni (fissi o mobili):
sistemi esterni (fissi o mobili):
schermi esterni/interni (fissi o mobili)

sistemi in intercapedine (fissi o mobili):

2. Flessibilità di movimento:

sistemi fissi

sistemi mobili

3. Configurazione geometrica dello schermo:

sistemi continui:

sono da considerarsi tali gli aggetti, sia orizzontali che verticali, e i light-shelves. Sono costituiti da elementi opachi formanti un'unica superficie schermante senza interruzioni. Sono capaci di assicurare la schermatura totale della radiazione solare incidente nella direzione e secondo gli angoli con cui sono collocati

sistemi discontinui:

sono costituiti da una serie di lamelle opportunamente orientate in modo da schermare la radiazione solare incidente, consentono anche il passaggio dei flussi di aria e il conseguente smaltimento del calore che si accumula in corrispondenza della finestra

4. Comportamento rispetto alla radiazione incidente:

sistemi speculari (materiali lucidi):

si comportano come uno specchio, con un angolo di riflessione della radiazione uguale all'angolo di incidenza

sistemi diffondenti (materiali opachi):

riflettono la radiazione luminosa incidente in maniera uniformemente distribuita in tutte le direzioni dello spazio circostante.

Per la caratterizzazione luminosa dei componenti schermanti si definiscono i seguenti parametri prestazionali:

- coefficiente di trasmissione luminosa
- coefficiente di riflessione luminosa
- temperatura di colore correlata della luce naturale trasmessa
- indice di resa cromatica della luce naturale trasmessa
- modalità di trasmissione e riflessione
- fattore di ombreggiamento luminoso, definito come:

$$FL = \frac{\Phi_{\text{lu min oso incidente sulla vetrata con schermo}}}{\Phi_{\text{lu min oso incidente sulla vetrata senza schermo}}}$$

- fattore di apertura

$$OF = \frac{\text{area aperta tra le fibre}}{\text{area totale del tessuto}}$$

In particolare, per il fattore di apertura, vale la seguente Tab. 8:

	Fattore di Apertura (OF)
Trama stretta	$0 \leq OF \leq 0.07$
Trama media	$0.07 \leq OF \leq 0.25$
Trama larga	$0.25 \leq OF \leq 1$

Tab. 8. Valori caratteristici di OF

I sistemi schermanti sono descritti in dettaglio in [4] pagg. 112 – 122 e comprendono:

1. Mensola orizzontale
2. Mensola verticale
3. Mensola mista

4. Frangisole a griglia
5. Tende
6. Films olografici

3.3.4 Sistemi di trasporto della luce naturale

I sistemi di trasporto della luce naturale raccolgono e trasportano la luce solare per grandi distanze al centro dell'edificio attraverso fibre ottiche o condotti di luce. I sistemi di illuminazione diurna che captano e conducono la luce solare all'interno di un edificio sono composti da tre unità funzionali:

1. l'elemento di captazione, il componente collocato all'esterno con funzione di raccogliere e indirizzare la componente diretta (a volte anche diffusa) della radiazione solare;
2. l'elemento di conduzione, il componente che trasporta la luce captata fino all'ambiente da illuminare;
3. l'elemento di diffusione, il componente posizionato all'interno dell'ambiente da illuminare, con funzione di controllo del flusso luminoso trasportato dall'elemento di conduzione.

Si possono distinguere i **sistemi di trasporto** della luce naturale in due differenti gruppi in funzione del tipo di elemento captatore impiegato:

Sistemi passivi (fissi):

sistemi che utilizzano elementi di captazione fissi, che non sono in grado di seguire il percorso solare.

- condotti solari: sistema efficace per il trasporto della componente diretta della luce solare, ma non della diffusa; è un tipo di sistema che funziona bene in condizioni di cielo sereno ma non in condizioni di cielo coperto.
- light pipes: un sistema ottimale in presenza di illuminazione naturale a basse altezze solari.

Sistemi attivi (mobili):

sistemi che utilizzano elementi di captazione mobili, in grado di seguire in ogni istante il percorso solare. I sistemi attivi comportano notevoli costi di installazione e di gestione, si possono classificare in due tipologie:

- eliostato: sistema dotato di specchi riflettenti; può essere ad un elemento o a due elementi (in quest'ultimo caso è in grado di convogliare la luce diretta del sole verso punti altrimenti irraggiungibili);
- sistema "Himawari" (fibre ottiche): un sistema in cui l'elemento di captazione è costituito da una serie di lenti Fresnel, che alimentano delle fibre ottiche.

A seconda del tipo di sistema di cui fanno parte e della funzione che sono chiamate a svolgere, le tre unità funzionali che costituiscono i sistemi di conduzione della luce possono essere quindi di diversi tipi e avere differenti caratteristiche.

L'elemento di captazione può essere:

- **fisso**: l'obiettivo di questo elemento è di considerare da un lato la possibilità di acquisire la maggior quantità di luce all'interno dell'ambiente in un dato istante, dall'altro di garantire adeguati livelli di illuminamento nel corso di tutto l'anno. La sua forma e le sue dimensioni derivano dal miglior compromesso tra l'ottimizzazione dell'ingresso della luce solare diretta e diffusa;
- **mobile**: in questo caso lo scopo è quello di seguire la posizione del sole nel tempo. Di conseguenza, la progettazione viene guidata dalla ricerca di una posizione ottimale rispetto alla direzione, mutevole, dei raggi solari (la componente diffusa della luce di solito non viene considerata).

L'elemento di conduzione può essere costituito da:

- **un condotto**, dove la conduzione della luce avviene per mezzo della semplice riflessione su superfici speculari o diffondenti;

- **le lenti e le fibre ottiche**, dove la luce naturale viene utilizzata come quella artificiale: una sorgente luminosa diffusa (la volta celeste) viene trasformata in una sorgente puntiforme che può essere indirizzata verso un qualsiasi punto dell'ambiente.

L'elemento di diffusione è previsto solo in alcune applicazioni, quando prevale lo scopo di controllare il flusso luminoso introdotto per garantire il comfort visivo all'interno dell'ambiente.

L'elemento di diffusione può essere:

- un elemento di chiusura trasparente in vetro, policarbonato o metacrilato;
- un elemento riflettore realizzato con pellicole, rivestimenti riflettenti e diffondenti;
- un elemento ottico definito da lenti convergenti o divergenti, lenti Fresnel e pannelli diffusori.

Il parametro fondamentale a cui far riferimento è la trasmittanza, ovvero la capacità del sistema di trasmettere la radiazione luminosa globale, nelle componenti diretta e diffusa; essa viene calcolata separatamente per le due componenti, in funzione della geometria del condotto, del coefficiente di riflessione delle superfici interne del condotto e della posizione del sole sull'orizzonte. La trasmittanza rappresenta anche il rendimento o efficienza del sistema, poichè descrive il rapporto tra flusso luminoso uscente e quello entrante.

I sistemi di trasporto solare sono descritti in dettaglio in [4], pagg. 80 - 90 e comprendono:

5. Condotti solari
6. Eliostato
7. Fibre ottiche

3.3.5 Sistemi di illuminazione diurna

Negli ultimi anni, l'innovazione tecnologica ha portato sempre più in architettura allo sviluppo di sistemi di controllo dell'illuminazione naturale di tipo innovativo, che siano in grado di esercitare un controllo sia sull'ingresso di luce naturale, sia sul guadagno termico passivo. L'elemento finestrato viene così a caratterizzarsi come elemento multifunzionale integrato, formato da un insieme di componenti ognuno dei quali preposto al controllo distinto di una funzione: areazione, schermatura, vista verso l'esterno, quantità e distribuzione della luce naturale trasmessa.

I materiali innovativi possono essere a comportamento passivo o attivo: nel primo caso variano le proprie prestazioni termiche e ottiche in funzione dei parametri di intensità luminosa e temperatura; nel secondo caso le prestazioni variano attraverso dispositivi impiantistici. L'elemento di involucro trasparente è gestito in modo integrato con le varie funzioni e i vari sistemi dell'edificio portando così anche a rilevanti risparmi energetici.

I nuovi materiali che costituiscono i sistemi di controllo, coadiuvati da tecnologie specifiche, sono in grado di garantire prestazioni elevate in termini di schermatura degli ambienti interni e ridistribuzione della luce naturale in ambiente, sfruttando principi fisici quali la riflessione, la rifrazione e la diffrazione della luce.

Per definire le diverse tipologie di controllo della luce naturale, è opportuno innanzitutto effettuare una classificazione delle funzioni che tali sistemi di controllo devono svolgere:

- controllo della quantità di luce in ambiente
- controllo della radiazione solare diretta controllo della luminanza della superficie vetrata
- controllo del colore della luce naturale in ambiente

L'espletamento di queste funzioni è assicurato attraverso:

- l'attenuazione della radiazione solare incidente (schermatura)
- il ridirezionamento della radiazione solare incidente che può avvenire per:
 - riflessione verso l'esterno e/o verso l'interno
 - rifrazione
 - diffrazione

Le funzioni vengono svolte da elementi di controllo che possono essere costituiti dai cosiddetti sistemi di illuminazione diurna ovvero da componenti schermanti opache o trasparenti. Riguardo la

scelta di queste forme di controllo nelle diverse situazioni, è necessario fare riferimento agli scopi per cui la superficie deve essere scelta e alle prestazioni che si prevedono nello studio del ciclo di vita della struttura.

I sistemi di illuminazione diurna e i componenti schermanti attualmente disponibili per il controllo della luce naturale sono vari e diversi per prestazioni, potenzialità e applicabilità, sono descritti in dettaglio in [4], pagg. 16 – 79 e comprendono:

1. Light shelf
 - a. Light shelf trattato otticamente
 - b. Light shelf ad inseguimento solare
2. Lamelle
 - a. Lamelle in vetro
 - b. Lamelle con sistema fotovoltaico integrato
3. Tende veneziane
 - a. Tende traslucide
 - b. Lamelle che direzionano la luce
 - c. Sistema Fish
 - d. Veneziana selettiva
4. Pannelli prismatici
5. Pannelli laser cut
6. Lucernario angolare selettivo
7. Schermature a guide di luce
8. Vetro che ridireziona la luce solare
9. Vetro che direziona la luce solare con HOEs (elementi ottici olografici)
10. Sistemi di schermatura trasparente
11. Soffitti anidolici
12. Aperture anidoliche zenitali
13. Schermature solari anidoliche

3.3.6 Sistemi PSALI e HSC

Il sistema PSALI integra la luce del giorno con la luce artificiale, massimizzando l'uso della prima per ottimizzare l'efficienza della seconda. Il metodo di controllo dell'illuminazione installato in una stanza in accordo con il sistema PSALI, ha la capacità di illuminare parti della stanza separatamente: durante il giorno permette alla luce naturale di illuminare le zone vicino la finestra con l'illuminazione artificiale soprastante spenta, mentre viene illuminata artificialmente solo la parte più lontana dalla finestra, risparmiando così energia (Fig. 30).

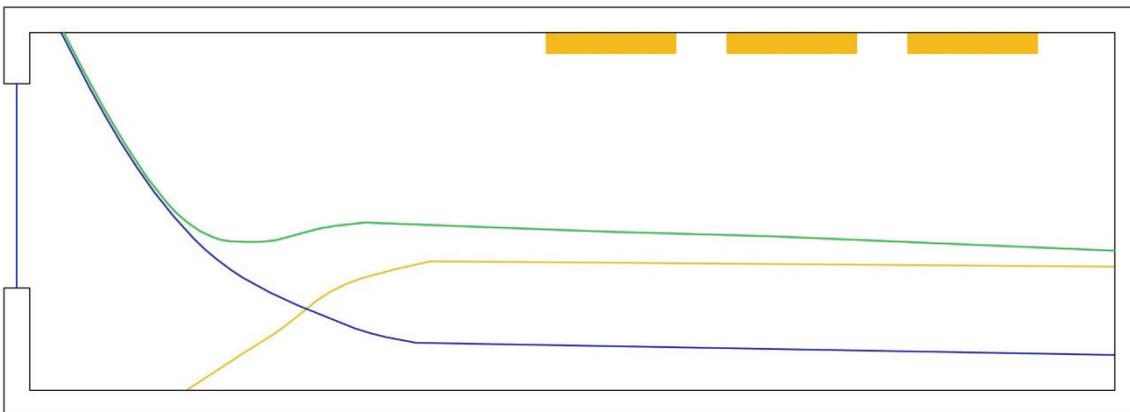


Fig. 30 - Schema PSALI.

La descrizione di una applicazione, con i principi base e gli elementi progettuali è riportata in [4], pagg. 124 – 129.

3.4 Sistemi di controllo

Tradizionalmente l'obiettivo finale nell'utilizzo di sistemi di controllo è quello di garantire condizioni di illuminamento adeguate a qualsiasi compito visivo riducendo i consumi di energia elettrica da parte delle sorgenti di illuminazione artificiale. L'esigenza primaria per cui i sistemi di controllo sono nati, quindi, è quella di fornire soluzioni di illuminazione ad alto risparmio energetico in relazione alla "funzione" degli ambienti in cui tali sistemi vengono installati. I dati di input sui quali si basa il funzionamento di questi sistemi possono essere molteplici: dalla disponibilità di luce naturale in ambiente, alla modalità di utilizzo degli ambienti (profili di occupazione noti o presenza/assenza delle persone). Le tecniche di controllo corrispondenti a queste strategie possono essere l'accensione o lo spegnimento degli apparecchi e la regolazione del flusso luminoso (dimmerazione) delle sorgenti di illuminazione artificiale.

Recentemente i sistemi di controllo si sono ulteriormente specializzati nel perseguire obiettivi di maggior comfort visivo o valorizzazione dell'ambiente luminoso attraverso la simulazione dell'andamento dinamico delle caratteristiche di intensità e colore della luce naturale o attraverso la gestione della luce colorata. In questo senso i sistemi di controllo hanno acquisito nuove funzionalità, quali la memorizzazione di scene e sequenze luminose richiamabili in modo automatico o manuale, orientate a rispondere ad obiettivi sia di carattere funzionale che "scenografico".

L'ambiente illuminato viene posto in primo piano attraverso la variazione della cromaticità della luce e della temperatura di colore correlata della luce bianca in modo da creare ambienti confortevoli e stimolanti in grado di garantire il benessere psico-fisico degli individui.

In quest'ottica di continuo ampliamento delle caratteristiche e delle funzioni dei sistemi di gestione della luce si inserisce la necessità di conoscere le soluzioni proposte dalle aziende che oggi guidano il mercato del settore illuminotecnico. Le tecnologie oggi esistenti risultano sempre più numerose e differenziate.

In tal senso si è ritenuto necessario mettere a disposizione di progettisti e professionisti uno strumento sintetico e immediato che evidenziasse le caratteristiche funzionali e tecniche dei prodotti presenti sul mercato, per favorirne la conoscenza e la scelta consapevole durante le fasi di progettazione. Spesso, infatti, per un progettista non è semplice orientarsi correttamente in un panorama caratterizzato da un'offerta piuttosto ampia e articolata.

In primo luogo è stato definito un approccio alla classificazione dei sistemi di controllo e quindi si è proceduto alla definizione di una scheda tipo che consentisse di riassumere sinteticamente le principali caratteristiche dei sistemi analizzati. Maggiori dettagli sul tema sono reperibili in [2]

3.4.1 Obiettivi di gestione e controllo della luce

Appare chiaro, come già evidenziato, che i benefici derivanti dall'utilizzo di un sistema di controllo non riguardano solo il risparmio energetico ma anche la possibilità di favorire una percezione confortevole degli ambienti attraverso il colore della luce e la sequenze dinamica della luce. Si è, quindi, pensato di suddividere i sistemi di controllo, dal punto di vista degli obiettivi di controllo della luce, in due macrocategorie; da un lato sistemi che si distinguono per la programmazione di un'illuminazione funzionale agli spazi in cui sono installati, dall'altro sistemi studiati per accentuare ed evidenziare gli ambienti attraverso il colore e la direzione della luce (illuminazione scenografica).

3.4.2 Benefici derivanti dall'utilizzo dei sistemi di gestione e controllo della luce

Un sistema di controllo ideale incrementa la qualità del progetto di illuminazione garantendo condizioni ottimali di comfort visivo, riducendo gli sprechi energetici, con riscontri positivi sia sulla sfera delle esigenze dell'utenza sia su quella relativa alle implicazioni economiche e ambientali del progetto.

Risparmio energetico

Un sistema di gestione e controllo della luce influisce positivamente sul fabbisogno energetico di un edificio legato all'illuminazione artificiale in relazione alla durata di accensione/spegnimento degli apparecchi di illuminazione e alla quantità di flusso emesso.

Comfort visivo

L'utilizzo corretto di un sistema di gestione e controllo della luce concorre alla determinazione di

un'elevata qualità del progetto di illuminazione in termini di comfort visivo connesso alle esigenze dell'utente in funzione dello svolgimento di un determinato compito visivo, alle caratteristiche psicofisiche dell'utente, alle sue capacità visive, alle caratteristiche dell'ambiente confinato e dell'impianto di illuminazione.

Comfort termico

L'utilizzo di sistemi di gestione e controllo della luce può termico in ambiente poiché riduce i carichi endogeni dovuti sia al calore emesso dalle sorgenti di illuminazione degli apparecchi sia al contributo della radiazione solare entrante dalle superfici finestrate che risulterà ridotta o schermata dai sistemi di schermatura opportunamente gestiti all'interno delle funzionalità del sistema di controllo.

Flessibilità degli spazi e degli impianti

Un sistema di controllo consente la flessibilità nella progettazione e nella gestione dell'impianto di illuminazione in quanto consente di riconfigurare l'installazione senza dover intervenire sul cablaggio fisico degli apparecchi.

Valorizzazione degli spazi

Un ulteriore beneficio derivante dall'utilizzo dei sistemi di controllo è la valorizzazione degli spazi attraverso la regolazione del flusso luminoso, del colore e della temperatura di colore della luce. In ambienti come gli uffici o le scuole, ad esempio, che sono occupati e utilizzati per tutto l'arco della giornata la variazione del flusso luminoso e della temperatura di colore della luce artificiale comporta una sensazione di benessere psicofisico negli utenti durante l'attività lavorativa riproducendo l'andamento dinamico della luce naturale. Si tratta, quindi, di un obiettivo di controllo a carattere funzionale.

Manutenibilità

È possibile ridurre i costi di manutenzione dell'impianto di illuminazione in quanto, pur essendo maggiori i costi iniziali di realizzazione, la manutenzione dell'intero sistema sarà facilitata nell'eventuale verifica e sostituzione dei dispositivi.

3.4.3 Dispositivi sui quali i sistemi attuano il controllo

I dispositivi sui quali i sistemi possono attuare il controllo sono:

Apparecchi di illuminazione: per gestire la luce artificiale all'interno degli ambienti.

Sistemi di schermatura: per gestire la luce naturale all'interno degli ambienti.

L'analisi di mercato mette in evidenza che il controllo automatico dei sistemi di schermatura insieme agli apparecchi di illuminazione sia realizzato soltanto da pochi sistemi, destinati ad impianti di grandi dimensioni e con protocolli di comunicazione piuttosto complessi. Nella maggior parte dei casi, i sistemi di controllo gestiscono esclusivamente l'illuminazione artificiale, mentre la movimentazione dei sistemi di schermatura, e quindi la regolazione dell'illuminazione naturale, avviene con modalità di gestione manuale.

3.4.4 Architettura del sistema

Risulta importante provare a catalogare i sistemi di controllo anche dal punto di vista delle logiche di funzionamento che regolano le varie parti costituenti il sistema. Per questo motivo, nonostante la presenza di singole specificità e differenti livelli di complessità, è possibile suddividere i sistemi di controllo in tre macrocategorie: *sistemi di base o integrati negli apparecchi (sistemi stand-alone)*, *sistemi centralizzati* e *sistemi centralizzati integrati in Building Management System*. Da questo punto di vista è stato molto importante analizzare non solo i prodotti delle aziende che operano nel settore illuminotecnico ma anche i prodotti delle aziende leader nel settore delle automazioni e della domotica, che vedono il controllo dell'illuminazione artificiale associato, ad esempio, al controllo dell'illuminazione naturale, della climatizzazione degli ambienti o al controllo in termini di sicurezza degli accessi.

3.4.5 Strategie di controllo

Le reali esigenze associabili agli obiettivi di controllo della luce rappresentano le impostazioni in base alle quali un sistema di controllo viene configurato. Anche in questo caso sarebbe possibile suddividere i prodotti presenti oggi sul mercato in tre categorie, in relazione a tre differenti strategie di controllo utilizzabili.

Se si parla di illuminazione funzionale il controllo della luce verrà effettuato favorendo l'*integrazione luce naturale e artificiale* (in base alla disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti) oppure a seconda della *modalità di utilizzo degli ambienti* (in base alla presenza/assenza delle persone, a profili di occupazione noti o alla necessità di richiamare differenti scene di luce a seconda dello svolgimento di diverse attività). Se il riferimento, invece, è un'illuminazione di tipo scenografico la strategia attraverso la quale la luce viene controllata è senza dubbio la *valorizzazione estetica degli ambienti*, attraverso il colore o l'illuminazione dinamica.

3.4.6 Tecniche di controllo

Le tecniche di controllo sono direttamente dipendenti dalle strategie. Rappresentano sostanzialmente le modalità attraverso le quali le strategie di controllo vengono messe in atto. Nel caso del controllo degli apparecchi di illuminazione sono individuabili cinque diverse tecniche di controllo: l'*accensione/spengimento* degli apparecchi di illuminazione, la *regolazione dell'intensità* (dimming) delle sorgenti, la *variazione del colore* e la *variazione della temperatura di colore* delle sorgenti, e, in ultimo, l'*attivazione di scene e sequenze luminose*. Una scena è una situazione luminosa statica, mentre la sequenza rappresenta una successione temporizzata di scene con dissolvenza (fading) tra l'una e l'altra (scenografia dinamica). Entrambe le situazioni possono essere programmate e richiamate manualmente o automaticamente.

3.4.7 Dispositivi presenti nei sistemi di controllo:

Qualsiasi modifica delle prestazioni dell'impianto viene concretamente realizzata dai dispositivi di controllo. Il numero e la tipologia dei dispositivi (*centralina di comando, dispositivi passivi, dispositivi attivi e attuatori*) varia notevolmente a seconda del prodotto considerato. Per un progettista risulta, quindi, molto importante essere a conoscenza della "dimensione concreta" del sistema di controllo prescelto.

3.4.8 Protocolli di gestione e comunicazione dei dati

Per una comprensione dell'integrabilità dei sistemi di controllo negli edifici è fondamentale la classificazione dei sistemi in base al protocollo di comunicazione adottato. Il sistema *digitale DALI* è ormai presente in tutte le aziende, così come l'*analogico 1-10V*. Inizialmente utilizzato per applicazioni scenografiche complesse il protocollo *digitale DMX* si sta sempre più diffondendo anche nell'illuminazione architettonica. Riferendosi, poi, a sistemi per gestione di un edificio nella sua interezza i protocolli più utilizzati sono sicuramente il *Konnex (KNX)* e il *LonWorks (LON)*, protocolli complessi che consentono una comunicazione e un'interconnessione flessibile fra i diversi livelli di controllo.

3.4.9 Ambito spaziale di riferimento

L'architettura del sistema di controllo e il tipo di segnale e/o protocollo utilizzato determina anche la dimensione del sistema e di conseguenza l'ambito spaziale di riferimento. Le aziende sviluppano prodotti in grado di gestire diversi stadi di complessità, dal singolo ambiente all'intero piano/edificio. Risulta, quindi, necessario per un progettista capire l'architettura di un sistema di controllo anche in base alla dimensione locale o globale per cui il sistema viene utilizzato: *ambiente singolo, più ambienti di medie e grandi dimensioni, l'edificio*.

Di seguito viene riportato lo schema della scheda tipo e alcuni esempi di classificazione di prodotti. La descrizione dettagliata di tutti i sistemi presi in considerazione è riportata in [2].

Scheda tecnica di classificazione

OBIETTIVI DI CONTROLLO DELLA LUCE	ARCHITETTURA DEL SISTEMA	STRATEGIE DI CONTROLLO		TECNICHE DI CONTROLLO	DISPOSITIVI	PROTOCOLLO DI GESTIONE E COMUNICAZIONE DEI DATI	AMBITO SPAZIALE DI RIFERIMENTO
Illuminazione funzionale	Sistema di base (stand-alone)	Integrazione luce naturale e artificiale	Disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti	Accensione/spegnimento	Centralina di comando:	Analogico 1-10V	Ambiente singolo
		Modalità di utilizzo degli ambienti	Presenza delle persone Programmazione oraria Scene di luce in relazione alle diverse attività				
Illuminazione scenografica	Centralizzato	Valorizzazione estetica degli ambienti	Controllo RGB	Variazione della temperatura di colore	Dispositivi attivi:	LonWorks	Edificio
			Controllo luce DINAMICA				

Verrà svolto un ulteriore ampliamento della scheda in relazione al campo di applicabilità dei diversi sistemi di controllo, sia in termini di distinzione tra edifici esistenti e nuove costruzioni, sia in termini di destinazione d'uso degli ambienti.

3.4.10 Analisi di mercato: aziende e prodotti analizzati

ILLUMINAZIONE FUNZIONALE

ABB: ABB i-bus EIB/KNX
ERCO: Lon Area Net, Lon Professionale Net
ETAP: EMD, DALI-ELS, MDS, MDD, ELS
IGUZZINI: DLC Master, Scene Equalizer
INSTA: Instalight PROF, Instalight PLUS, Instalight DALI
OSRAM: DALI Advanced, DALI Basic, Touch DIM Sensor, DALI Multi 3, DALI MCU, Dim Mico, Dim Multi, Dim Multi 3, Dim Pico, Touch DIM, Touch DIM Radio
PHILIPS: Light Master Modular, MultiDim, Occuswitch, Luxsense, Actilume
SIEMENS: GAMMA BOX, Instabus EIB
TRIDONIC: SmartDim, SmartLSII, SmartSwitch, DSISmart, ModularDim
TRILUX: Actilume, Bluemotion EDS, Offset EDS, Lightgate plus
ZUMTOBEL: Luxmate Professional, Luxmate Litenet, Luxmate Basic, DIMLITE

ILLUMINAZIONE SCENOGRAFICA

ERCO: Light system DALI
ETAP: Dynamic Lighting
IGUZZINI: Colour Quick, Colour Equalizer, Colour Dynamic Quick, DLC Master, Scene Equalizer, Biodynamic Quick, Light Equalizer
INSTA: Instalight DMX
OSRAM: Easy Colour Control
PHILIPS: ColourWheel, Color Dial, Colour Chaser DMX, Colour Chaser Touch, MultiDim, CVC Personal Light, MultiDim, Scenio 100, Kit Dynamic Ambience
TARGETTI: Light Master Navigator, Luce Viva Secs 75, Myscenario, Chroma Cue
TRILUX: DALI Easy, LMS Plenar
ZUMTOBEL: Luxmate Emotion, ZBox

Esempio
ETAP_DALI-ELS

OBIETTIVI DI CONTROLLO DELLA LUCE	ARCHITETTURA DEL SISTEMA	STRATEGIE DI CONTROLLO		TECNICHE DI CONTROLLO	DISPOSITIVI	PROTOCOLLO DI GESTIONE E COMUNICAZIONE DEI DATI	AMBITO SPAZIALE DI RIFERIMENTO
Illuminazione funzionale	Sistema di base (stand-alone)	Integrazione luce naturale e artificiale	Disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti	Accensione/spengimento	Centralina di comando: Control Unit	Analogico 1-10V	Ambiente singolo
		Modalità di utilizzo degli ambienti	Presenza delle persone Programmazione oraria Scene di luce in relazione alle diverse attività	Regolazione dell'intensità	Dispositivi passivi: Dispositivi attivi: Fotosensore LDR	Digitale DALI	Più ambienti di medie e grandi dimensioni
Illuminazione scenografica	Centralizzato Centralizzato integrato in Building Automation	Valorizzazione estetica degli ambienti	Controllo RGB	Variazione del colore	Attuatori: Reattore elettronico DALI	Digitale DMX	Edificio
			Controllo luce DINAMICA	Variazione della temperatura di colore	Attivazione di scene e sequenze luminose	LonWorks Konnex	

Esempio
ETAP_EMD

OBIETTIVI DI CONTROLLO DELLA LUCE	ARCHITETTURA DEL SISTEMA	STRATEGIE DI CONTROLLO		TECNICHE DI CONTROLLO	DISPOSITIVI	PROTOCOLLO DI GESTIONE E COMUNICAZIONE E DEI DATI	AMBITO SPAZIALE DI RIFERIMENTO
Illuminazione funzionale	Sistema di base (stand-alone)	Integrazione luce naturale e artificiale	Disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti	Accensione/spegnimento	Centralina di comando: Control Unit	Analogico 1-10V	Ambiente singolo
		Modalità di utilizzo degli ambienti	Presenza delle persone Programmazione oraria	Regolazione dell'intensità	Dispositivi passivi: Telecomando IR	Digitale DALI	
Illuminazione scenografica	Centralizzato	Valorizzazione estetica degli ambienti	Scene di luce in relazione alle diverse attività	Variazione del colore	Dispositivi attivi: Fotosensore LDR Sensore di presenza	Digitale DMX	Più ambienti di medie e grandi dimensioni
			Controllo RGB	Controllo luce DINAMICA	Variazione della temperatura di colore	Attuatori: Reattore elettronico DALI	LonWorks

Esempio
OSRAM_EASY COLOUR CONTROL

OBIETTIVI DI CONTROLLO DELLA LUCE	ARCHITETTURA DEL SISTEMA	STRATEGIE DI CONTROLLO		TECNICHE DI CONTROLLO	DISPOSITIVI	PROTOCOLLO DI GESTIONE E COMUNICAZIONE DEI DATI	AMBITO SPAZIALE DI RIFERIMENTO
Illuminazione funzionale	Sistema di base (stand-alone)	Integrazione luce naturale e artificiale	Disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti	Accensione/spengimento	Centralina di comando: Control Unit DALI EASY II Control Unit OT EASY 60	Analogico 1-10V	Ambiente singolo
		Modalità di utilizzo degli ambienti	Presenza delle persone Programmazione oraria Scene di luce in relazione alle diverse attività	Regolazione dell'intensità Variazione del colore	Dispositivi passivi: Software di configurazione Telecomando IR Interruttori Tasti a rilascio	Digitale DALI	
Illuminazione scenografica	Centralizzato Centralizzato integrato in Building Automation		Controllo RGB	Variazione della temperatura di colore	Dispositivi attivi: Sensore di movimento	Digitale DMX	Più ambienti di medie e grandi dimensioni
		Valorizzazione estetica degli ambienti	Controllo luce DINAMICA	Attivazione di scene e sequenze luminose	Attuatori: Reattore elettronico QTi Reattore elettronico HTi	LonWorks Konnex	

3.5 Metodologie di Modellazione e Calcolo

I metodi generalmente impiegati per il calcolo della luce naturale sono tre:

- metodi di calcolo manuali
- modelli in scala, con impiego in cielo reale ovvero artificiale
- software di calcolo computerizzato.

Ciascuno dei tre metodi deve essere valutato sulla base di tre aspetti chiave che permettono di definirne potenzialità e limiti:

- praticità d'uso
- affidabilità nella simulazione delle sorgenti luminose
- interazione luce-ambiente

Come considerazione generale, prima di passare ad un'analisi più dettagliata dei differenti metodi, va detto che in generali tutti i metodi possono essere impiegati nelle diverse fasi progettuali con finalità ed impegno differenti. Ad esclusione poi dei metodi manuali, gli altri due metodi, caratterizzati da potenzialità e limiti completamente differenti, vengono spesso combinati ed associati per uno studio quali-quantitativo dell'ambiente luminoso più completo ed approfondito.

3.5.1 Metodi di calcolo manuali

I metodi di calcolo manuali (di tipo analitico o grafico) sono generalmente caratterizzati da molti limiti, in quanto applicabili esclusivamente a un numero limitato di situazioni molto semplici. Il loro campo d'applicazione è pertanto fortemente limitato, ed i risultati sono molto approssimativi e possono essere considerati solamente in una fase progettuale preliminare. I vantaggi associati a questo metodo sono: la semplicità di utilizzo, i pochi parametri richiesti e l'economicità. La Tab. 9 riporta in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi del questo metodo di calcolo.

Vantaggi	Svantaggi
Semplicità di utilizzo	Campo d'applicazione fortemente limitato (geometrie semplici e tecnologie tradizionali)
Pochi parametri richiesti	Risultati approssimativi
Economicità	

Tab. 9 - Metodi di calcolo manuali

3.5.2 I modelli in scala

I modelli in scala consentono di prevedere le condizioni di illuminazione naturale in spazi confinati, analizzando così il progetto direttamente, attraverso misure dei valori delle grandezze fotometriche, sotto un cielo reale o all'interno di un cielo artificiale, e dando quindi al progettista la possibilità di controllare in tempi rapidi la validità delle soluzioni progettuali definite. L'aspetto fondamentale di questa operazione sta nel riprodurre accuratamente la geometria, i materiali, e le proprietà fotometriche delle superfici che caratterizzano il modello per ottenere dei risultati il più possibile attendibili.

L'efficacia dei modelli in scala rispetto agli altri due metodi di calcolo risulta evidente nel caso di geometrie particolarmente complesse, e inoltre risulta comunque utile come metodo di verifica al calcolo manuale e/o ai programmi di calcolo computerizzato. Un aspetto fondamentale nella realizzazione del modello in scala è lo studio dell'ambiente luminoso naturale, infatti si può posizionare il modello sotto un cielo reale o sotto un cielo artificiale.

La Tab. 10 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di modelli in scala per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Vantaggi	Svantaggi
non sono necessari fattori di scala	complessità e tempi lunghi per la realizzazione di modelli precisi e accurati
molto usati in campo progettuale	difficoltà (e costi) nel predisporre un apparato di strumenti di misura in modelli di ridotte dimensioni
accuratezza nei risultati	difficoltà di disporre di elementi e materiali nella giusta scala e con le reali proprietà fotometriche
particolarmente vantaggiosi nel caso di geometrie complesse	
riproduzione fedele di situazioni reali	
possibilità di analisi su scale diverse (urbana, indoor)	
risultati qualitativi e quantitativi confrontabili con quelli osservabili in ambiente reale	
possibilità di effettuare valutazioni qualitative attraverso la visione diretta all'interno del modello o per mezzo di riprese fotografiche	
possibilità di compiere valutazioni soggettive di comfort visivo	
validi strumenti di verifica dei metodi di calcolo manuali e computerizzati	
In più, per cielo reale:	In più, per cielo reale:
corrispondenza con le situazioni reali	impossibilità di riferirsi a condizioni standard e quindi di confrontare soluzioni progettuali diverse
rapida ed economica valutazione delle prestazioni luminose di un edificio esistente	
In più, per cielo artificiale:	In più, per cielo artificiale:
possibilità di simulare il comportamento dinamico della luce naturale	possibili errori di scala
possibilità di riprodurre numerose condizioni di cielo (sereni, coperti, intermedi)	
possibilità di riferirsi a condizioni standard e confrontare soluzioni progettuali diverse	

Tab. 10 - Modelli in scala.

Generalmente, i laboratori dotati di un cielo artificiale sono attrezzati con entrambi i seguenti sistemi di simulazione:

- sole artificiale (heliodon): struttura che movimentata il modello in scala per simulare il percorso apparente del sole, consentendo la simulazione della componente diretta della luce solare
- simulatore di cielo (cielo artificiale): struttura che riproduce la distribuzione di luminanza tipica della volta celeste, consentendo la simulazione della componente diffusa della luce solare.

Tali sistemi non vengono mai usati contemporaneamente, in quanto sono diversi gli ordini di grandezza con cui essi lavorano. È necessario comunque distinguere le tipologie di cielo artificiale, che variano a seconda delle diverse funzioni che svolgono:

- cielo a specchi: è stato uno dei primi a diffondersi con lo scopo di compiere misure quantitative del fattore di luce diurna; per questo motivo, tali cieli sono privi del sole artificiale. I cieli a specchio sono ambienti parallelepipedi con pareti verticali rivestite di

specchi, mentre il soffitto è costituito da una superficie diffondente opalina, in modo da determinare una successione infinita di riflessioni di tali superfici. La volta celeste è riprodotta attraverso una serie di sorgenti artificiali (fluorescenti lineari, regolabili in intensità luminosa) collocate esternamente rispetto al soffitto. La distribuzione di luminanza che ne deriva è tale da simulare in maniera fedele le condizioni di cielo coperto standard CIE.

- cieli a volta: l'obiettivo è quello di poter dare valutazioni quantitative del fattore di luce diurna e valutazioni qualitative per lo studio di ombre, distribuzioni di luminanze e studio delle condizioni di abbagliamento. In questi cieli, la volta celeste è modellata attraverso superfici semisferiche illuminate per mezzo di sorgenti artificiali caratterizzate da un'intensità regolabile e dalla possibilità di essere regolate individualmente o in gruppi per realizzare differenti distribuzioni di luminanza. Il modello viene collocato al centro della semisfera.
- cieli a porzione di volta: la volta celeste è creata sulla base del modello di Tregenza, per cui essa viene discretizzata per mezzo di figure geometriche (145 aree circolari) a luminanza uniforme (Fig. 31 - Cielo a porzione di volta. Fig. 31). In particolare, viene riprodotto un solo spicchio della volta celeste (1/6), costituito da 25 dischi luminosi dotati di sorgenti artificiali modulabili in intensità e controllabili individualmente per realizzare le aree a luminanza uniforme. Anche in questi cieli è possibile prevedere l'installazione di un sole artificiale.

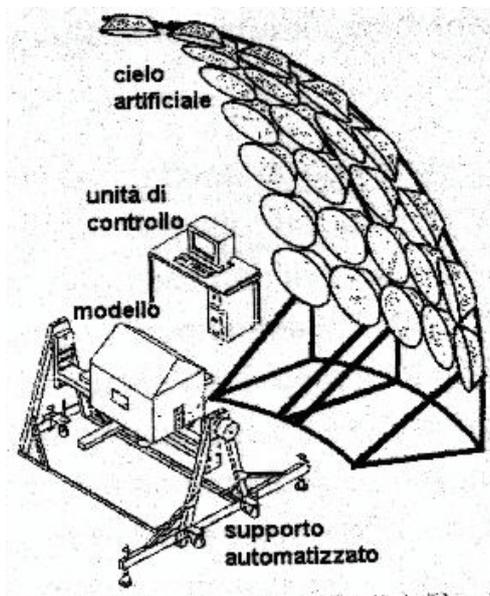


Fig. 31 - Cielo a porzione di volta.

3.5.3 Software di calcolo computerizzato

Si può parlare di simulazione in ambito illuminotecnico solo se si usano algoritmi che riproducono la fisica del fenomeno luminoso: soltanto in questo caso le immagini finali ed i valori numerici ottenuti potranno essere utili per capire i risvolti delle scelte progettuali operate.

Gli algoritmi di calcolo operano delle approssimazioni che tengono conto soltanto di poche delle variabili che convivono effettivamente in ogni ambiente illuminato. Tali procedure si dedicano a simulare la riflessione della luce sugli oggetti, scopo raggiunto attraverso l'uso di algoritmi di primo ordine (nei quali si considera soltanto l'illuminazione diretta e la prima riflessione sulle superfici della luce proveniente dalle fonti luminose – modelli di illuminazione locale) o modelli che tengono conto delle riflessioni multiple che intercorrono tra le superfici (in grado di rendere anche effetti secondari non meno importanti per la percezione dell'ambiente – modelli di illuminazione globale); soltanto in questo caso ci sono i presupposti per simulare le reali condizioni o i potenziali effetti di un progetto.

I modelli di illuminazione globale sono capaci di rendere fenomeni come le riflessioni multiple e gli effetti di secondo ordine. Alcune superfici sono brillanti o patinate, e possiamo vedere in esse le riflessioni di altri oggetti e di altre superfici; altre bloccano la luce e proiettano ombre; altre ancora

sono trasparenti e permettono all'osservatore di guardarvi attraverso: tutte queste possibilità, che poi sono reali condizioni che è normale sperimentare anche in ambienti aventi caratteristiche geometriche e materiche elementari, sono prese in considerazione e trattate all'interno di un modello di illuminazione globale, il quale molto spesso è implementato in modo da aderire a leggi fisiche e in alcuni casi riesce a gestire anche simulazione e controllo numerico.

I modelli di illuminazione globale possono essere implementati secondo due metodologie (o algoritmi di calcolo): quella di ray tracing e quella di radiosity.

- **Ray tracing**, che eccelle nella simulazione dei fenomeni di riflessione speculare, ed è in grado di fornire sia rendering di buon livello, sia valori numerici, ma in relazione a singole direzioni di osservazione
- **Radiosity**, che eccelle nella simulazione di fenomeni di inter-riflessione diffusa; permette di ottenere dati quantitativi precisi e una rappresentazione grafica media dell'ambiente complessivo, calcolando i livelli medi di energia luminosa presenti sulle diverse superfici

Di seguito, si propone un elenco, non esaustivo, di alcuni di questi software. Tra questi Radiance è quello più accreditato presso la comunità scientifica internazionale.

Radiance: Software disponibile gratuitamente, molto utilizzato, ha la possibilità di essere integrato ad altri software o di essere utilizzato indipendentemente.

Lightscape: Software disponibile a pagamento, dedicato esclusivamente al calcolo illuminotecnico. Esegue la valutazione puntuale della componente diretta e riflessa della luce sia naturale che artificiale su qualsiasi superficie reale o immaginaria; dà inoltre la possibilità di inserire modelli architettonici con forme differenti.

Microstation: Software a pagamento, prodotto dalla casa americana Bentley. È un CAD per lavorazioni tecniche e modellazioni grafiche, con il vantaggio che fornisce anche calcoli illuminotecnici molto definiti, con la possibilità di creare un'animazione della dinamica solare

Radoray: Software a pagamento, è integrato a 3D Studio Max per poter effettuare i calcoli in radiosity e rendering foto realistici

Genelux: Software gratuito, funziona attraverso il web. L'utente carica sul sito il file del progetto da analizzare e successivamente scarica i risultati dei calcoli, che vengono eseguiti sul server.

Relux: Software gratuito, è in grado di calcolare oltre che l'illuminazione naturale e artificiale, anche quella integrata naturale e artificiale.

Per quanto riguarda la valutazione dei consumi di energia elettrica in presenza di un sistema di controllo, attualmente i software in grado di eseguire tale valutazione sono poco numerosi. Tra quelli analizzati si citano:

- Daysim
- Lightswitch
- Adeline
- Energy Plus

Nella Tab. 11 sono riportate alcune caratteristiche dei software analizzati, con particolare riferimento ai dati di input necessari al calcolo del fabbisogno di energia elettrica dell'illuminazione artificiale, alle opzioni disponibili per quanto riguarda la simulazione del tipo di sistema di controllo e ai dati di output ottenibili. Al fondo della tabella sono inoltre riportate in analogia le caratteristiche del metodo di calcolo della Norma UNI EN 15193.

Tab. 11 - Principali caratteristiche degli strumenti di calcolo analizzati nell'ottica della simulazione dei sistemi di controllo della luce artificiale

Software LIGHTSWITCH 2002	MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI	
	in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA	in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti
INPUT: Potenza specifica totale installata (W/m ²); tempo di ritardo del sensore di occupazione; orario di inizio e fine dell'attività; interazione dell'utente con i sistemi di controllo della luce artificiale e dei sistemi di schermatura; illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta (lux); valori di potenza parassita di stand-by per il sistema di controllo e i reattori degli apparecchi.	on/off manuale	on/off manuale
	regolazione (dimm) automatica in funzione della luce naturale	auto off
		auto on/off
	auto dimm – auto off auto on/off – auto dimm	
OUTPUT: fabbisogno annuo di energia elettrica per illuminazione (kWh/m ² anno), Autonomia di Luce diurna Annuale, Fattore di luce diurna		

Software DAYSIM	MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI	
	in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA	in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti
INPUT: Potenza specifica totale installata (W/m ²); tempo di ritardo del sensore di occupazione; orario di inizio e fine dell'attività; interazione dell'utente con i sistemi di controllo della luce artificiale e dei sistemi di schermatura; illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta (lux); valori di potenza parassita di stand-by per il sistema di controllo e i reattori degli apparecchi.	on/off manuale	on/off manuale
	regolazione (dimm) automatico in funzione della luce naturale	auto off
		auto on/off
	auto dimm – auto off auto on/off – auto dimm	
OUTPUT: fabbisogno annuo di energia elettrica per illuminazione (kWh/m ² anno), Autonomia di Luce Diurna Annuale, Fattore di luce diurna		

Software ADELIN	MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI	
	in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA	in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti
INPUT: Potenza totale installata per l'illuminazione (W); orario di inizio e fine attività; numero di giorni lavorativi per settimana; illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta	on/off manuale	
	auto on/off (in funzione della luce diurna)	
	multistep on/off (2 steps)	
	multistep on/off (3 steps)	
	multistep on/off (4 steps)	
	regolazione continua ideale	
OUTPUT: energia totale risparmiata (kWh/anno e kWh/mese), energia totale consumata (kWh/anno e kWh/mese), ore totali di accensione (h/anno), tempo di utilizzo della luce naturale (%), Fattore di luce diurna, Illuminamento naturale		

Software ENERGY PLUS	MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI	
	in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA	in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti
INPUT: Potenza totale installata per l'illuminazione (W); orario di inizio e fine attività; numero di giorni lavorativi per settimana; illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta (lux);	regolazione continua ideale	
	regolazione multi steps senza off (max 4 steps)	
	auto dimm - auto off (in funzione della luce naturale	
OUTPUT: energia totale consumata, Potenza totale installata per l'illuminazione, livelli di illuminazione naturale		

Standard UNI EN 15193:2008	MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI	
	in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA	in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti
Metodo rapido	on/off manuale regolazione (dimm) automatica in funzione della luce naturale	on/off manuale controllo automatico
Metodo dettagliato INPUT: Potenza totale installata (W), Potenza parassita (W)	on/off manuale regolazione (dimm) automatica in funzione della luce naturale	on/off manuale on/off manuale + additional automatic sweeping extinction signal auto on/ dimm (off dopo 5 minuti) auto on/ auto off (off dopo 15 minuti) manual on/ dimm (off dopo 15 minuti) manual on/ auto off (off dopo 15 minuti)
OUTPUT: LENI (lighting energy numeric indicator) (kWh/m ² anno)		

Maggiori dettagli sulla material sono reperibili in [3] e [4], in particolare in [3] è reperibile una applicazione della normativa UNI EN 15193:2008 al caso di un edificio di riferimento. Sono stati inoltre valutati gli aspetti relativi all'influenza delle caratteristiche architettoniche degli edifici sui fabbisogni di energia elettrica per l'illuminazione ([3] pag. 19 e [4] pag. 158).

3.5.4 Verifica dell'attendibilità delle simulazioni

Per testare le principali differenze tra i programmi e le loro caratteristiche peculiari, sono state fatte delle simulazioni con i programmi Radiance, Lightscape e Relux per due differenti tipi di ambiente assegnando alla rappresentazione numerica dei risultati nei vari programmi la stessa scala di valori in modo tale da poter confrontare i risultati. Si sono analizzati un ambiente tipo e un ambiente reale, nella fattispecie un ufficio (per il quale è stato possibile mettere a confronto tra loro oltre i risultati delle simulazioni dei vari programmi, anche quelli delle misurazioni effettuate in ambiente). I risultati sono riportati in [4], pagg. 148 – 159.

4 Influenza delle prestazioni dell'involucro trasparente sui consumi per illuminazione e climatizzazione

4.1 Introduzione al problema

La gestione del consumo di energia per il raffrescamento estivo degli edifici è uno dei principali problemi che si avverte nei climi caldi o miti. I cambiamenti climatici che hanno investito l'intero

pianeta negli ultimi anni, con particolare riferimento agli edifici non residenziali, hanno esteso il problema del controllo del consumo di energia per il raffrescamento estivo anche alle mezze stagioni, perfino nelle zone climatiche che precedentemente non risentivano di problemi di surriscaldamento. Diverse sono le ragioni che ci hanno portato alle condizioni attuali: uso di grandi superfici finestrate, maggiori aspettative da parte dell'utente in relazione al problema del comfort termico, aspetti relativi ai problemi del surriscaldamento del pianeta. Le strategie di controllo solare rappresentano le risposte atte a fronteggiare la prima delle ragioni di cui sopra.

I sistemi schermanti applicati sulle superfici vetrate riducono il fabbisogno energetico necessario per il raffrescamento e, più in generale, la richiesta energetica degli edifici, in particolare quelli commerciali, caratterizzati dalla presenza di grandi superfici finestrate.

Questi componenti quindi, possono migliorare le condizioni di comfort termico negli edifici sprovvisti di impianti di raffrescamento, riducendo così il rischio di surriscaldamento.

In commercio si trovano molti prodotti le cui prestazioni dipendono da diverse condizioni tra cui: tipo di schermatura (veneziane a geometria piana, inclinata e etc.), posizione rispetto alla finestra (interna, esterna o all'interno dell'intercapedine della vetrata isolante), proprietà ottiche degli elementi schermanti, strategie di controllo per gli elementi mobili.

Queste soluzioni danno un risultato buono sul bilancio energetico globale dell'edificio, ma la loro applicazione modifica anche le condizioni di illuminamento dell'ambiente confinato poiché la quantità della luce che passa attraverso le finestre viene ridotta. Per compensare questo effetto, inevitabilmente aumenteranno le ore in cui la luce artificiale dovrà essere accesa.

Il progetto dell'involucro trasparente deve essere, di conseguenza, accurato per ottimizzare al meglio le prestazioni termiche e luminose dell'ambiente costruito. Particolare attenzione deve essere posta alle caratteristiche di riflessione/trasmissione della radiazione solare che raggiungono le facciate dell'edificio. La riflessione della radiazione solare, ed in particolare il comportamento dei materiali nel campo del visibile, sono parametri importanti per valutare il controllo della luce prodotta dai sistemi schermanti.

Anche la conoscenza delle modalità di riflessione dei materiali semitrasparenti utilizzati, e più precisamente dei valori delle aliquote di energia che vengono riflesse rispettivamente in modo speculare e/o diffuso, sono parametri importanti, che ci consentono di poter direzionare la radiazione solare nelle zone più profonde dell'edificio, così da migliorarne i livelli di illuminamento. Questo studio è finalizzato alla valutazione dell'integrazione energetica e luminosa di veneziane posizionate all'interno dell'intercapedine di vetrate isolanti. L'analisi verrà condotta tramite misurazioni sperimentali e simulazioni numeriche dinamiche.

La posizione del sistema schermante scelto è energeticamente meno efficiente rispetto a quella esterna, soprattutto nel del periodo estivo, ma la maggiore flessibilità della configurazione geometrica dovuta alla mobilità della veneziana, restituisce maggiori vantaggi sui sistemi di controllo, permettendo all'utente di modulare la trasparenza, così da ridurre il surriscaldamento e prevenire l'abbagliamento.

Questo è un tema decisivo nella scelta dei sistemi per la protezione solare: gli schermi esterni hanno ottime prestazioni energetiche, ma sono quasi sempre fissi, ostruiscono la vista verso l'esterno e la loro configurazione usuale richiede sistemi schermanti addizionali per evitare gli effetti di abbagliamento, quando l'altezza solare è bassa. Collocare la veneziana nell'intercapedine della vetrata isolante invece, riduce di qualche punto percentuale le prestazioni energetiche ma, al contrario, incrementa il benessere visivo ed il comfort termico dell'utente.

L'analisi è stata condotta su un ambiente campione, scelto in base alla tipologia degli edifici adibiti ad ufficio più ricorrente in Italia, caratterizzati da uno sviluppo lineare e da una sezione trasversale che evidenzia due zone con orientamenti opposti, divisi da un corridoio, vedi Fig. 32. La forma della stanza tipo è un parallelepipedo le cui dimensioni sono: 5.90 m di lunghezza, 3.60 m di larghezza, 2.70 m di altezza. L'unica finestra è posizionata sul lato corto dell'edificio ed è orientata a sud in un caso e a nord nell'altro; il primo caso è quello in cui il sistema schermante a veneziane restituisce i migliori risultati. Le dimensioni della finestra sono: 2.80 m di larghezza, 1.50 m di altezza per una superficie complessiva di 4.20 m², mentre il telaio incide per il 20% sull'area totale del serramento.

Il rapporto tra le superfici del vetro ed il pavimento è pari al 16% nel pieno rispetto delle leggi nazionali. Il sistema vetrato studiato è formato da due vetri chiari, assemblati in modo da costituire

una vetrata isolante, all'interno dell'intercapedine così formata viene alloggiata la veneziana schermante. Il telaio della finestra è di alluminio con una riflessione luminosa pari al 40%. La riflessione luminosa dei muri, pavimenti, soffitti e terreno esterno sono pari rispettivamente a 52%, 30%, 78% e 18%, inoltre le superfici di detti elementi sono considerate perfettamente diffondenti.

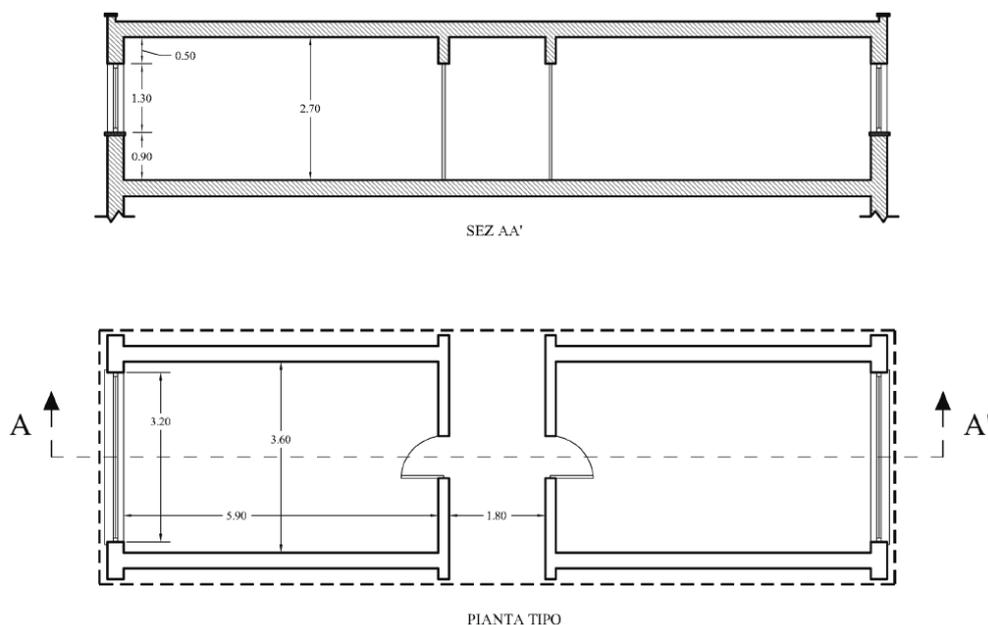


Fig. 32 – Sezione e pianta della porzione di edificio di riferimento.

La lamella della veneziana è baricentrica rispetto all'intercapedine della vetrata isolante ed è ad una distanza dai vetri di 15 mm su entrambi i lati.

I valori di riflettanza delle lamelle disponibili sul mercato sono variegati, ai fini delle valutazioni sono stati presi come riferimento 3 valori: 20%, 50% 80% . Questi sistemi sono di seguito indicati rispettivamente con: L1, L2 ed L3. Queste lamelle sono state considerate perfettamente diffondenti, in più, lo studio, si è esteso ad una quarta tipologia di lamella con riflessione totale pari a 80%, con le due componenti di riflessione diffusa e speculare rispettivamente di 10% e 90%, di seguito si indica questo componente con L4. Le lamelle coprono l'intera finestra ed hanno una larghezza ed un passo di 25 mm.

4.2 Analisi illuminotecnica

L'influenza dei sistemi schermanti usati è stata controllata anche attraverso numerose simulazioni dinamiche eseguite su Desktop RADIANCE, uno strumento per il calcolo illuminotecnico basato sul modello MonteCarlo back word raytracing. Il software restituisce valori molto accurati sia dell'illuminamento che della luminanza indoor. Il calcolo può essere eseguito con qualsiasi condizione di cielo, in ambienti con geometria complessa, utilizzando sia sorgenti di luce naturale che artificiale. L'ambiente è stato modellato attraverso un CAD compatibile con lo stesso codice.

Una volta inserito il modello tridimensionale, ad ogni entità geometrica, rappresentante un componente edilizio, è stata attribuita la proprietà specifica del materiale di cui è composta, in termini di trasmittanza, riflettanza, scabrosità e modalità di riflessione: diffusa e/o diretta. Numerose simulazioni sono state eseguite per poter valutare l'influenza delle lamelle, con diverse proprietà fisiche, sulla distribuzione dell'illuminamento interno. Le immagini riportate in figura restituiscono, attraverso le curve isolux, i valori dei livelli di illuminamento dell'ambiente sulle superfici della stanza. Nelle diverse simulazioni è stato considerato il tipo di cielo standard CIE, con torbidità pari a 2, corrispondente ad un cielo sereno.

In queste condizioni la radiazione solare diretta non riesce a penetrare nell'ambiente interno. La geometria delle lamelle utilizzate consente di riflettere la radiazione solare nelle vicinanze della finestra, all'interno della stanza, senza tuttavia penetrare in profondità. Il calcolo è stato eseguito con riferimento alla data del 21 marzo alle ore 12.00 alla latitudine in cui si trova Roma.

I principali risultati della simulazione sono presentati con alcuni rendering per le 4 configurazioni scelte in Fig. 33. Sulle immagini sono plottate le linee isolux da cui emergono:
 La lamella tipo L1 restituisce prestazioni mediocri. Soltanto una piccola area sui muri e sul soffitto vicino alla finestra raggiunge livelli di illuminamento di 900 lux. Nella parte del soffitto più lontana dalla finestra, i livelli di illuminamento raggiungono valori inferiori ai 200 lux.

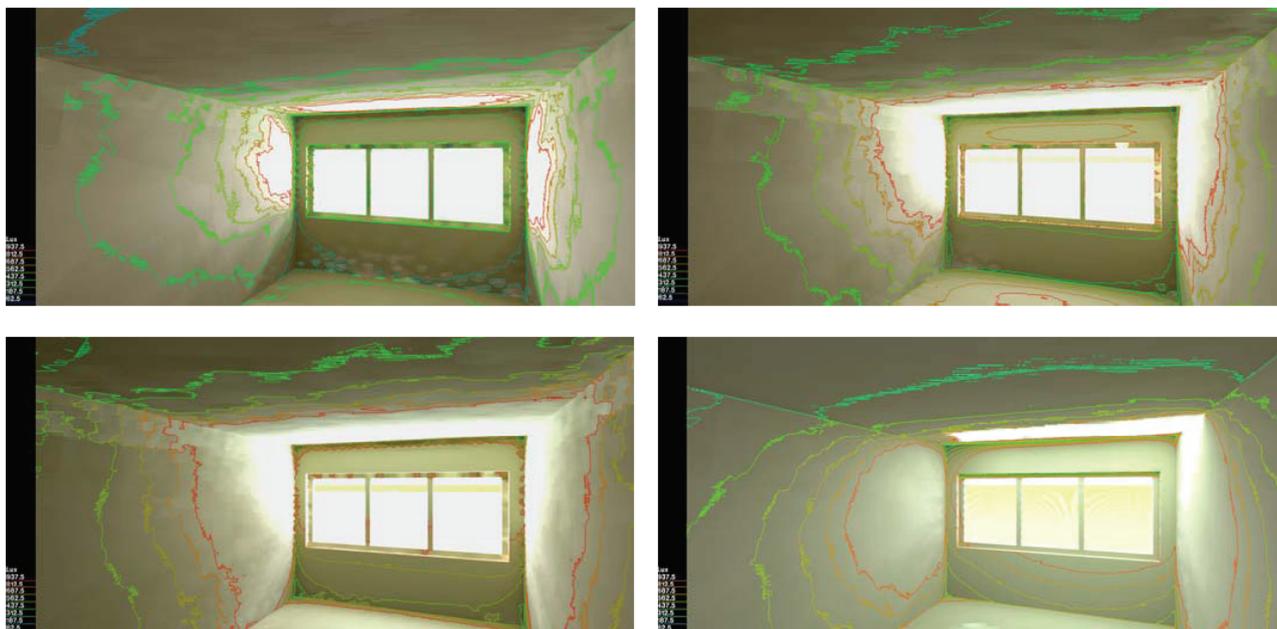


Fig. 33 – Rendering del daylighting nelle simulazioni di riferimento.

Con l'applicazione della lamella tipo L2, aumenta la superficie del pavimento sulla quale l'illuminamento raggiunge valori di 900 lux. Il soffitto, vicino alla finestra, raggiunge livelli di illuminamento molto alti, rimanendo in ogni punto della stanza superiore ai 400 lux, in questo modo lavora effettivamente come sorgente di luce secondaria.

Con l'applicazione della lamella tipo L3, il cui coefficiente di riflessione raggiunge il valore dell'80%, il soffitto viene illuminato per metà della sua superficie con valori maggiori di 900 lux. In nessun punto della stanza i valori dell'illuminamento scendono sotto i 500 lux. La stanza risulta quindi ben illuminata con luce naturale, tuttavia verranno successivamente eseguite ulteriori simulazioni, per valutare, su tale configurazione, la congruenza dei valori di luminanza e gli effetti di abbagliamento che ne derivano. Con L4 si identifica un particolare sistema di lamelle schermanti, il cui valore di riflessione speculare (90%), lo fa avvicinare al comportamento degli specchi.

Se confrontiamo le due tipologie studiate, L3 ed L4, ci accorgiamo che i diversi comportamenti della riflessione delle rispettive lamelle conferiscono all'ambiente differenti distribuzioni spaziali della luce e diversi livelli di illuminamento. Nell'ultimo caso valutato, l'area con livelli di illuminamento superiori a 900 lux si riduce, ma i livelli di illuminamento nelle zone più profonde e lontane dalla finestra rimangono leggermente al di sotto di 500 lux.

Alcuni sistemi schermanti hanno un sistema di controllo automatico, in questo modo possono modificare la loro inclinazione, così da poter redirezionare dinamicamente la luce in zone dove risulta carente.

Dall'analisi delle simulazioni risulta che il serramento equipaggiato con le lamelle L3 garantisce una maggior penetrazione della luce naturale nell'ambiente, garantendo un buon livello di illuminazione anche lontano dalla finestra, mentre quello equipaggiato con lamelle tipo L4 necessita di modificare l'orientamento delle stesse per poter direzionare la luce nelle zone più profonde. Contestualmente però le stesse riflettono una gran quantità di luce verso l'alto, evitando eccessivi valori di illuminamento nelle vicinanze della superficie vetrata, evitando così spiacevoli effetti dovuti all'abbagliamento.

Il consumo di energia elettrica dovuto all'uso di luce artificiale è stato calcolato per un anno tipo con il software DAYSIM (Tutorial on the Use of Daysim Simulation for Sustainable Design, 2006),

sviluppato per calcolare i profili di illuminamento nell'intero anno, una volta definito il modello tridimensionale dell'edificio e la potenza delle lampade installate.

Il codice di simulazione è basato sul modello MonteCarlo back word raytracing, in combinazione con gli algoritmi di RADIANCE in cui vengono implementati i *daylight coefficient*. Con questo software è quindi possibile calcolare in modo dinamico i profili di luminanza e di illuminamento.

Il *daylight coefficient* è definito tramite il modello di Tregenza, per calcolare i livelli di illuminamento indoor sotto condizioni di cielo arbitrarie. Il metodo è basato sulla suddivisione della volta celeste in un numero discreto di superfici e sul calcolo dell'illuminamento su punti specifici scelti all'interno dell'edificio. I valori restituiti derivano dalla somma dei contributi dovuti ad ogni porzione di cielo precedentemente discretizzata. Nel seguito si lascerà tale parametro con il termine inglese, per evitare con il fattore di luce diurna, che è un parametro profondamente differente.

Il codice di simulazione dinamica DAYSIM, legge un file climatico esterno e, usando il modello di cielo di Perez, estrapola i valori di luminanza della volta celeste calcolati su un time step di 5 minuti.

Il modello di cielo di Perez supera le limitazioni legate al modello di cielo coperto, consentendo di eseguire il calcolo considerando livelli di luminanza dinamici, come succede nella realtà. Eseguire la simulazione in condizioni di cielo sereno, rende possibile stimare l'influenza dell'orientamento delle pareti verticali, che diversamente non potrebbero essere valutate.

I profili così ottenuti, sono poi legati al comportamento tipico dell'utente, basato su un modello stocastico, al fine di poter calcolare gli indicatori delle prestazioni del daylighting del sistema definito.

I principali indicatori sono: disponibilità annua di luce naturale, numero delle ore con livelli di illuminamento inferiori ai valori fissati, consumo di energia dovuto all'uso di luce artificiale secondo le strategie di controllo predisposte per i sistemi di oscuramento e potenza delle luci installate. Un importante funzione implementata sul software di calcolo è la valutazione del comportamento umano all'interno dell'ambiente considerando, sia il modo in cui le persone interagiscono con gli elementi schermanti per proteggersi dall'abbagliamento, sia il modo in cui usano le luci artificiali.

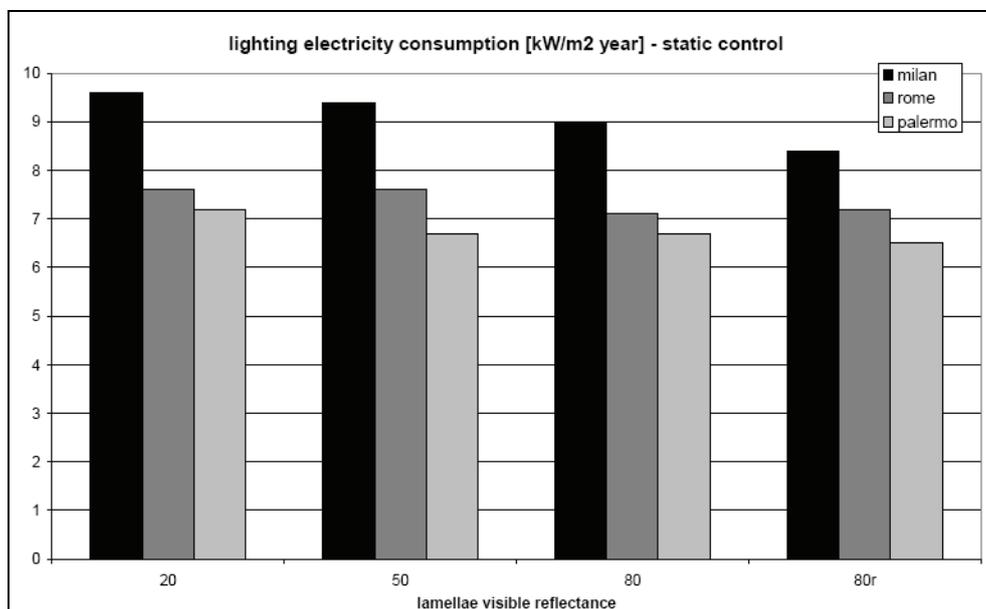


Fig. 34 – Consumi elettrici con controllo statico delle veneziane.

A tal proposito oltre al controllo manuale delle lampade sono implementati controlli automatici. Il codice di simulazione, per poter definire il profilo di comportamento dell'uomo, usa sia dati stocastici sia dati provenienti dalla letteratura.

La simulazione dell'ufficio considerato, eseguita con DAYSIM, ha consentito di calcolare i *daylight coefficient* per tre località italiane e di valutare due sistemi di controllo differenti: uno statico (la veneziana è fissa sempre abbassata), l'altro dinamico complesso (l'utente manovra la veneziana in base al proprio comfort visivo, per proteggersi dall'abbagliamento).

È stato previsto che anche la luce artificiale fosse manovrata dall'utente. La potenza delle lampade installata è pari ad 11 W/m². L'ambiente è occupato dal lunedì al venerdì dalle 8.00 alle 17.00 e gli utenti lasciano i posti di lavoro tre volte durante il giorno (30 minuti nella mattina, 1 ora a mezzogiorno, e 30 min nel pomeriggio).

Due sono le strategie di controllo previste sull'oscuramento: statica (l'utente tiene parzialmente la veneziana chiusa per evitare l'abbagliamento), e dinamica (l'utente muove la veneziana chiudendola quando si presentano le condizioni di abbagliamento e ritraendola quando tali condizioni vengono meno). L'output del calcolo esprime il consumo elettrico in KW/m² per anno necessario a compensare la mancanza di luce naturale per garantire i livelli di illuminamento prefissati. Il parametro di riferimento è il valore dell'illuminamento su di un ipotetico luxmetro posizionato a due metri dalla finestra in posizione centrale. I risultati, espressi in kwh/m² per anno, sono presentati nella Fig. 34 e Fig. 35

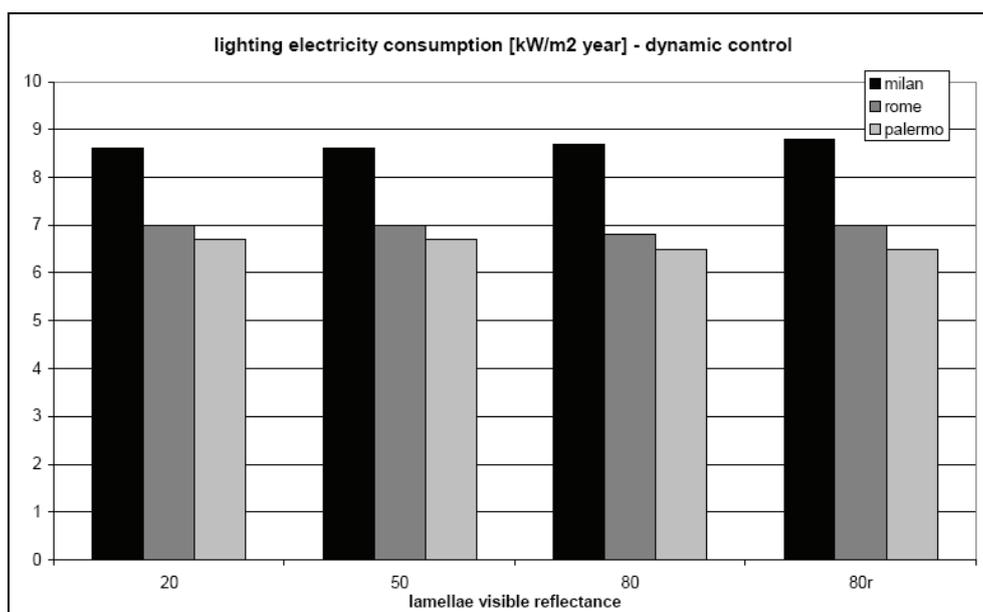


Fig. 35 - Consumi elettrici con controllo dinamico delle veneziane.

Il sistema dinamico raggiunge prestazioni superiori di quello statico in ogni località e per ogni sistema schermante considerato ad eccezione delle lamelle speculari nella città di Milano. L'ammontare di energia necessaria a mantenere le condizioni di benessere visivo è, in generale, bassa, inferiore a 10 KW/m², e l'energia risparmiata è tra 0 e 10%. I migliori risultati si ottengono a Milano, i peggiori a Palermo.

Questi risultati sono in linea con le aspettative: minore è la disponibilità di luce naturale, maggiori sono i benefici derivanti dalle strategie dei sistemi di controllo. È da notare che il consumo di energia incrementa rispetto alle finestre prive di sistemi schermanti nell'ordine del 5%, eccetto nel caso delle lamelle con il coefficiente di riflessione pari al 20% installate nell'ufficio di Milano, dove l'energia incrementa fino al 12%.

Questo risultato è poi influenzato dalla posizione del luxmetro all'interno della stanza. Due metri dalla finestra è una buona posizione per ottenere vantaggio dalla luce naturale, ma lo studio in oggetto non prevede l'analisi dell'illuminazione in posizioni più interne e quindi più distanti da essa. Questa semplificazione è considerata accettabile per gli edifici adibiti ad uffici, dove le postazioni di lavoro sono generalmente vicine alle finestre, postazioni che determinano l'accensione e lo spegnimento della luce.

4.3 Analisi energetica

TRNSYS (Solar Energy Laboratory University of Wisconsin Madison, 2004) è uno degli strumenti più conosciuti e usati per l'analisi dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici. Il codice opera principalmente facendo un bilancio termico orario della edificio considerato, usando il metodo z-transform. La riconosciuta validità di questo strumento rende il confronto con altri software poco significativo.

È stato dunque scelto di utilizzare questo strumento sia per la riconosciuta affidabilità, sia per la possibilità di elaborare i contributi del daylighting e del calcolo per illuminazione artificiale, provenienti dalle analisi precedenti.

Il TRNSYS opera tramite l'interazione di diverse subroutine (TYPE) che esistono in libreria, ma che possono, all'occorrenza, essere implementate.

In particolare, per la nostra simulazione sono state utilizzate le seguenti TYPES:

- La TYPE 54 che legge ed elabora il file dati meteo contenente i dati climatici della zona in cui è ubicato l'edificio da simulare. Nel nostro caso sono stati usati dati relativi agli standard nazionali. I valori medi mensili di temperatura, umidità relativa ed irraggiamento solare sul piano orizzontale, forniti come input alla TYPE 54 sono stati elaborati e trasformati in valori orari.
- La TYPE 16 elabora i dati di irraggiamento solare forniti dalla TYPE 54 interpolandoli, in base a questi parametri viene poi calcolato l'ammontare della radiazione solare incidente su una generica superficie di cui viene fornito l'angolo azimutale e zenitale. È possibile utilizzare diversi algoritmi per il calcolo delle radiazioni su superfici inclinate, come Hay e Davies, Perez, Reindl, ecc.
- La TYPE 69 determina la temperatura fittizia del cielo, questa è usata dalla TYPE 56 per calcolare l'ammontare della radiazione infrarossa ceduta alla volta celeste, a causa della cessione radiativa notturna, dalle superfici degli edifici a contatto con l'esterno. Questa TYPE valuta la nuvolosità del cielo in funzione della temperatura a bulbo secco e alla temperatura di rugiada fornita dalla TYPE 33.
- La TYPE 33 richiede come input la temperatura a bulbo secco e l'umidità relativa dell'ambiente esterno e restituisce la temperatura di rugiada richiesta dalla TYPE 69.
- La TYPE 56 simula il comportamento termico di ogni zona in cui è suddiviso l'edificio, determinando i valori dei parametri fisici richiesti.
- La TYPE 9 viene utilizzata al fine di leggere un file dati ad intervalli regolari per trasferirli come input ad altre TYPES. È possibile anche convertire in altre unità di misura i valori letti, tramite fattori moltiplicativi o additivi. La TYPE 9 è anche in grado di interpolare linearmente i valori letti in modo sequenziale. In questo caso è stata usata per leggere i valori generati da DAYSIM.
- La TYPE 2 è in grado di eseguire un controllo sui dati di input restituendo valori di 1 o 0 (on/off). In questo caso legge i valori dal profilo di occupazione delle persone fornito da DAYSIM trasformandoli in presenze o assenze.
- EQUATION consente di eseguire i calcoli di equazioni ulteriormente implementate.
- La TYPE 25 è stata usata per salvare i dati della simulazione elaborati da TRNSYS ad intervalli orari su un file testo, così da poterli stampare e valutare.
- La TYPE 65 consente di visualizzare in tempo reale l'andamento delle variabili selezionate. La sua attivazione è molto importante perché consente all'utente di stimare istantaneamente se il sistema descritto ed in via di simulazione risponde alle aspettative o se occorre intervenire per migliorare l'accuratezza della soluzione.

I valori del consumo energetico elaborati con DAYSIM tengono in considerazione il comportamento dell'utente di tipo "attivo" posizionato a 2 metri dalla finestra. In questo caso le veneziane sono totalmente abbassate quando l'irraggiamento sul piano di lavoro supera i 50 W/m² così da evitare gli effetti dell'abbagliamento. Le veneziane sono totalmente riaperte quando l'irraggiamento torna al di sotto valore precedente. Il comportamento dinamico dell'utente viene registrato da DAYSIM su un file. TRNSYS è in grado di leggerlo e di calcolare conseguentemente l'effetto termico dovuto ai sistemi schermanti manovrati dall'utente. In questo caso il fabbisogno energetico è vicino allo zero. Per le veneziane è stato scelto un valore di riflessione luminosa pari al 50%, tale condizione ha influenza solo sul consumo elettrico della luce.

L'output di DaySim viene letto da TRNSYS come coefficiente di schermatura sulla finestra considerata, ma i bilanci energetici vengono calcolati separatamente secondo gli algoritmi del codice stesso.

Il modello dell'involucro considerato è basato sulle seguenti condizioni:

- sono state valutate due stanze che presentano una sola parete esterna orientata rispettivamente la prima a sud, la seconda a nord, le altre cinque pareti sono state considerate adiabatiche in quanto pensate adiacenti ad ambienti aventi la stessa temperatura della zona.

- Le proprietà termiche dell'involucro (trasmissione e inerzia) sono state definite secondo quanto previsto dalle leggi italiane (D.lgs. n.192/05 così come modificato dal D.lgs. n. 311/06).
- I valori di trasmissione termica delle pareti sono 0.32, 0.35, 0.42 W/m² K rispettivamente per Milano, Roma e Palermo. I componenti trasparenti scelti sono composti da telaio in alluminio a taglio termico con trasmissione pari a 2.9 W/m² K, e da una vetrata isolante standard in accordo con quanto indicato al precedente paragrafo.
- I valori di set point considerati relativi a riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e infiltrazione, sono rispettivamente: 20°C, 25°C e 0.3 1/h.
- Ai fini del calcolo della potenza termica e frigorifera dell'impianto, è stato previsto nel codice di simulazione un valore di potenza illimitato così da valutare, in modo accurato, il fabbisogno massimo di energia netta oraria necessaria al mantenimento delle condizioni di progetto. L'efficienza del sistema (generazione, distribuzione, emissione e controllo) è stata definita tramite un indicatore stagionale, in accordo a quanto previsto dagli standard nazionali: 0.8 per il riscaldamento, 0.95 per il raffrescamento.

Tab. 12 - Principali dati climatici delle zone climatiche.

Month	Air temperature [°]			Solar radiation [W/m ²]		
	Rome	Milan	Palermo	Rome	Milan	Palermo
Jan	7.99	1.63	12.78	28463	9603	27204
Feb	8.77	3.17	12.98	37800	17913	41346
Mar	10.76	7.22	13.76	59517	37718	74659
Apr	13.23	10.51	15.56	82508	64258	90609
May	17.36	15.61	18.76	102104	73393	112447
Jun	20.98	19.19	22.47	117076	87310	136727
Jul	24.10	22.35	25.64	131534	92911	133743
Aug	23.96	21.77	26.25	113773	86582	113540
Sep	20.00	17.54	22.91	83427	55693	87088
Oct	16.91	12.31	20.71	53947	27966	63755
Nov	12.11	5.99	16.31	31556	13169	36061
Dec	9.35	2.16	14.11	25846	8445	28167

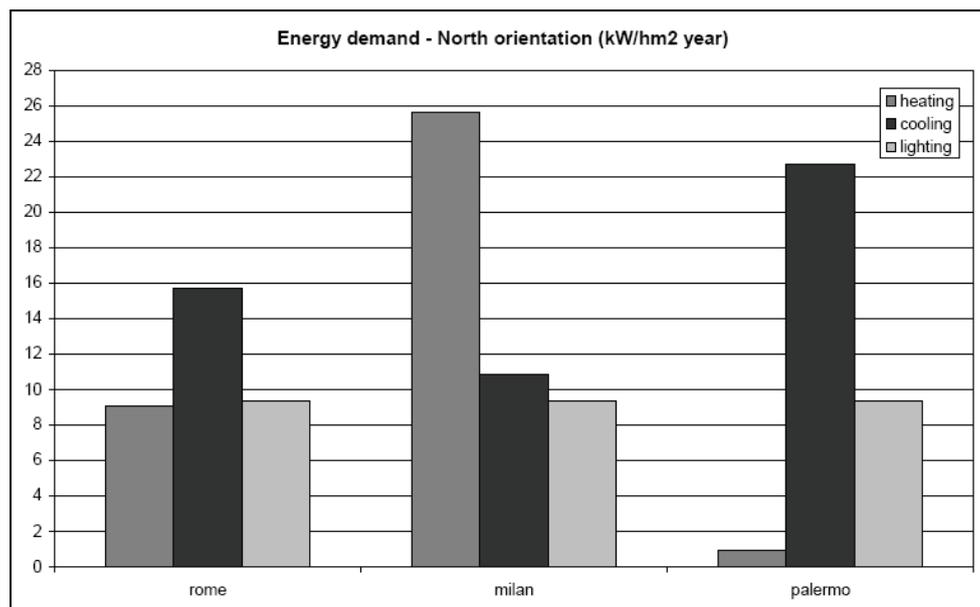


Fig. 36 – Carichi termici ed elettrici per l'ambiente esposto a nord.

I dati climatici, definiti nella Tab. 12 si riferiscono alla temperatura media mensile ed alla radiazione solare globale media sul piano orizzontale. Tali indicazioni chiariscono le differenti condizioni

climatiche delle zone considerate. I risultati della simulazione sono illustrati nelle Fig. 36 e Fig. 37 sia in relazione alle località considerate sia agli orientamenti previsti. Il consumo di energia primaria per le varie configurazioni degli edifici considerati sono presentati in Tab. 13 e Fig. 38.

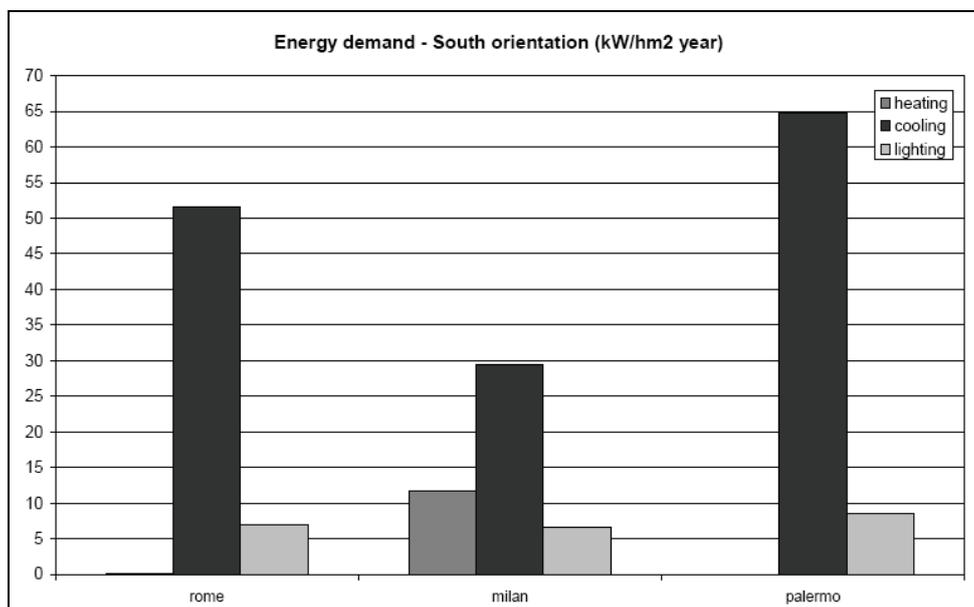


Fig. 37 – Carichi termici ed elettrici per l’ambiente esposto a sud.

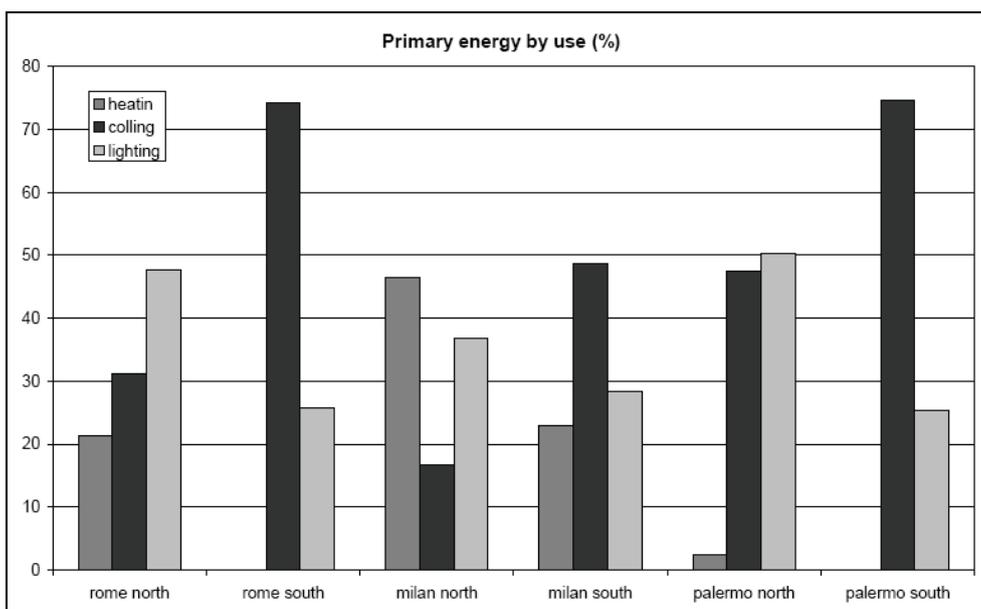


Fig. 38 – Carichi termici ed elettrici per l’ambiente esposto a sud.

Il fabbisogno di energia elettrica necessario per l’illuminazione, nelle città di Roma e Palermo, è più alto rispetto a quello necessario per il riscaldamento, mentre il fabbisogno energetico per il raffrescamento si mantiene sempre su valori maggiori. Una predominanza del fabbisogno necessario per il riscaldamento è registrata a Milano, dove il fabbisogno energetico per l’illuminazione è più basso del raffrescamento. L’energia necessaria a garantire il raffrescamento è predominante in ogni condizione climatica relativamente agli ambienti con orientamento della parete esterna a sud, per le stesse il fabbisogno energetico invernale è pari a zero. A Milano il fabbisogno energetico per il riscaldamento supera quello necessario all’illuminazione.

Milano registra la peggiore prestazione relativa al fabbisogno energetico invernale nella stanza con la parete esterna orientata a nord, concordemente alla sovrapposizione degli effetti dovuti all’orientamento più penalizzato ed ai dati climatici con temperature ed irraggiamenti medi mensili più bassi.

I consumi energetici più alti per il raffrescamento sono invece registrati a Palermo e Roma nelle stanze orientate a sud. Risultati interessanti emergono dall'analisi dell'energia primaria in termini di risultati relativi. Il consumo di energia primaria per l'illuminazione è sempre più alto del 25%, fino a raggiungere il sistema schermante considerato ad eccezione delle lamelle speculari nella città di Milano.

Tab. 13– Energia primaria totale.

Locality	Primary energy (kWh/m ² year)	
	North	South
Rome	53.1	73.2
Milan	68.7	63.7
Palermo	50.3	91.4

4.4 Potenzialità e criticità dell'analisi

L'efficienza degli edifici non residenziali, nella la stagione fredda, è strettamente connessa alle prestazioni del loro involucro. La protezione solare è una strategia vincente nel periodo estivo, ma i sistemi schermanti non possono essere progettati con il solo scopo di ridurre il fabbisogno energetico, anche il comfort ed il controllo visivo sono aspetti importanti per migliorare la vivibilità degli ambienti. Il progetto di una facciata è quindi connesso alle condizioni climatiche, alla forma ed orientamento dell'edificio, ed alle esigenze dell'utente. Lo scopo principale è quello di soddisfare entrambi gli aspetti: da una parte il comfort di chi vive ed occupa l'edificio, dall'altra il risparmio energetico dell'edificio stesso.

Alcuni strumenti di calcolo moderni ci consentono di fare analisi dettagliate e, soprattutto, integrate, fornendo importanti suggerimenti per un progettazione corretta ed efficace dell'edificio.

In realtà analisi di questo tipo sono complesse, non casualmente pochi strumenti commerciali sono in grado di eseguirle e, spesso con diverse limitazioni. Il caso esaminato ne è un tipico esempio ed alcuni problemi rimangono irrisolti:

- il comportamento umano è stato tradotto in analisi statistiche, questo implica un comfort medio, che evidentemente con equivale al comfort di tutti gli utenti che si trovano a vivere in un dato ambiente.
- la combinazione e l'uso di software differenti, che, oltretutto non sempre dialogano tra di loro, è una restrizione che non permette di eseguire analisi complete e dettagliate. Questo implica una ulteriore complicazione nella definizione dei progetti da eseguire e limita la possibilità delle scelte progettuali stesse.
- molte configurazioni e strategie di controllo non sono ancora implementate. Questo è un problema inevitabile a causa della mole di dati da gestire.
- l'integrazione di diversi software è spesso molto complessa e incompleta. Nello sviluppo delle attività saranno analizzate altre possibilità per verificare la disponibilità di strumenti più maturi ed user-friendly

Occorre tuttavia riconoscere a questi software la capacità di supportare architetti, ingegneri, disegnatori e ricercatori guidandoli verso scelte ottimali che possono migliorare i loro progetti.

L'ultima considerazione è relativa alle limitate informazioni relative ai sistemi schermanti che vengono comunque messi sul mercato senza fornire dati tecnici adeguati.

Lo studio dimostra l'importanza della qualità dati di input del sistema semi-trasparente per eseguire studi dettagliati.

5 Casi Applicativi e Casi studio

Una serie di applicazioni e di casi di studio sono stati sviluppati per edifici scolastici [3] pag. 25, [4] pag.167 e uffici [3] pag. 30. Si riporta di seguito una sintesi di uno dei casi studio realizzato su una scuola di Torino.

5.1 Sistema di controllo di base in edificio scolastico

Obiettivo di questo caso studio è il confronto delle prestazioni energetiche di due impianti di illuminazione artificiale uguali per numero, tipologia di apparecchi e sorgenti luminose, ma di cui uno dotato di un sistema di controllo di base per l'integrazione della luce naturale e artificiale e l'altro con controllo solo manuale.

La sperimentazione è stata condotta in un edificio scolastico elementare, utilizzando due aule con caratteristiche architettoniche e funzionali analoghe. Il confronto è stato possibile grazie al monitoraggio, condotto nell'arco di un intero anno scolastico, dei consumi di energia elettrica relativi sia all'impianto di illuminazione artificiale tradizionale che a quello con sistema di controllo. Gli ambienti utilizzati nella sperimentazione sono due aule scolastiche adiacenti, collocate al terzo piano della scuola elementare Europea Spinelli di Torino. Entrambe presentano superfici vetrate esposte a Sud e non presentano ostruzioni esterne significative. Nella Fig. 39 è evidenziato il corpo di fabbrica in cui sono collocate le aule, la pianta del piano corrispondente e la parete dell'edificio su cui si affacciano le aule. Le due aule misurano 6,00 m di profondità per 7,50 m di larghezza, presentano un'altezza di 3,30 m; all'interno le finestre sono dotate di un sistema di schermatura costituito da una veneziana a lamelle orizzontali orientabili di colore grigio, la cui movimentazione avviene manualmente.

Il sistema di gestione e controllo installato è il QUICKTRONIC® DIM MULTI 2", della ditta OSRAM, classificabile come sistema di "base" per la gestione dell'illuminazione artificiale ad integrazione di quella naturale e/o in relazione alla presenza/assenza degli utenti. La logica di funzionamento del sistema è estremamente semplificata in quanto la centralina di comando comunica con i dispositivi distribuiti (al massimo tre sensori misti, ciascuno costituito da un fotosensore ed un sensore di occupazione) e controlla un numero massimo di 20 reattori bilampada, montati in apparecchi di illuminazione che devono essere gestiti in un unico gruppo. Il sistema è pensato per un funzionamento automatico, quindi accensione/spegnimento e regolazione del flusso luminoso sulla base dei dati di input definiti dai dispositivi attivi, ma è anche ammessa l'interazione manuale introducendo, sulla linea elettrica dell'impianto, un interruttore a rilascio per accendere/spegnere la luce. La centralina riceve i dati di input dai dispositivi distribuiti e di conseguenza regola gli apparecchi comunicando attraverso un segnale analogico 1-10V che consente di gestire i reattori elettronici dimmerabili dal 100% al 10% dell'emissione del flusso luminoso, per poi determinarne lo spegnimento per raggiungimento di soglia della luminosità e/o per assenza degli utenti. Il sistema di controllo è stato configurato in automatico per l'accensione e lo spegnimento attraverso un sensore misto occupazione più fotosensore. Il sensore è collocato a plafone, in prossimità della fila di apparecchi più distante dalla superficie vetrata, e regola contemporaneamente tutti gli apparecchi sulla base del livello di illuminamento orizzontale presente sul piano di lavoro e definito in fase di taratura del sensore. L'interruttore a rilascio, oltre ad essere utilizzabile per l'accensione e lo spegnimento degli apparecchi, è il dispositivo necessario per la taratura del fotosensore. Il cablaggio elettrico dell'impianto è realizzato in modo che la centralina alimenti il sensore misto ed i reattori elettronici degli apparecchi, mentre l'interruttore a rilascio, inserito per i motivi sopra descritti, è collegato direttamente alla linea elettrica dell'impianto in modo che, quando utilizzato, chiuda/apra il contatto elettrico regolando il passaggio della corrente che alimenta la centralina di comando e di conseguenza gli apparecchi ed il sensore misto. Una volta chiuso il circuito non si registrano di conseguenza assorbimenti parassiti di energia elettrica.

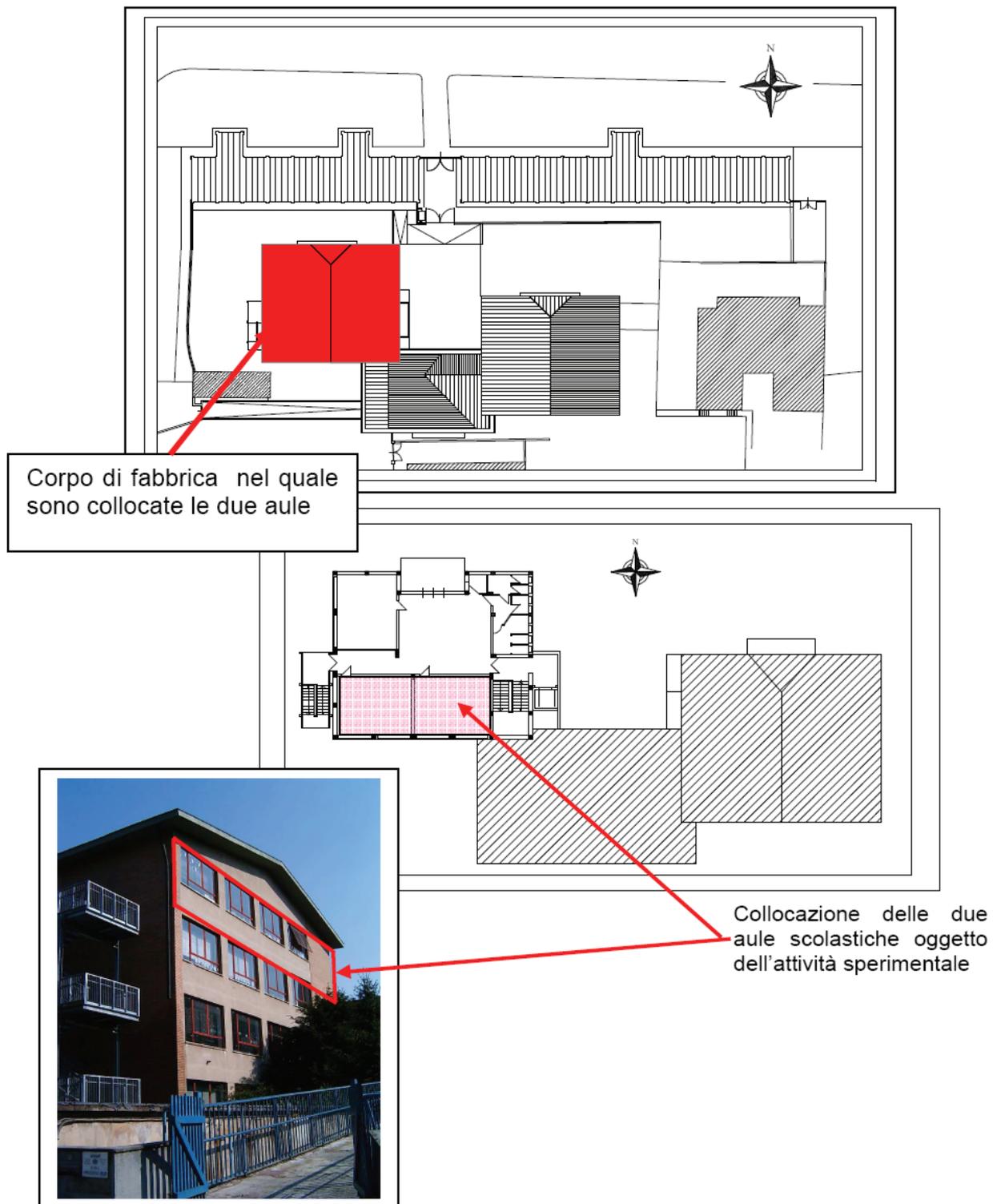


Fig. 39 – Collocazione planimetrica dell'edificio scolastico

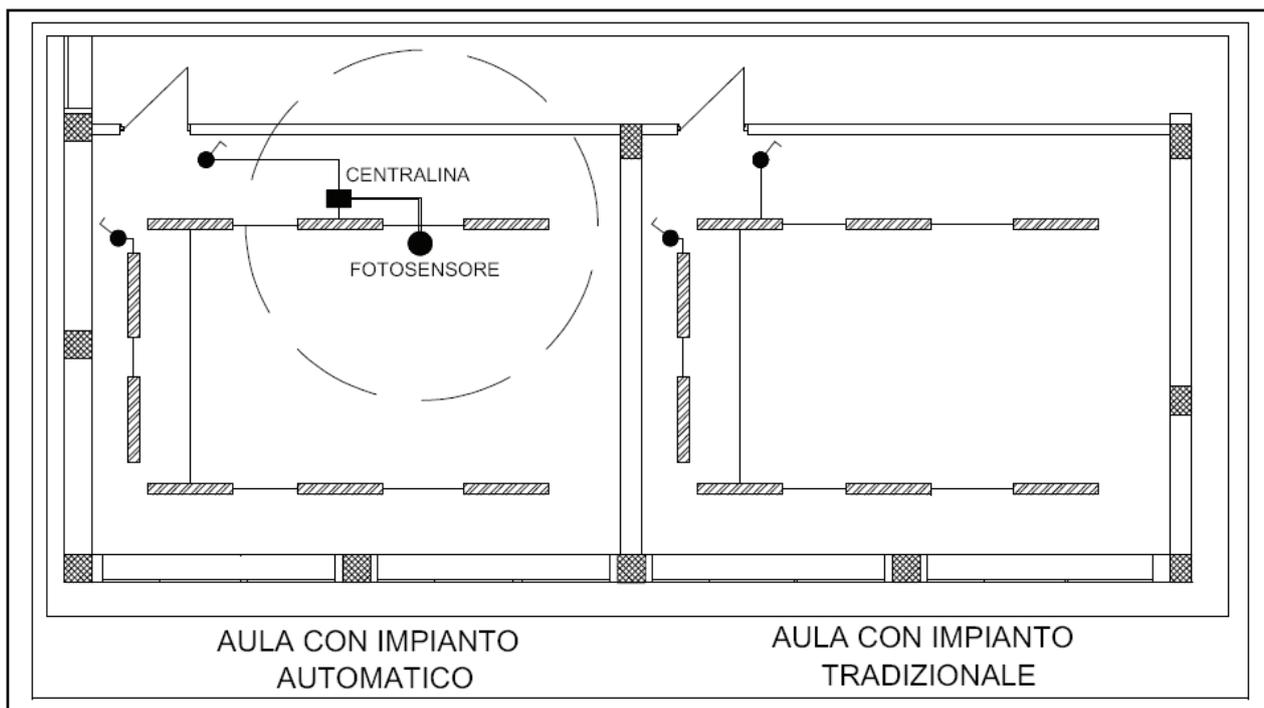


Fig. 40 - Cablaggio elettrico e di segnale delle due aule

5.1.1 Risultati

Attraverso il monitoraggio è stato possibile determinare il consumo degli impianti di illuminazione nelle due aule e di conseguenza valutare i risparmi di energia elettrica conseguibili in seguito all'adozione di un sistema di controllo di base che permette l'integrazione della luce naturale e artificiale.

I dati di consumo sono stati registrati mensilmente per un periodo che copre l'intero anno scolastico (da settembre a giugno). Non sono stati monitorati i consumi nei mesi di luglio e agosto in quanto la scuola risulta chiusa in quel periodo.

Nella Tab. 14 sono riportati i consumi mensili misurati nelle due aule ed il dato complessivo riferito all'anno (considerando pari a zero i consumi dei mesi di luglio e agosto). Nel caso dell'aula con impianto manuale, gli apparecchi sono gestiti esclusivamente mediante l'interruttore a rilascio che consente le operazioni di ON e OFF.

PERIODI DI MONITORAGGIO	IMPIANTO IN MANUALE	IMPIANTO IN AUTOMATICO
	(kWh/mese)	(kWh/mese)
settembre 2006	6	8
ottobre 2006	45	39
novembre 2006	52	29
dicembre 2006	68	37
gennaio 2007	37	25
febbraio 2007	56	39
marzo 2007	20	22
aprile 2007	25	16
maggio 2007	24	21
giugno 2007	12	11
TOTALE CONSUMI ASSORBITI (kWh/anno)	345	247

Tab. 14 - Consumi di energia elettrica per l'illuminazione artificiale

Il LENI (Lighting Energy Numerical Indicator) per le due aule risulta essere rispettivamente di 7,67 kWh/m2anno per l'aula con controllo dell'impianto esclusivamente manuale e di 5,49 kWh/m2anno per l'aula con sistema di integrazione automatica della luce naturale e artificiale. I dati monitorati sono stati successivamente elaborati per ricavare la differenza relativa tra i consumi determinati in presenza delle due diverse strategie di controllo della luce. In particolare è stato determinato un indice definito $SAVE_{LENI}$, e calcolato come:

$$SAVE_{LENI} = \frac{LENI_{auto\ dim} - LENI_{manual}}{LENI_{manual}} * 100 \quad [\%]$$

L'indice rappresenta la percentuale di incremento o riduzione dei consumi di energia elettrica per l'illuminazione dell'impianto dotato di sistema di controllo automatico ($LENI_{autodim}$) rispetto a quello con controllo esclusivamente manuale ($LENI_{manual}$). Nella Fig. 41 sono riportati i valori di $SAVE_{LENI}$ mensili e annuale.

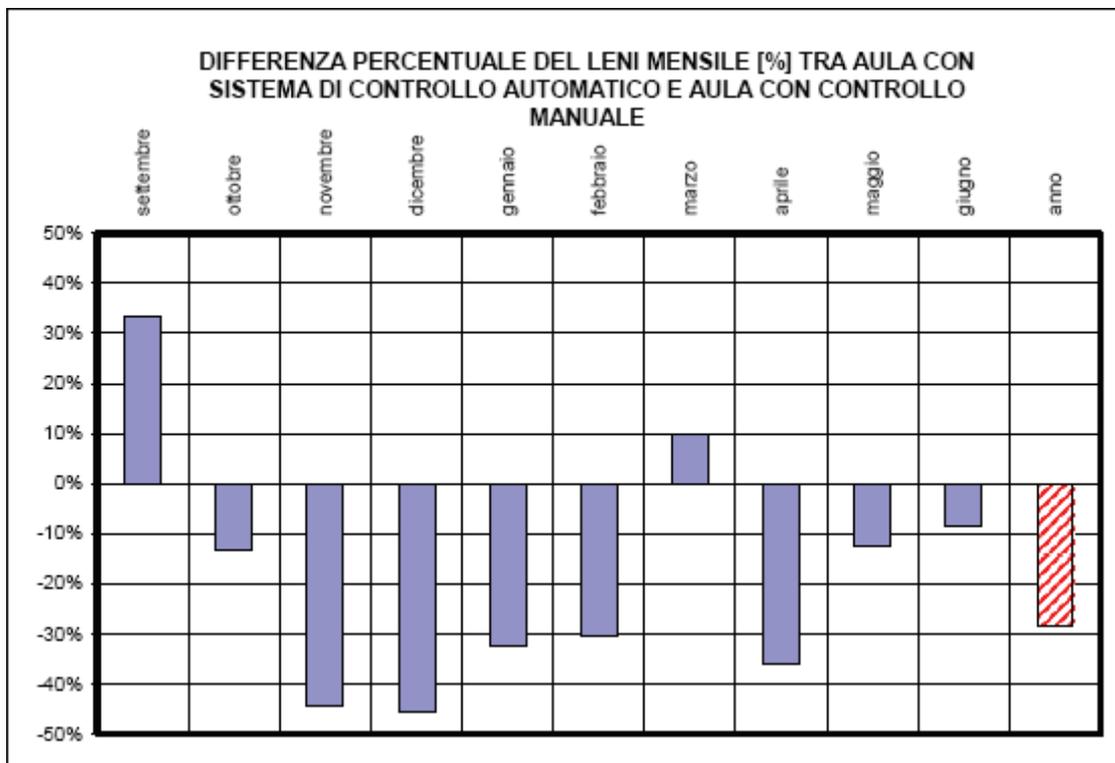


Fig. 41 - $SAVE_{LENI}$ mensile e annuale

[1] G. Rizzo et al. "Analisi dello stato dell'arte nazionale ed internazionale dei sistemi integrati di illuminazione naturale/artificiale in relazione all'involucro edilizio nel caso di edifici del terziario e abitativi, ai fini di un loro impiego nell'ambito della certificazione energetica degli edifici".

[2] C. Aghemo, A. Pellegrino, S. Cammarano "Sistemi di gestione e controllo della luce naturale e artificiale: Stato dell'arte delle tecnologie esistenti, delle logiche di controllo e applicazioni ad edifici a diversa destinazione d'uso".

[3] C. Aghemo, A. Pellegrino, L. Blaso, V. Serra "Rapporto sugli esiti di simulazioni numeriche e sperimentazioni in campo: Sistemi di integrazione della luce naturale e artificiale applicati a diverse tipologie edilizie".

[4] F. Gugliermetti, F. Bisegna "Componenti, sistemi e tecnologie per l' integrazione e la gestione della luce naturale negli edifici non residenziali: comfort visivo e risparmio energetico"