

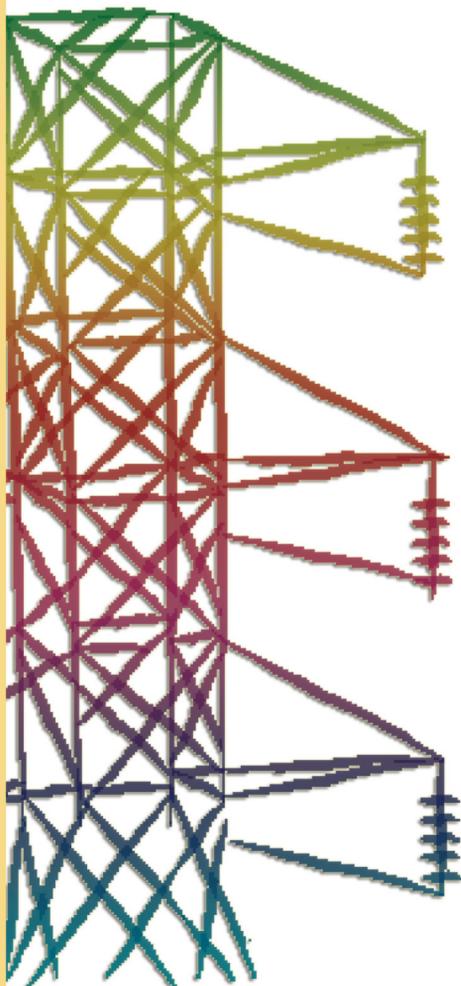
## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

**Sistemi di integrazione della luce naturale e artificiale  
applicati a diverse tipologie edilizie**

**Rapporto sugli esiti di simulazioni numeriche e  
sperimentazioni in campo**

**C. Aghemo, A. Pellegrino, L. Blaso, V. Serra**





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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sistemi di integrazione della luce naturale e artificiale  
applicati a diverse tipologie edilizie  
Rapporto sugli esiti di simulazioni numeriche e  
sperimentazioni in campo

*C. Aghemo, A. Pellegrino, L. Blaso, V. Serra*

SISTEMI DI INTEGRAZIONE DELLA LUCE NATURALE E ARTIFICIALE APPLICATI A DIVERSE  
TIPOLOGIE EDILIZIE

Rapporto sugli esiti di simulazioni numeriche e sperimentazioni in campo

C. Aghemo, A. Pellegrino, L. Blaso, V. Serra (Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica)

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

“Sviluppo di modelli e tecnologie per l’integrazione  
luce naturale e artificiale e  
partecipazione alle attività IEA connesse  
all’ottimizzazione delle prestazioni energetiche  
del sistema edificio-impianti”

---

Torino, 31 Marzo 2009

Coordinatore: prof. Marco Filippi



# RAPPORTO SUGLI ESITI DI SIMULAZIONI NUMERICHE E SPERIMENTAZIONI IN CAMPO

---

Sistemi di integrazione della luce naturale e artificiale  
applicati a diverse tipologie edilizie



Chiara Aghemo  
Anna Pellegrino  
Laura Blaso  
Valentina Serra

## Sommario

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2. STRUMENTI DI VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA PER L'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE DEGLI EDIFICI .....</b>	<b>6</b>
2.1 LA NORMA EUROPEA UNI EN 15193-2008 .....	6
2.2 I SOFTWARE.....	9
2.3 APPLICAZIONE DEGLI STRUMENTI DI VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA PER L'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE DEGLI EDIFICI .....	11
2.3.1 Applicazione del metodo della norma UNI EN 15193 ad un edificio di riferimento .....	11
2.3.1.1 Risultati .....	15
2.3.2 Confronto tra fabbisogni calcolati e consumi misurati .....	17
2.3.2.1 Risultati .....	17
2.3.2.2 Conclusioni .....	18
2.4 INFLUENZA DELLE CARATTERISTICHE ARCHITETTONICHE DEGLI EDIFICI SUI FABBISOGNI DI ENERGIA ELETTRICA PER L'ILLUMINAZIONE.....	19
2.4.1 Descrizione delle variabili considerate .....	19
2.4.2 Risultati .....	21
2.4.3 Conclusioni .....	24
<b>3. ATTIVITÀ SPERIMENTALE: MONITORAGGIO IN AMBIENTI ESISTENTI .....</b>	<b>25</b>
3.1 SISTEMA DI CONTROLLO DI BASE IN EDIFICIO SCOLASTICO .....	25
3.1.1 Descrizione del caso studio .....	25
3.1.2 Descrizione del sistema di controllo e gestione.....	27
3.1.3 Risultati .....	29
3.1.4 Conclusioni .....	30
3.2 SISTEMA CENTRALIZZATO DI BUILDING AUTOMATION IN EDIFICIO PER UFFICI .....	30
3.2.1 Descrizione del caso di studio .....	31
3.2.2 Descrizione del sistema di controllo e gestione .....	33
3.2.3 Descrizione della campagna di monitoraggio.....	36
3.2.4 Risultati .....	37
3.2.4.1 Prestazioni ambientali di illuminazione .....	37
3.2.4.2 Funzionamento del sistema di controllo .....	38
3.2.4.3 Prestazioni energetiche dell'impianto di illuminazione .....	39
3.2.5 Conclusioni .....	40
<b>4. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>41</b>

## 1. PREMESSA

Nonostante le potenzialità teoriche correlate all'uso dei sistemi di controllo dell'illuminazione spicca, in particolare nella realtà italiana, la carenza di casi in cui tali sistemi risultino applicati su larga scala e con successo.

Da un'analisi più approfondita del tema della progettazione di questi sistemi sono emersi alcuni aspetti che influiscono negativamente sulla loro diffusione:

- la scarsa conoscenza, da parte del progettista, delle tecnologie esistenti, delle caratteristiche e potenzialità delle diverse soluzioni applicative e dei singoli componenti costituenti;
- la conseguente difficoltà di scelta e di progettazione dei sistemi, che implica la necessità di affidarsi completamente a personale tecnico esterno o a ditte produttrici;
- la difficoltà nello stimare realisticamente le prestazioni del sistema, sia in termini di prestazioni ambientali che di risparmi energetici conseguibili;
- la difficoltà di accettazione da parte dell'utenza di sistemi che gestiscono automaticamente l'illuminazione in base ad impostazioni definite in fase di programmazione, e che non sempre consentono di tenere in debita considerazione la complessità degli spazi, delle attività svolte e delle esigenze dell'utenza.

Da queste considerazioni emerge la necessità di definire metodi di valutazione delle prestazioni dei sistemi di controllo utilizzabili da parte dei progettisti e di effettuare sperimentazioni in campo di tecnologie caratterizzate da differenti livelli di complessità e modalità di utilizzo, confrontando le prestazioni in termini di risparmio energetico e grado di accettabilità da parte dell'utente.

Per quanto riguarda il rapporto costi/benefici risultante dall'applicazione dei sistemi di controllo, le informazioni generalmente a disposizione del progettista sono quelle, presenti in letteratura, (sovente riportate nei cataloghi dei produttori) e relative al potenziale risparmio dovuto all'utilizzo di un generico sistema di controllo in rapporto ad un sistema di illuminazione con controllo manuale. Questi dati possono fornire un'informazione di massima sulla potenzialità di risparmio energetico correlata all'uso di sistemi di controllo, ma è evidente che non consentono di stimare la prestazione effettiva risultante dall'applicazione di un sistema specifico ad un edificio specifico.

Una stima accurata delle prestazioni energetiche e quindi dell'efficacia di un sistema di gestione dell'illuminazione dipende da diversi fattori, connessi sia alle caratteristiche dell'edificio per il quale viene progettato sia alle caratteristiche del sistema previsto (criteri di controllo adottati, componenti il sistema, etc.).

In particolare entrano in gioco:

- la disponibilità di luce naturale esterna all'ambiente, che dipende da:
  - latitudine e longitudine del luogo,
  - giorno del mese e ora del giorno,
  - condizioni di cielo (coperto, sereno, intermedio, etc.)
- la quantità di luce naturale presente in ambiente, che dipende da:
  - disponibilità di luce naturale esterna,
  - presenza di ostruzioni esterne,
  - orientamento dell'ambiente (nel caso si consideri la presenza di radiazione solare diretta)
  - presenza di sistemi di schermature,
  - conformazione dell'ambiente e disposizione delle postazioni di lavoro,
- le caratteristiche dell'utenza, intese come:
  - profilo di occupazione,
  - modalità di interazione tra l'utenza e i componenti schermanti,
  - modalità di interazione tra l'utenza e l'impianto di illuminazione,
- le caratteristiche e le prestazioni dell'impianto di illuminazione (tipologia di apparecchi, distribuzione della luce in ambiente, etc.)
- la tipologia e l'architettura del sistema di controllo (controllo in base all'occupazione, alla presenza di luce naturale, alla volontà dell'utente, a scenografie predefinite, etc., tipologia di sensori adottati, raggruppamento dei terminali, etc.).

In termini generali la stima dei fabbisogni di energia elettrica di un impianto di illuminazione artificiale si basa sull'integrazione nel tempo della potenza elettrica assorbita dagli apparecchi di illuminazione funzionali, di emergenza e da tutti i dispositivi elettrici necessari per il funzionamento di questi impianti. La complessità nella stima di questo fabbisogno è insita nella difficoltà che si incontra nel definire sia l'effettivo periodo di accensione dell'impianto di illuminazione che la corrispondente potenza assorbita nel caso di regolazione dinamica del flusso luminoso. Tale complessità risulta ulteriormente accentuata nel caso in cui sia presente un sistema di controllo che gestisce l'illuminazione in funzione ad esempio dell'occupazione o della presenza di luce naturale o di specifiche scenografie di luce.

Sulla base di queste considerazioni sono state analizzate diverse metodologie di calcolo, nell'ottica di evidenziarne potenzialità, limiti e grado di accuratezza nella stima.

Un calcolo semplificato può essere svolto a partire dal fattore medio di luce diurna, e dalla disponibilità di luce diffusa esterna, ricavata da banche dati relative alla località in esame o mediante specifici algoritmi di calcolo (es. modello di Perez). Confrontando la disponibilità di luce naturale interna con il profilo orario di occupazione dei locali è possibile determinare la quantità di luce che dovrà essere erogata dall'impianto di illuminazione su base oraria e di conseguenza la potenza elettrica assorbita (avendo preventivamente definito le caratteristiche dell'impianto di illuminazione artificiale). Sommando i consumi orari relativi a ciascun ambiente oggetto di controllo è possibile determinare il consumo annuo complessivo dell'edificio.

Un approccio semplificato di questo tipo prescinde da molti dei fattori influenti elencati in precedenza, quali:

- l'apporto dovuto alla radiazione solare diretta,
- l'influenza di sistemi di schermature mobili,
- le variazioni legate ad un diverso orientamento degli ambienti,
- le diverse prestazioni ottenibili con diverse tipologie di sistemi di controllo (es. presenza combinata di sensori di luce diurna e sensori di occupazione)
- l'interazione dell'utenza con l'ambiente ed il sistema.

Un secondo approccio si basa sull'applicazione del metodo di calcolo proposto nella norma europea (UNI EN 15193: Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione). Anche in questo caso si tratta di un metodo di calcolo manuale, relativamente semplificato, per la stima di un indicatore della prestazione energetica annua degli impianti di illuminazione artificiale di un edificio.

Il progetto di norma propone due differenti metodi di valutazione (uno più semplificato e uno più dettagliato); entrambi tengono conto delle potenzialità dei sistemi di controllo nello sfruttare gli apporti gratuiti di luce naturale e nel considerare la presenza degli utenti in ambiente. Entrambi i metodi però prescindono da alcuni degli aspetti che contribuiscono a determinare le prestazioni del sistema, quali:

- l'influenza dei componenti per il controllo della luce naturale, (es. i sistemi mobili di schermatura);
- l'influenza connessa alle modalità con cui gli utenti interagiscono con l'impianto di illuminazione artificiale e con i sistemi di schermatura.

Inoltre la disponibilità di luce naturale e le caratteristiche del sistema di controllo vengono stimate secondo un approccio tabellare e quindi con un elevato livello di approssimazione.

Un ultimo approccio può essere l'uso di specifici software di calcolo. In tal senso di evidenza la presenza di due distinte categorie di strumenti:

- i software di natura "commerciale";
- i software sviluppati presso centri di ricerca internazionali.

Anche in questo caso gli strumenti disponibili non sempre risultano esaustivi rispetto alla complessità dei fattori precedentemente evidenziata ed inoltre presentano caratteristiche e livelli di complessità molto vari.

I metodi di calcolo analizzati consentono una valutazione in fase di progetto (design rating) delle prestazioni energetiche degli impianti di illuminazione artificiale con sistemi di controllo, tenendo conto delle attività svolte e dei conseguenti requisiti illuminotecnici funzionali. Un'ulteriore campo di approfondimento per consolidare la conoscenza sui sistemi di controllo della luce artificiale e sulla

loro applicabilità, in rapporto anche ad aspetti di funzionalità e accettabilità da parte degli utenti, consiste nello sviluppo di attività sperimentali in campo finalizzate al monitoraggio delle prestazioni ambientali, energetiche e di risposta degli utenti in ambienti allestiti con diverse tipologie di sistemi di controllo (operational rating).

Nel seguito vengono presentati i rapporti relativi ai due ambiti di analisi: strumenti di valutazione del fabbisogno di energia per l'illuminazione artificiale e monitoraggio in ambienti esistenti.

## 2. STRUMENTI DI VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA PER L'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE DEGLI EDIFICI

### 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:

- **un metodo rapido** (quick method) che 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.
- **un metodo dettagliato** (comprehensive method) che 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.

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:

$$\text{LENI} = W / A \quad (1)$$

dove:

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

$A$ [m<sup>2</sup>]: 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:

$$W = W_L + W_P \quad (2)$$

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.

La stima dell'energia  $W_L$  e  $W_P$  si effettua utilizzando le due formule di seguito indicate, che sono riferite al tempo "t" di valutazione, definito in fase di analisi (su base oraria, giornaliera, mensile oppure annuale):

$$W_{L,t} = \frac{\sum \{(P_n \cdot F_C) \cdot [(t_D \cdot F_O \cdot F_D) + (t_N \cdot F_O)]\}}{1000} \quad (3)$$

dove:

$W_{L,t}$  [kWh] è l'energia elettrica consumata in un dato periodo  $t$  per garantire l'illuminazione artificiale richiesta nell'edificio;

$P_n$  [W] è la potenza elettrica installata per l'illuminazione artificiale in un ambiente o zona dell'edificio;

$F_C$  [-] è il fattore di illuminamento costante;

$t_D$  [h] è il numero di ore di utilizzo dell'ambiente in presenza di luce naturale;

$F_O$  [-] è il fattore che tiene conto dell'occupazione degli utenti in ambiente;

$F_D$  [-] è il fattore che tiene conto della disponibilità di luce naturale in ambiente;

$t_N$  [h] è il numero di ore di utilizzo dell'ambiente in assenza di luce naturale;

$$\text{mentre } W_{P,t} = \frac{\sum \{P_{pc} \cdot [t_y - (t_D + t_N)] + (P_{em} \cdot t_{em})\}}{1000} \quad (4)$$

dove:

$W_{P,t}$  [kWh] è l'energia parassita annuale consumata nel periodo  $t$  di riferimento;

$P_{pc}$  [W] è la potenza parassita totale assorbita dal sistema di controllo dei singoli ambienti o parti dell'edificio;

$t_y$  [h] è il numero totale di ore di utilizzo di un ambiente (valore standard: 8760 ore);

$t_D$  [h] è il numero di ore di utilizzo dell'ambiente in presenza di luce naturale;

$t_N$  [h] è il numero di ore di utilizzo dell'ambiente in assenza di luce naturale.

$P_{em}$  [W] è la potenza elettrica installata per garantire la ricarica delle batterie dell'illuminazione artificiale di emergenza;

$t_{em}$  [W] è il tempo di ricarica delle batterie dell'illuminazione di emergenza.

L'influenza sui consumi dovuta alla presenza di sistemi di controllo viene valutata attraverso alcuni fattori:  $F_D$  (Daylight Dependency Factor),  $F_O$  (Occupancy Dependency Factor) e  $F_C$  (Constant Illuminance Factor).

Il fattore  $F_D$  dipende dalla disponibilità di luce naturale entrante in ambiente e dal tipo di sistema di controllo dell'illuminazione naturale installato (manuale o automatico). Può essere calcolato con la seguente equazione per ciascun ambiente/zona dell'edificio:

$$F_{D,n} = 1 - (F_{D,S,n} \cdot F_{D,C,n}) \quad (5)$$

dove:

$F_{D,S,n}$  [-] è il fattore rappresentativo del potenziale contributo di illuminazione naturale in ambiente in considerazione del livello di illuminamento medio mantenuto da garantire;

$F_{D,C,n}$  [-] è il fattore rappresentativo del potenziale contributo del sistema di controllo dell'illuminazione artificiale in relazione alla disponibilità di luce naturale entrante.

Nel caso di superfici vetrate verticali,  $F_{D,S,n}$  dipende dalla disponibilità di luce diurna (Daylight Factor), dal livello di illuminamento medio mantenuto che deve essere garantito sul piano di lavoro ( $E_m$ ) (secondo le indicazioni della norma UNI EN 12464/1) e dalla latitudine del luogo.

Per valutare la disponibilità di luce diurna entrante in ambiente (Daylight factor:  $D_C$ ) viene considerato l'impatto di alcuni parametri (geometria dell'ambiente, geometria della finestra, presenza di ostruzioni esterne) tramite i quali è possibile determinare i seguenti indici:

- $I_{De}$ : indice di profondità, che definisce la massima profondità possibile per la penetrazione della luce naturale in ambiente in relazione all'altezza dell'apertura finestrata;
- $I_T$ : indice di trasparenza, che rappresenta il rapporto tra l'area delle superficie finestrata rispetto all'area orizzontale totale del piano di lavoro che beneficia di luce naturale entrante;

- $I_o$ : indice di ostruzione, che rappresenta l'effetto della riduzione della luce naturale entrante in ambiente a causa delle presenza di ostruzioni esterne all'ambiente (ad esempio ostruzioni esterne frontali, mensole orizzontali e verticali).

La disponibilità di luce naturale entrante in ambiente viene determinata individuando nell'ambiente una superficie orizzontale che potrebbe beneficiare del contributo di illuminazione naturale entrante e che dipende dai parametri geometrici prima indicati. E' possibile, quindi, determinare il valore di  $D_c$  attraverso la seguente equazione:

$$D_c = (4.13 + 20.0 \cdot I_T - 1.36 \cdot I_{De}) \cdot I_o \quad [\%] \quad (6)$$

dove :

$I_T[-]$  : è l'indice di trasparenza;

$I_{De}[-]$  : è l'indice di profondità;

$I_o[-]$  : è l'indice di ostruzione.

$D_c$  non considera la presenza del componente trasparente (vetro e telaio). Per tener conto del serramento,  $D_c$  deve essere corretto tramite il valore del coefficiente di trasmissione luminosa del vetro, il fattore di riduzione del telaio e il grado di sporcamento del vetro, andando a definire il fattore  $D$ . In entrambi i casi, calcolando  $D_c$  o  $D$  è possibile determinare la classe di penetrazione della luce naturale relativa agli ambienti che costituiscono l'edificio, come indicato nella tabella 2.1.

Tabella 2.1 - Classe di penetrazione in funzione del daylight factor ( $D_c$  o  $D$ )

CLASSIFICAZIONE		Penetrazione di luce naturale
$D_c$	$D$	
$D_c > 6\%$	$D > 3\%$	elevata
$6\% > D_c > 4\%$	$3\% > D > 2\%$	media
$4\% > D_c > 2\%$	$2\% > D > 1\%$	debole
$D_c < 2\%$	$D < 1\%$	nulla

La classe di penetrazione della luce naturale ed il livello di illuminamento medio mantenuto da garantire ( $E_m$ ) sono utilizzati per determinare il fattore  $F_{D,S}$  per differenti latitudini. Quando la classe di penetrazione è nulla (None) il valore di  $F_D$  si considera pari a 1, che significa nessuna riduzione della potenza elettrica installata.

Il valore del fattore  $F_{D,C,n}$  viene calcolato considerando la classe di penetrazione della luce naturale definita per l'ambiente analizzato e la tipologia di sistema di controllo installato (Tabella 2.2).

Tabella 2.2 - Fattore  $F_{D,C,n}$

$F_{d,c,n}$ in funzione della penetrazione di luce naturale			
Sistema di controllo della luce artificiale	debole	media	elevata
Manuale	0.20	0.30	0.40
Automatico, in funzione della luce naturale	0.75	0.77	0.85

Il fattore  $F_o$  dipende da due differenti elementi, quali:

- la tipologia di sistema di controllo utilizzata ( $F_{oc}$ );
- la proporzione di tempo durante il quale l'ambiente risulterà non occupato, che a sua volta dipenderà dalla destinazione d'uso dell'edificio e dalla tipologia dell'ambiente oltre che dal numero complessivo di utenti che occupano l'ambiente (fattore di assenza  $F_A$ ).

Nella tabella 2.3 sono riportati i valori di  $F_{oc}$  determinati in funzione della tipologia di sistema di controllo scelto.

Tabella 2.3 - Valore di  $F_{oc}$  in relazione alle differenti tipologie di sistema di controllo

VALORI DI $F_{oc}$	
<b>sistemi che non presentano il sensore di occupazione</b>	<b><math>F_{oc}</math></b>
accensione e spegnimento manuale	1.00
accensione e spegnimento manuale + sistema generale automatico di spegnimento	0.95
<b>sistemi che presentano il sensore di occupazione</b>	<b><math>F_{oc}</math></b>
accensione automatica e spegnimento con dimmerazione	0.95
accensione e spegnimento automatico	0.90
accensione manuale e spegnimento con dimmerazione	0.90
accensione manuale e spegnimento automatico	0.80

Il fattore  $F_c$  tiene conto, in presenza di un sistema di controllo automatico con fotosensore closed loop, della possibile riduzione di potenza ottenibile mantenendo costante l'illuminamento medio sul piano di lavoro (l'impianto viene infatti normalmente sovradimensionato per garantire nel tempo, in relazione al decadimento delle prestazioni dei componenti, l'illuminamento richiesto).

La norma UNI EN 15193-2008 fornisce un metodo di calcolo per stimare il consumo di energia elettrica per l'illuminazione artificiale negli edifici tenendo conto dei potenziali benefici imputabili all'integrazione della luce naturale e artificiale e al controllo della luce artificiale sulla base dell'occupazione degli ambienti. Inoltre questi benefici vengono "pesati" in relazione alle differenti tipologie di sistemi di controllo installabili: manuale o automatico.

La norma include formule e tabelle per derivare i valori di calcolo in funzione delle specifiche caratteristiche dell'edificio analizzato (disponibilità di luce naturale, requisiti illuminotecnici, tipologie di utilizzo dell'ambiente, profilo di occupazione, etc.) e del sistema di controllo (on-off manuale, dimmerazione in relazione alla luce naturale, on-off automatico, accensione manuale e spegnimento automatico, ecc.). E' importante però sottolineare che i valori ed i modelli messi a disposizione per tener conto dei sistemi di controllo sono puramente empirici (in particolare per quanto riguarda i sistemi basati sull'occupazione), derivati dal monitoraggio di casi reali ed integrati in base a considerazioni pratiche. Le tabelle messe a disposizione dalla norma non includono l'ampio range di possibili soluzioni di controllo, e valori specifici potrebbero essere determinati per soluzioni di controllo diverse da quelle specificate.

La norma inoltre sottolinea l'importanza di considerare tutte le potenze parassite dell'impianto di illuminazione funzionale, di emergenza e di controllo. Queste potenze possono influenzare considerevolmente i valori del LENI ma non risultano sempre di facile determinazione. La norma, in relazione al metodo di valutazione semplificato propone in questo senso alcuni valori di riferimento: 1 kWh/m<sup>2</sup>anno per i consumi parassiti associabili all'illuminazione di emergenza e 5 kWh/m<sup>2</sup>anno per i consumi parassiti dei sistemi di controllo.

## 2.2 I SOFTWARE

Attualmente sono poco numerosi i software che consentono una stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale degli edifici in presenza di sistemi di controllo.

Tra quelli analizzati si citano:

- Daysim
- Lightswitch
- Adeline
- Energy Plus

Nella tabella 2.4 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

Tabella 2.4 – Principali caratteristiche degli strumenti di calcolo analizzati nell’ottica della simulazione dei sistemi di controllo della luce artificiale

<b>Software LIGHTSWITCH 2002</b>	<b>MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI</b>	
	<b>in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA</b>	<b>in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti</b>
INPUT: Potenza specifica totale installata (W/m <sup>2</sup> ); 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 stan-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	
<b>OUTPUT: fabbisogno annuo di energia elettrica per illuminazione (kWh/m<sup>2</sup>year), Autonomia di Luce diurna Annuale, Fattore di luce diurna</b>		
<b>Software DAYSIM</b>	<b>MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI</b>	
	<b>in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA</b>	<b>in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti</b>
INPUT: Potenza specifica totale installata (W/m <sup>2</sup> ); 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 stan-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	
<b>OUTPUT: fabbisogno annuo di energia elettrica per illuminazione (kWh/m<sup>2</sup>anno), Autonomia di Luce Diurna Annuale, Fattore di luce diurna</b>		
<b>Software ADELINÉ</b>	<b>MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI</b>	
	<b>in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA</b>	<b>in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti</b>
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	

<b>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</b>		
<b>Software ENERGY PLUS</b>	<b>MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI</b>	
	<b>in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA</b>	<b>in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti</b>
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)	
<b>OUTPUT: energia totale consumata, Potenza totale installata per l'illuminazione, livelli di illuminazione naturale</b>		
<b>Standard UNI EN 15193:2008</b>	<b>MODALITA' DI CONTROLLO DELLA LUCE SIMULABILI</b>	
	<b>in funzione della PENETRAZIONE DI LUCE DIURNA</b>	<b>in funzione dell'OCCUPAZIONE degli ambienti</b>
<b>Metodo rapido</b>	on/off manuale regolazione (dimm) automatica in funzione della luce naturale	on/off manuale controllo automatico
<b>Metodo dettagliato</b> 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)
<b>OUTPUT: LENI (lighting energy numeric indicator) (kWh/m<sup>2</sup>year)</b>		

Recentemente anche Dialux, software di uso molto diffuso per la progettazione degli impianti di illuminazione artificiale, è stato implementato aggiungendo un modulo per la valutazione energetica degli impianti di illuminazione artificiale. Tale modulo si basa sul metodo di calcolo proposto dalla norma UNI EN 15193.

## 2.3 APPLICAZIONE DEGLI STRUMENTI DI VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA PER L'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE DEGLI EDIFICI

### 2.3.1 Applicazione del metodo della norma UNI EN 15193 ad un edificio di riferimento

La procedura proposta dalla normativa UNI EN 15193 è stata adottata per la valutazione del fabbisogno energetico per l'illuminazione di un edificio di riferimento, con l'obiettivo di verificarne l'applicabilità e comprendere l'incidenza che differenti fattori comportano sulla stima del fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale negli edifici.

Inoltre, l'applicazione della procedura ha permesso di confrontare i potenziali risparmi energetici conseguibili con differenti strategie di controllo (integrazione luce naturale e artificiale, controllo automatico in base alla presenza di persone, ecc), rispetto a differenti configurazioni di edificio.

Nello specifico si è adottato come edificio tipo un edificio di 7 piani costituito da uffici che si allineano sulle due facciate principali e sono separati centralmente da un corridoio sui cui lati terminali sono presenti due spazi di servizio relativi ai vani scala.

Il calcolo del LENI, effettuato attraverso il metodo dettagliato, è stato ripetuto cambiando alcune variabili rilevanti nell'edificio di riferimento:

- la profondità dell'ambiente ufficio (4 m; 5,4 m e 7 m.);
- la superficie finestrata (tipo A – due finestre con superficie vetrata pari ad 1/8 della superficie pavimento; tipo B – finestra singola – Window Wall Ratio (WWR) ~ 40%; tipo C – superficie completamente finestrata - WWR ~ 89%);
- le ostruzioni esterne (senza ostruzione, con ostruzione verticale frontale prodotta da un altro edificio, con una mensola orizzontale aggettante profonda 1.5 m);
- il sistema di controllo (manuale e/o automatico in relazione alla disponibilità di luce naturale ed all'occupazione degli ambienti),
- il numero di postazioni di lavoro negli uffici (gli ambienti di 4 m e 5,4 m di profondità corrispondono ad uffici di due persone mentre nel caso di 7 m di profondità corrispondono ad uffici open space).

Figura 2.1 – Rappresentazione in pianta del piano tipo dell'edificio di riferimento

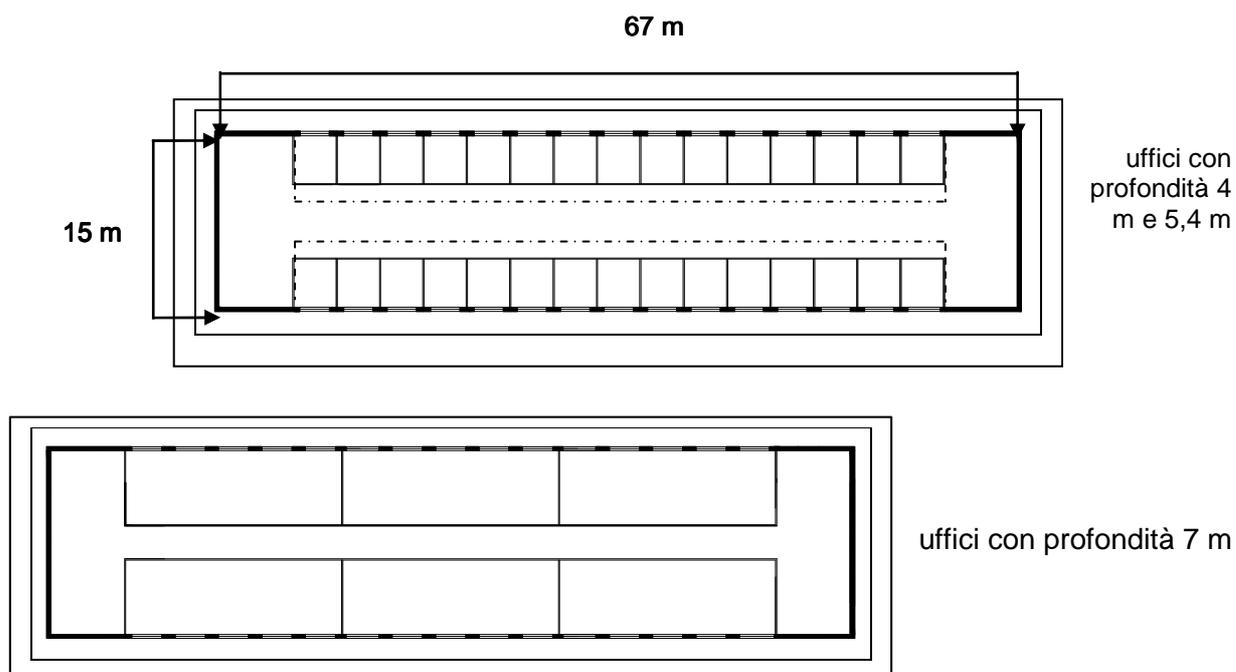


Figura 2.2 – Rappresentazione delle tre configurazioni di finestra ipotizzate per l'edificio tipo

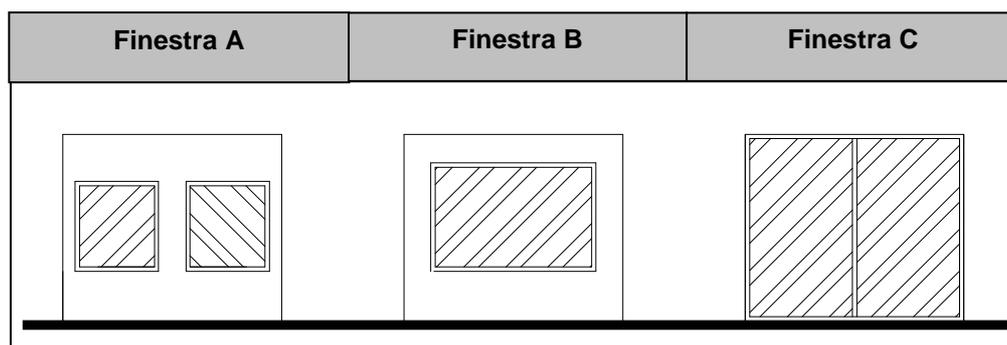


Figura 2.3 – Rappresentazione schematica delle ostruzioni esterne considerate per l'edificio tipo

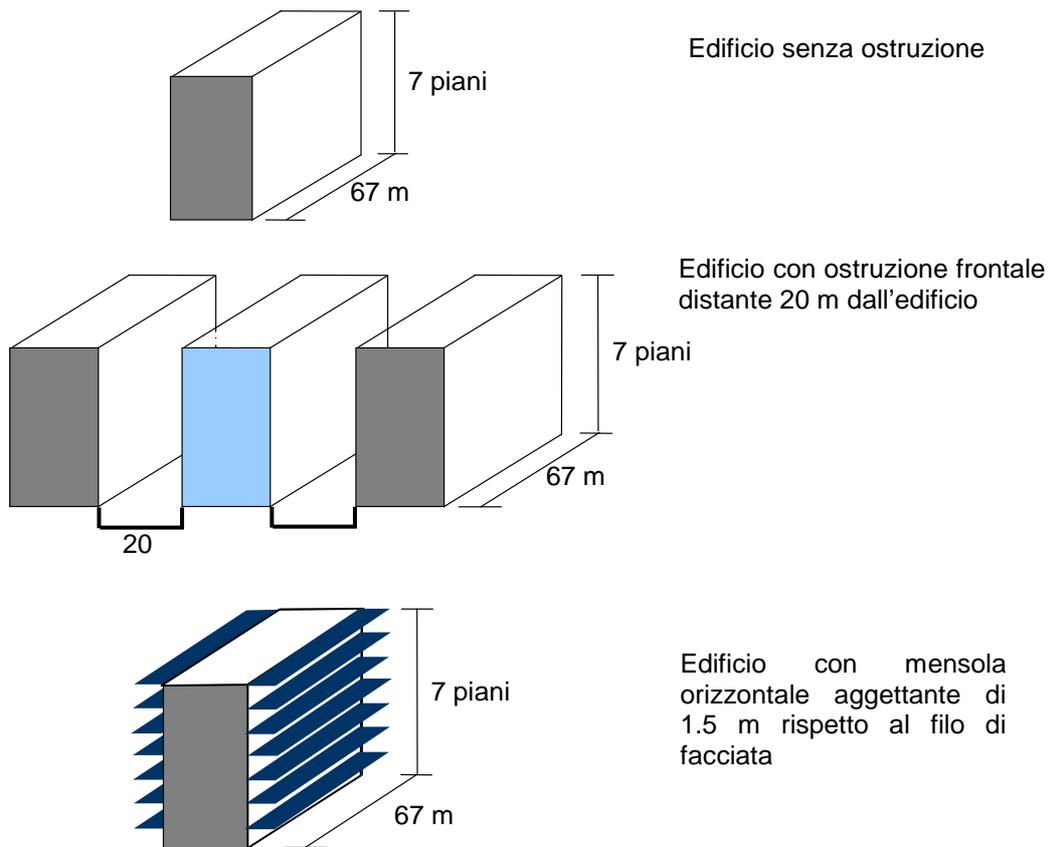


Figura 2.4 – Rappresentazione in pianta delle diverse configurazioni di ufficio utilizzate nella simulazione

		PROFONDITA' AMBIENTE		
		4 m	5,4 m	7 m
FINESTRA *	FINESTRA A			
	FINESTRA B			
	FINESTRA C			

\* La Finestra A corrisponde al valore aeroilluminante  $S_f/S_p = 1/8$

Per sintetizzare le principali caratteristiche dei casi analizzati, sono stati definiti i seguenti indici numerici rappresentativi della disponibilità di luce naturale nelle differenti configurazioni: rapporto aeroilluminante Superficie finestra/Superficie pavimento ( $S_f/S_p$ ), profondità massima dell'ambiente che, in base all'approccio di calcolo della normativa, beneficia di luce naturale ( $a_d$ ) e angolo di ostruzione  $\theta$  rispetto al baricentro della finestra. I valori assunti sono riportati nelle tabelle 2.5 e 2.6. Si sono inoltre assunte le seguenti densità di potenza per l'illuminazione artificiale delle zone dell'edificio:  $15 \text{ W/m}^2$  per garantire negli uffici un livello di illuminamento medio mantenuto di  $500 \text{ lx}$  sul piano di lavoro a  $0,80 \text{ m}$  da terra (UNI EN 12464/1-2004) e  $8 \text{ W/m}^2$  per garantire nei servizi/disimpegno/corridoi/scale un livello di illuminamento medio mantenuto di  $100 \text{ lx}$  a  $0,20 \text{ m}$  dal pavimento (UNI EN 12464/1-2004).

Tabella 2.5 - Indicatori numerici che caratterizzano i casi di studio

	PROFONDITA' UFFICIO								
	4 m			5.4 m			7 m		
	Sw/Sf	$a_d$	W/ m <sup>2</sup>	Sw/Sf	$a_d$	W/ m <sup>2</sup>	Sw/Sf	$a_d$	W/ m <sup>2</sup>
SUPERFICIE FINESTRATA A	0.13	2.80	15.00	0.13	3.30	15.00	0.13	3.55	15.00
SUPERFICIE FINESTRATA B	0.29	4.00	15.00	0.21	4.00	15.00	0.16	4.30	15.00
SUPERFICIE FINESTRATA C	0.67	4.00	15.00	0.5	5.40	15.00	0.38	5.45	15.00

Tabella 2.6 - Angoli di ostruzione minimi e massimi per le differenti tipologie di ostruzione

$\theta$			
SUPERFICIE FINESTRATA A	$\theta = 0^\circ$	$\theta \text{ min} = 6^\circ$ $\theta \text{ max} = 50^\circ$	$\theta = 40^\circ$
SUPERFICIE FINESTRATA B	$\theta = 0^\circ$	$\theta \text{ min} = 5^\circ$ $\theta \text{ max} = 49^\circ$	$\theta = 43^\circ$
SUPERFICIE FINESTRATA C	$\theta = 0^\circ$	$\theta \text{ min} = 6^\circ$ $\theta \text{ max} = 50^\circ$	$\theta = 38^\circ$

Le strategie di controllo che sono state considerate sono:

- rispetto all'integrazione con la luce naturale:
  - o on/off manuale (interruttore a parete);
  - o regolazione automatica del flusso luminoso (uso di fotosensore);
- rispetto alla modalità di utilizzo degli ambiente:
  - o on/off manuale (interruttore a parete);
  - o on/off automatico (sensore di occupazione con tempo di ritardo nello spegnimento di 15 minuti);
  - o on manuale ed off automatico (interruttore a parete più sensore di occupazione con tempo di ritardo nello spegnimento di 15 minuti).

Poiché la profondità di penetrazione della luce naturale ( $a_d$ ), calcolata secondo il metodo della norma UNI EN 15193, risulta talvolta inferiore alla profondità dell'ambiente, si è scelto di differenziare l'analisi considerando due distinte soluzioni di raggruppamento degli apparecchi di illuminazione in termini di regolazione:

- un unico raggruppamento per tutti gli apparecchi,
- due accensioni separate associate a due gruppi di apparecchi paralleli alla superficie vetrata.

Nel caso in cui parte dell'ambiente non usufruisca di luce naturale ( $a_d$  inferiore alla profondità complessiva) si avrà FD pari a 1 nel caso di raggruppamento unico degli apparecchi e FD <1 nel caso la regolazione degli apparecchi sia pensata per gruppi separati.

Nella tabella 2.7 che segue sono riassunte le caratteristiche dimensionali dell'edificio nelle differenti configurazioni.

Tabella 2.7 - Caratteristiche dimensionali delle configurazioni dell'edificio tipo

<b>DIMENSIONI GEOMETRICHE</b>			
PROFONDITA' UFFICIO (m)	<b>4</b>	<b>5.4</b>	<b>7</b>
SUPERFICIE SINGOLO UFFICIO (m <sup>2</sup> )	14	19	125
N° UFFICI	30	30	6
SUPERFICIE UFFICI/piano (m <sup>2</sup> )	420	567	752
SUPERFICIE CORRIDOIO/piano (m <sup>2</sup> )	504	353	342
N° PIANI	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>
SUPERFICIE UFFICI TOT (m <sup>2</sup> )	2940	3969	5263
SUPERFICIE CORRIDOIO TOT (m <sup>2</sup> )	3530	2470	2394
SUPERFICIE TOTALE EDIFICIO (m <sup>2</sup> )	6470	6439	7657

### 2.3.1.1 Risultati

Il LENI è stato calcolato per ciascuna configurazione di edificio e sistema di controllo dell'illuminazione artificiale. La tabella 2.8 mostra i valori ottenuti per il controllo on-off manuale. Ovviamente il LENI aumenta al diminuire della dimensione della superficie vetrata ed all'aumentare della profondità dell'ufficio.

La presenza delle ostruzioni determina un incremento del fabbisogno energetico compreso in un intervallo fra il 4% ed il 21 %. Piccole differenze sono state calcolate tra la presenza dell'ostruzione verticale e l'aggetto orizzontale (il LENI nel caso dell'edificio con mensola orizzontale è maggiore del 1%-7%). In molti casi, ed in particolare per spazi con maggiore profondità e piccole superfici vetrate, se l'impianto di illuminazione artificiale è gestito con un solo gruppo di apparecchi sono vanificati tutti i potenziali benefici derivanti dalla disponibilità di luce naturale entrante in ambiente. Questo avviene in quanto l'area che beneficia di luce naturale è minore della reale dimensione dell'ufficio ( $a_d <$  profondità dell'ufficio). In questi casi il fattore FD è stato considerato pari a 1 in quanto la classe di penetrazione della luce naturale era nulla. In questo modo, per esempio, nel caso di uffici con profondità di 7 m ed apparecchi regolati secondo un unico gruppo si è ottenuto lo stesso LENI in presenza di finestra A, B and C.

Il potenziale risparmio energetico determinato dall'integrazione automatica della luce naturale e artificiale è riportato in tabella 2.9. In qualche caso la presenza del fotosensore comporta, rispetto all'on-off manuale, un incremento del fabbisogno energetico poiché, nel caso in cui gli apparecchi di illuminazione siano gestiti in un unico gruppo, l'area che beneficia di luce naturale è minore della reale dimensione dell'ambiente. In questi casi, come già detto, il fattore FD è stato considerato pari a 1 e la presenza del dispositivo di controllo automatico (il fotosensore) comporta un aumento del consumo di energia determinato dalla potenza parassita dovuta al funzionamento ed alle condizioni di standby del dispositivo stesso. Fatta eccezione per questi casi, l'utilizzo del fotosensore ha dimostrato un risparmio energetico compreso fra 4% e 36% in relazione alla dimensioni della superficie vetrata. La presenza delle ostruzioni esterne ha comportato una riduzione dell'efficienza del fotosensori in un range compreso tra l'1% ed il 4%. Nel caso in cui si consideri l'edificio in presenza di ostruzione esterna è importante confrontare i valori del LENI in relazione al piano dell'edificio: il grado di ostruzione nei piani bassi dell'edificio può significativamente ridurre il vantaggio di adottare un sistema di controllo automatico rispetto ad un controllo on-off manuale.

Tabella 2.8 – Valori del LENI per il sistema di controllo on-off manuale

LENI [kWh/m <sup>2</sup> year] - Edificio senza ostruzione						
<i>tipologia finestra</i>	Finestra A		Finestra B		Finestra C	
<i>profondità dell'ambiente</i>	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi
4 m	19.69	18.77	15.12	15.12	15.12	15.12
5 m	23.66	21.21	23.66	20.46	17.47	17.47
7 m	28.18	25.66	28.18	25.12	28.18	22.21
LENI [kWh/m <sup>2</sup> year] - Edificio con ostruzione verticale						
<i>tipologia finestra</i>	Finestra A		Finestra B		Finestra C	
<i>profondità dell'ambiente</i>	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi
4 m	19.69	18.89	17.36	17.36	15.80	15.80
5 m	23.66	22.45	23.66	21.63	18.70	18.70
7 m	28.18	26.75	28.18	26.24	28.18	23.68
LENI [kWh/m <sup>2</sup> year] - Edificio con mensola orizzontale						
<i>tipologia finestra</i>	Finestra A		Finestra B		Finestra C	
<i>profondità dell'ambiente</i>	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi
4 m	19.69	18.77	18.25	18.25	15.12	15.12
5 m	23.66	22.47	23.66	22.11	17.47	17.47
7 m	28.18	26.96	28.18	26.70	28.18	22.21

Tabella 2.9 – Differenza % LENI tra il sistema di controllo in presenza di fotosensori rispetto al controllo manuale

Differenza % LENI - Edificio senza ostruzione						
<i>tipologia finestra</i>	Finestra A		Finestra B		Finestra C	
<i>profondità dell'ambiente</i>	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi
4 m	2%	-11%	-29%	-29%	-29%	-29%
5 m	0%	-17%	0%	-22%	-36%	-36%
7 m	-4%	-19%	-4%	-22%	-4%	-33%
Differenza % LENI - Edificio con ostruzione frontale						
<i>tipologia finestra</i>	Finestra A		Finestra B		Finestra C	
<i>profondità dell'ambiente</i>	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi
4 m	2%	-11%	-18%	-18%	-29%	-29%
5 m	0%	-13%	0%	-18%	-36%	-36%
7 m	-4%	-16%	-4%	-19%	-4%	-33%
Differenza % LENI - Edificio con oggetto orizzontale						
<i>tipologia finestra</i>	Finestra A		Finestra B		Finestra C	
<i>profondità dell'ambiente</i>	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi	1 gruppo	2 gruppi
4 m	2%	-8%	-19%	-19%	-26%	-26%
5 m	0%	-10%	0%	-17%	-32%	-32%
7 m	-4%	-13%	-4%	-18%	-4%	-29%

Per quanto riguarda l'utilizzo dei sensori di occupazione i risultati ottenuti con l'applicazione della procedura proposta dalla normative consentono di fare le seguenti considerazioni:

- il risparmio energetico dipende dalla tipologia di sistema installato e dal numero di persone che lavorano nell'ufficio;
- nel caso di accensione e spegnimento automatico si verifica un aumento dei consumi di energia (superiore al 30%) rispetto alla modalità di controllo manuale in cui la luce è accesa dagli utenti in relazione alla disponibilità di luce naturale entrante in ambiente;
- nel caso di accensione manuale e spegnimento automatico il risparmio energetico conseguibile è invece compreso tra il 6 e il 22%;

- se il fattore di assenza è molto basso (ad esempio nell'open space) la potenza parassita dei sensori di presenza in condizione di standby può incrementare i consumi energetici rispetto ad un controllo manuale (+6%).

Il calcolo del LENI in tutte le configurazioni è stato valutato considerando un numero di ore di utilizzo annuale degli uffici pari a 2250 ore in presenza di luce naturale e 250 ore in assenza di luce naturale (valore di default).

### 2.3.2 Confronto tra fabbisogni calcolati e consumi misurati

Al fine di verificare l'efficacia della procedura di calcolo della Norma UNI EN 15193 nello stimare i consumi per l'illuminazione artificiale in presenza di sistemi di controllo, il metodo di calcolo è stato applicato al caso studio delle aule scolastiche della Scuola Europea Spinelli di Torino, per le quali, nell'anno scolastico 2006-2007, sono stati monitorati i consumi di energia elettrica degli impianti di illuminazione (cfr. paragrafo 3.1).

Due tipi di dati sono stati confrontati: i valori del LENI annuale e quelli relativi a ciascun mese dell'anno.

Per questo tipo di confronto è importante disporre, oltre che dei dati geometrici degli ambienti, e degli impianti installati anche di tutte le informazioni relative al comportamento degli utenti (ad esempio il modo di interagire con l'impianto di illuminazione artificiale o con i sistemi di controllo della radiazione solare), l'effettivo profilo d'uso degli ambienti, il tipo di attività svolte etc.

Particolare rilevanza assume la definizione del numero di ore di utilizzo degli spazi. La norma UNI EN 15193 fornisce dei valori di riferimento in relazione a diverse tipologie edilizie. Per gli edifici scolastici viene stabilito un periodo di occupazione annuo di 2000 ore. In questo caso specifico è stato però possibile stimare il numero reale di ore di occupazione sulla base del calendario delle lezioni delle due aule.

Nell'ottica del confronto, il fabbisogno di energia elettrica è stato calcolato utilizzando come periodo di occupazione sia il numero di ore effettivo (su base annua e mensile), sia il dato suggerito dalla normativa, quest'ultimo caso in particolare per verificare l'errore che comporta l'assunzione di un dato di occupazione standard rispetto ad una situazione specifica.

Il calcolo secondo il metodo della normativa è stato inoltre effettuato considerando il tipo di sistema di controllo della luce artificiale presente rispettivamente nelle due aule: in un caso comando esclusivamente manuale, nell'altro caso accensione e spegnimento manuali associate a regolazione automatica del flusso luminoso in base alla presenza di luce diurna.

#### 2.3.2.1 Risultati

Il confronto tra i dati di LENI misurati e calcolati è riportato nella tabella 2.10

Tabella 2.10 - Confronto tra LENI misurato e calcolato per ciascun mese dell'anno e per l'intero anno

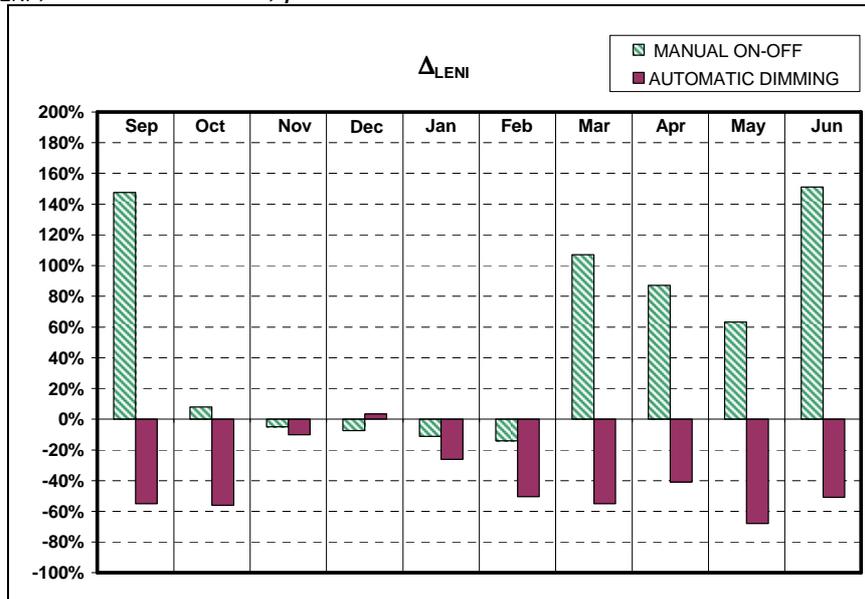
	LENI - SISTEMA DI CONTROLLO MANUALE (ON-OFF)											
	Annuale [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Mensile [kWh/m <sup>2</sup> mese]										
		Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	
dati monitorati	7.67	0.13	1.00	1.16	1.51	0.82	1.24	0.44	0.56	0.53	0.27	
dati calcolati (numero di ore di default: 2000)	14.29											
dati calcolati (numero di ore effettivo: 1330)	9.00	0.33	1.08	1.1	1.4	0.73	1.07	0.92	1.04	0.87	0.99	
	LENI - SISTEMA DI CONTROLLO MANUALE (ON-OFF) + AUTOMATICO DIMMING											
	Annuale [kWh/m <sup>2</sup> anno]	Mensile [kWh/m <sup>2</sup> mese]										
		Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	
dati monitorati	5.49	0.18	0.87	0.64	0.82	0.56	0.87	0.49	0.36	0.47	0.24	
dati calcolati (numero di ore di default: 2000)	5.99											
dati calcolati (numero di ore effettivo: 1330)	3.02	0.08	0.38	0.58	0.85	0.41	0.43	0.22	0.21	0.15	0.18	

Nell'ottica di valutare la sovrastima o la sottostima dei dati calcolati rispetto a quelli misurati è stata calcolata la differenza relativa percentuale del LENI calcolato rispetto a quello misurato ( $\Delta_{LENI}$ ):

$$\Delta_{LENI} = \frac{LENI_{calc} - LENI_{meas}}{LENI_{meas}} * 100 \quad [\%] \quad (8)$$

La differenza relativa del LENI per i diversi mesi dell'anno è rappresentata in figura 2.5

Figura 2.5 -  $\Delta_{LENI}$ , su base mensile, per le due aule caratterizzate dal diverso sistema di controllo



### 2.3.2.2 Conclusioni

Dall'analisi dei risultati è possibile delineare alcune osservazioni circa la coerenza dei dati calcolati col metodo di calcolo proposto dalla norma UNI EN 15193 rispetto a quelli misurati:

- si possono osservare diverse tendenze in funzione del tipo di sistema di controllo considerato: nel caso di controllo on/off manuale i risultati ottenuti con il calcolo basato sul metodo della normativa tendono a sovrastimare il valore del LENI annuale, mentre si riscontra una tendenza opposta nel caso di on/off manuale associata a regolazione automatica in base alla luce diurna;
- la variazione del periodo di occupazione (dal dato standard della normativa pari a 2000 ore, a quello effettivo di 1300 ore) riduce la sovrastima del valore del LENI nel caso di controllo manuale (da + 86% a + 17%), ma, per contro, implica un'ulteriore sottostima nel caso di dimmerazione automatica (da -9% a - 45%)
- se si considerano i valori mensili, la differenza relativa tra dati calcolati e misurati risulta in genere superiore nelle mezze stagioni e in estate (79% per controllo manuale e -54% per regolazione automatica), mentre si riduce considerevolmente nel periodo invernale tra Novembre e Gennaio (-8% per controllo manuale e -11% per regolazione automatica);
- considerando singolarmente i valori mensili appare evidente la sovrastima dei fabbisogni in presenza di controllo manuale, in particolare nelle mezze stagioni ed in estate (valor medio +79%).

Da questi risultati è possibile trarre alcune considerazioni conclusive:

- la sovrastima dei dati calcolati in presenza di sistema di controllo manuale potrebbe dipendere da una non corretta valutazione, da parte del metodo della normativa, dell'interazione dell'utente con l'impianto di illuminazione artificiale. Ciò significa in particolare che la norma sottostima l'attitudine dell'utente (in questo caso le maestre) a rispondere alla variazione in ambiente delle condizioni di illuminazione naturale (es. le maestre spengono la luce in presenza di sufficiente luce naturale, ma probabilmente non sempre la riaccendono quando il livello di luce naturale scende sotto il valore di soglia definito come valore di comfort in rapporto al tipo di attività)
- la sottostima dei dati calcolati se si considera una regolazione automatica della luce in funzione della presenza di luce naturale potrebbe essere spiegata considerando che la procedura definita nella normativa non prevede la presenza di schermature solari mobile e questo può implicare una sovrastima della disponibilità di luce naturale in ambiente; da quanto

emerso in un'intervista alle maestre delle due aule, le veneziane interne sono state frequentemente utilizzate, data l'esposizione a sud delle aule, soprattutto in estate e nelle mezze stagioni.

A valle di queste considerazioni è importante sottolineare la difficoltà a generalizzare i risultati ottenuti, anche in considerazione del fatto che, per quanto riguardagli ambienti reali è stato possibile monitorare con precisione solo i dati di consumo, mentre non vi sono informazioni certe circa l'effettivo profilo di utilizzo delle aule, il tipo di attività svolta nelle diverse ore della giornata, l'interazione con il sistema di schermatura solare, etc. Tutte questi aspetti possono influire sul dato di consumo e contribuire a determinare lo scostamento rispetto ai dati calcolati.

In generale si può comunque osservare una buona corrispondenza tra dati misurati (operational rating) e dati calcolati con il metodo dettagliato proposto dalla norma UNI EN 159193 (design rating), in particolare quando si riesce a garantire una buona corrispondenza tra assunzioni di calcolo e condizioni reali. Questo sottolinea l'importanza, già in fase di progetto di utilizzare dati di input il più possibile attendibili e realistici.

## **2.4 INFLUENZA DELLE CARATTERISTICHE ARCHITETTONICHE DEGLI EDIFICI SUI FABBISOGNI DI ENERGIA ELETTRICA PER L'ILLUMINAZIONE**

I fabbisogni di energia elettrica per l'illuminazione artificiale degli edifici dipendono, come già precedentemente descritto, da diversi fattori associabili alle caratteristiche architettoniche dell'edificio, alle caratteristiche dell'impianto di illuminazione e del sistema di controllo, alla modalità d'utilizzo degli spazi, al comportamento dell'utenza, etc.

In questo studio si è voluta approfondire l'analisi dell'influenza di alcune variabili architettoniche degli edifici che contribuiscono a determinare la penetrazione della luce naturale negli ambienti: la dimensione delle finestre, la profondità degli ambienti, e l'ostruzione esterna prodotta o da edifici circostanti o da aggetti orizzontali. L'analisi è stata inoltre condotta confrontando i risultati nel caso di un sistema di controllo manuale e di regolazione automatica della luce artificiale in rapporto alla presenza di luce naturale.

In questo modo ci si propone sia di valutare l'influenza delle caratteristiche architettoniche dell'edificio sui fabbisogni energetici per l'illuminazione, sia di verificare l'efficacia di un sistema di controllo basato sull'integrazione automatica della luce naturale e artificiale in rapporto alle caratteristiche dell'edificio.

In questo caso lo studio è stato condotto applicando sia il metodo di calcolo della norma UNI EN 15193 sia il software di calcolo Daysim che, essendo basato sulla simulazione dinamica dell'illuminazione naturale secondo i dati climatici della località di progetto, consente concettualmente una più accurata stima dell'integrazione tra luce naturale e artificiale.

Il fabbisogno di energia elettrica non è stato calcolato per l'intero edificio, ma per un singolo ambiente, scelto come "zona di riferimento" dell'edificio.

### **2.4.1 Descrizione delle variabili considerate**

Nel calcolo si è assunto che la zona di riferimento considerata (assimilabile ad un ambiente ufficio) sia localizzata a Torino (45° a nord di latitudine) ed abbia un'illuminazione naturale unilaterale, garantita da finestre esposte a sud.

Le caratteristiche architettoniche della zona, considerate come variabili sono:

- la dimensione della superficie vetrata
- la profondità dell'ambiente
- l'ostruzione esterna.

I valori assunti per queste variabili sono stati scelti nell'ottica di rappresentare le possibili situazioni corrispondenti a diversi ambienti ufficio.

Sono stati assunti come costanti nel calcolo i dati di larghezza e altezza della zona e le caratteristiche ottiche delle superfici interne. I valori assunti sono:

- larghezza della zona: 6m

- altezza della zona: 3 m
- fattore di riflessione di soffitto, pareti e pavimento, rispettivamente 0,8 – 0,5 – 0,3
- fattore di trasmissione del vetro 0,7.

Per quanto riguarda le caratteristiche dell'impianto di illuminazione e del sistema di controllo sono stati assunti i seguenti dati:

- potenza necessaria per soddisfare le esigenze funzionali di illuminazione ( $E = 500 \text{ lux}$ ):  $15 \text{ W/m}^2$
- potenza parassita assorbita dal sistema di controllo :  $0,1 \text{ W/m}^2$ .

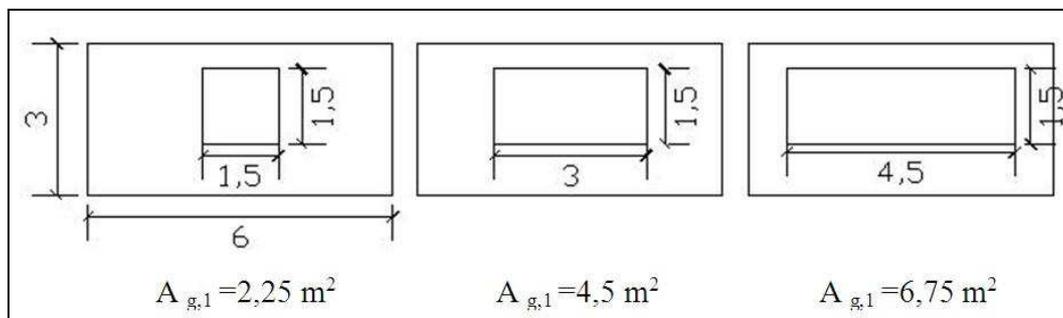
I sistemi di controllo considerati sono: on/off manuale mediante interruttore, e on/off manuale mediante interruttore associato a regolazione in continuo del flusso luminoso mediante fotosensore.

Inoltre si è assunto come profilo di occupazione degli ambienti quello tipico di un edificio per uffici. Nel calcolo con il metodo della norma questo corrisponde a 2500 ore, mentre per l'applicazione del software Daysim si è assunto un periodo di occupazione giornaliera tra le 8,30 e le 18,30 per 5 giorni alla settimana.

### Dimensioni delle superfici vetrate

Tre differenti dimensioni sono state individuate come rappresentative di superfici vetrate piccole, medie, grandi. (figura 2.5)

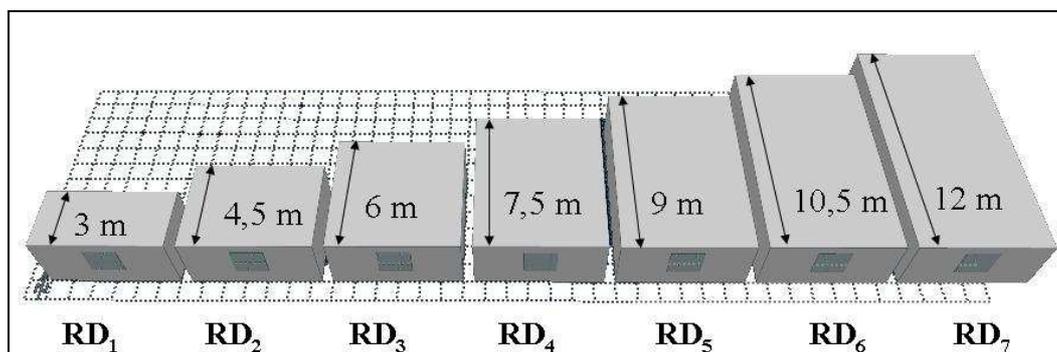
Figure 2.5. Dimensioni delle superfici vetrate assunte nel calcolo



### Profondità della zona

I valori di profondità adottati nel calcolo rappresentano diverse situazioni, variabili da ufficio singolo ad ufficio open-space. (figura 2.6)

Figure 2.6 – Profondità della zona di riferimento assunte nel calcolo

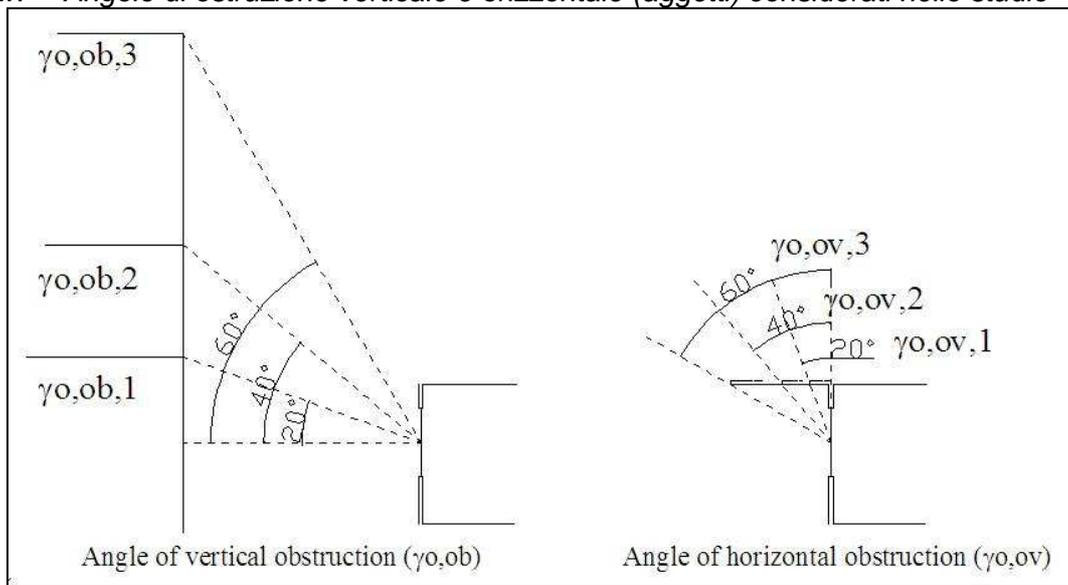


### Ostruzioni esterne

Sono state considerate sia ostruzioni esterne prodotte da edifici posti di fronte alla zona considerate, sia ostruzioni prodotte da aggetti orizzontali assimilabili a sistemi fissi di schermatura solare o a balconi.

In entrambi i casi l'angolo di ostruzione, calcolato dal baricentro della superficie vetrata varia tra  $0^\circ$  e  $60^\circ$ . (figura 2.7)

Figure 2.7 – Angolo di ostruzione verticale e orizzontale (aggetti) considerati nello studio



In totale sono state identificate 69 differenti configurazioni. La tabella 2.11 presenta un quadro sinottico delle configurazioni che sono state calcolate rispettivamente con il metodo della norma UNI EN 15193 e con il software Daysim.

Tabella 2.11 – Configurazioni simulate. “N” e “D” indicano rispettivamente che la configurazione è stata simulata con il metodo di calcolo della normativa o con il software Daysim

PROFONDITA' DELL'AMBIENTE								
Assenza di ostruzione esterna								
	RD <sub>1</sub>	RD <sub>2</sub>	RD <sub>3</sub>	RD <sub>4</sub>	RD <sub>5</sub>	RD <sub>6</sub>	RD <sub>7</sub>	
A <sub>g,1</sub>	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
A <sub>g,2</sub>	N	N	N	N	N	N	N	N
A <sub>g,3</sub>	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
VERTICAL EXTERNAL OBSTRUCTIONS								
	RD <sub>2</sub>				RD <sub>5</sub>			
	$\gamma_{o,ob,0}^*$	$\gamma_{o,ob,1}$	$\gamma_{o,ob,2}$	$\gamma_{o,ob,3}$	$\gamma_{o,ob,0}^*$	$\gamma_{o,ob,1}$	$\gamma_{o,ob,2}$	$\gamma_{o,ob,3}$
A <sub>g,1</sub>	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
A <sub>g,2</sub>	N	N	N	N	N	N	N	N
A <sub>g,3</sub>	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
HORIZONTAL EXTERNAL OVERHANGINGS								
	RD <sub>2</sub>				RD <sub>5</sub>			
	$\gamma_{o,ov,0}^*$	$\gamma_{o,ov,1}$	$\gamma_{o,ov,2}$	$\gamma_{o,ov,3}$	$\gamma_{o,ov,0}^*$	$\gamma_{o,ov,1}$	$\gamma_{o,ov,2}$	$\gamma_{o,ov,3}$
A <sub>g,1</sub>	N	N	N	N	N	N	N	N
A <sub>g,2</sub>	N	N	N	N	N	N	N	N
A <sub>g,3</sub>	N	N	N	N	N	N	N	N

\*  $\gamma_{o,ob,0}$  and  $\gamma_{o,ov,0}$  corresponding to 0° of external obstruction

## 2.4.2 Risultati

L'obiettivo dello studio è verificare come influiscono le caratteristiche dell'edificio sul fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale. Nei grafici che seguono vengono rappresentati, in termini relativi, i dati di fabbisogno calcolati, con il metodo della norma e con Daysim. In figura 2.8 sono rappresentati i dati stimati al variare della superficie vetrata e del sistema di controllo, in funzione della profondità della zona considerata, mentre nelle figura 2.9 e 2.10 sono riportati i risultati ottenuti, per diverse superfici vetrate, sistemi di controllo e profondità delle zone in

funzione dell'angolo di ostruzione esterna. I dati di LENI sono stati normalizzati nell'ambito di ciascun gruppo di simulazioni.

Per quanto riguarda l'angolo di ostruzione vengono riportati solo i risultati relativi alle simulazione delle ostruzioni verticali poiché applicando il metodo della normativa i risultati di LENI in presenza di ostruzioni orizzontali corrispondono, a pari angolo di ostruzione, a quelli ottenuti con l'ostruzione verticale.

Figura 2.8 – LENI normalizzato, calcolato in funzione della profondità della zona

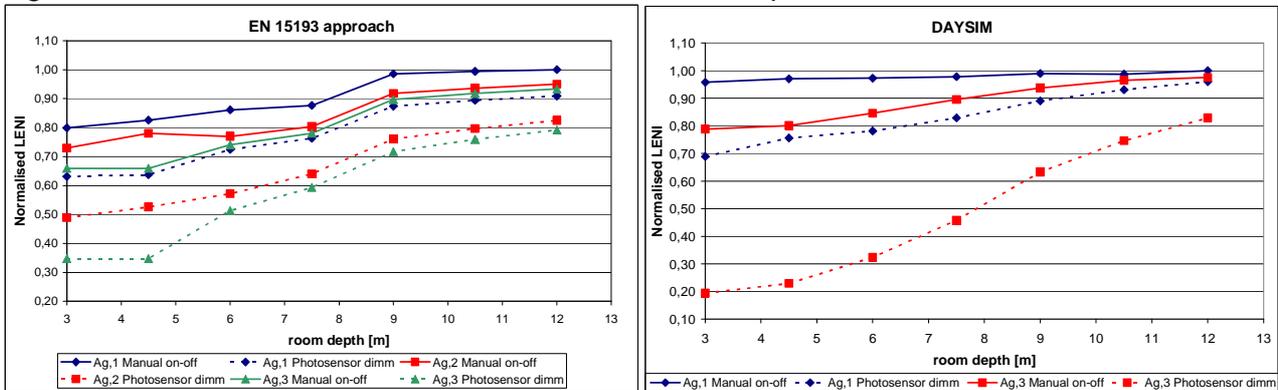
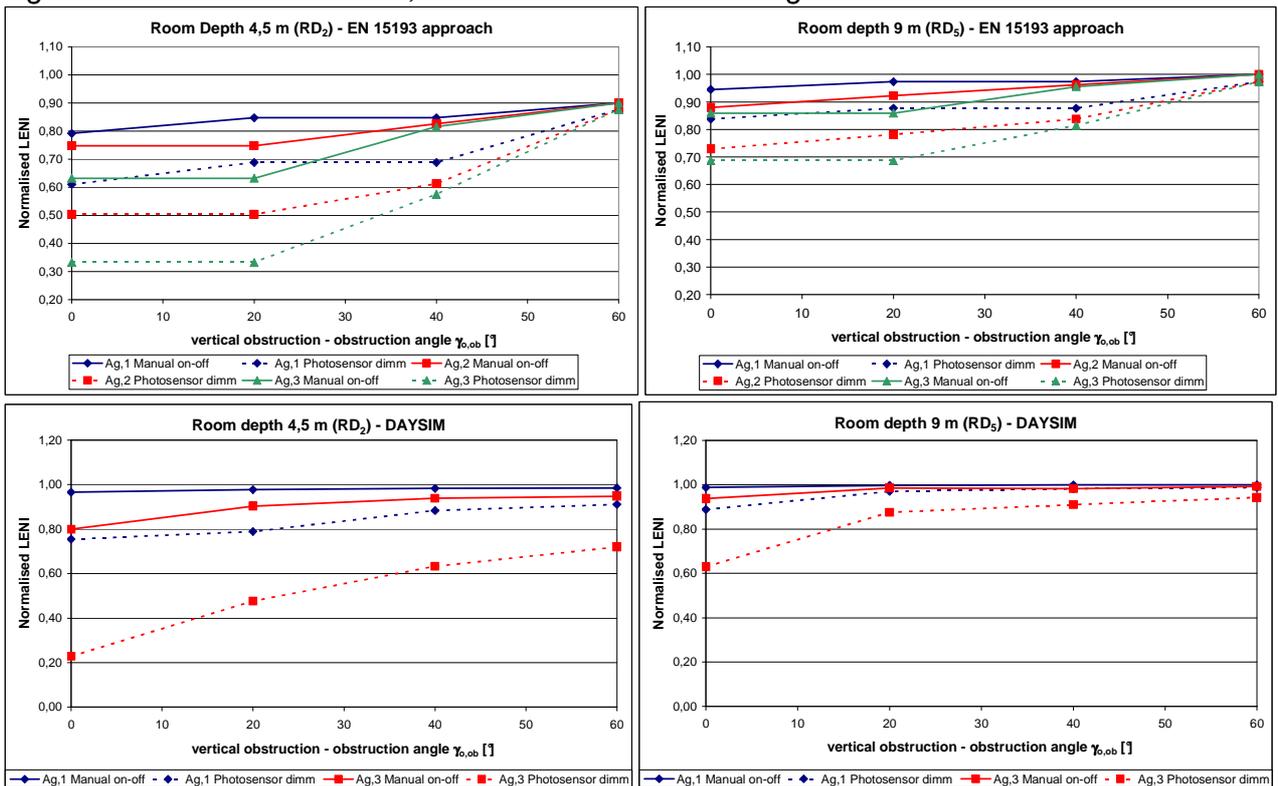


Figura 2.9 – LENI normalizzato, calcolato in funzione dell'angolo di ostruzione verticale



Come è lecito aspettarsi, con entrambi i metodi di calcolo, si sono riscontrati valori di fabbisogno per l'illuminazione maggiori all'aumentare della profondità degli ambienti, al diminuire della superficie vetrata e in presenza di un sistema di controllo solo manuale. Tuttavia emerge anche come l'incremento nella profondità dell'ambiente abbia un impatto maggiore se associato alla presenza di una superficie vetrata ampia e ad un sistema di integrazione automatica della luce naturale e artificiale. In base ai calcoli effettuati utilizzando il metodo della normativa, passare da un profondità di 3 m ad una di 12 m in un ufficio con superficie vetrata piccola ( $A_{g,1}$ ) e sistema di controllo manuale implica una variazione relativa del LENI di + 25%, mentre in presenza di una superficie vetrata ampia e un controllo automatico della luce l'incremento di profondità da 3 m a 12 m implica una differenza relativa del LENI di + 128%.

Una tendenza analoga si riscontra nei dati calcolati utilizzando il software Daysim. In questo caso l'influenza della profondità dell'ambiente sull'incremento del fabbisogno, quando si sia in presenza di superfici vetrate ampie e controllo automatico, risulta ulteriormente incrementata: passando da una profondità di 3 m ad una di 12 m la differenza relativa del LENI è pari a + 327%.

Considerazioni analoghe possono essere effettuate in seguito all'analisi dei dati calcolati al variare dell'angolo di ostruzione esterna. Il LENI aumenta all'aumentare dell'angolo di ostruzione, della profondità dell'ambiente, al diminuire della superficie vetrata e in presenza di un sistema di controllo solo manuale. Anche in questo caso l'influenza delle ostruzioni esterne varia al variare delle altre caratteristiche della zona. In situazioni in cui la disponibilità di luce naturale interna risulta già scarsa (ad esempio in presenza di piccole superfici vetrate e ambienti profondi) l'incremento relativo del LENI all'aumentare dell'angolo di ostruzione assume valori di molto inferiori rispetto a un pari incremento per ambienti potenzialmente ricchi di luce naturale interna (ambienti con superfici vetrate ampie e poco profondi). Ancora una volta una tendenza analoga ma ulteriormente accentuata si riscontra dall'elaborazione dei dati calcolati con Daysim.

Una seconda fase di elaborazione dei dati è stata finalizzata a determinare la variazione percentuale del LENI al variare unitario della profondità della zona e al variare unitario dell'angolo di ostruzione esterno.

Applicando una regressione lineare a ciascun set di dati si sono derivate le equazioni necessarie. Le figure 2.11 e 2.12 mostrano, a titolo di esempio, le linee di tendenza ottenute al variare della profondità della zona e dell'angolo di ostruzione esterno. Da queste stesse equazioni è stato possibile determinare l'incremento percentuale del LENI per unità di incremento delle variabili considerate. (tabelle 2.12 e 2.13)

Figure 2.11. Linee di tendenza e corrispondenti equazioni ottenute dai dati relativi alla variazione della profondità della zona

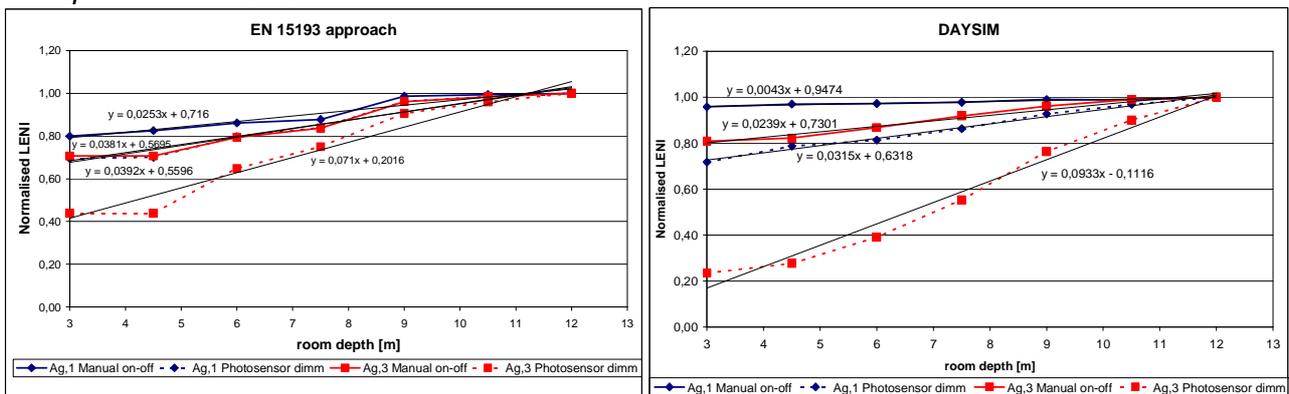


Figure 2.12. Linee di tendenza e corrispondenti equazioni ottenute dai dati relativi alla variazione dell'angolo di ostruzione esterna verticale

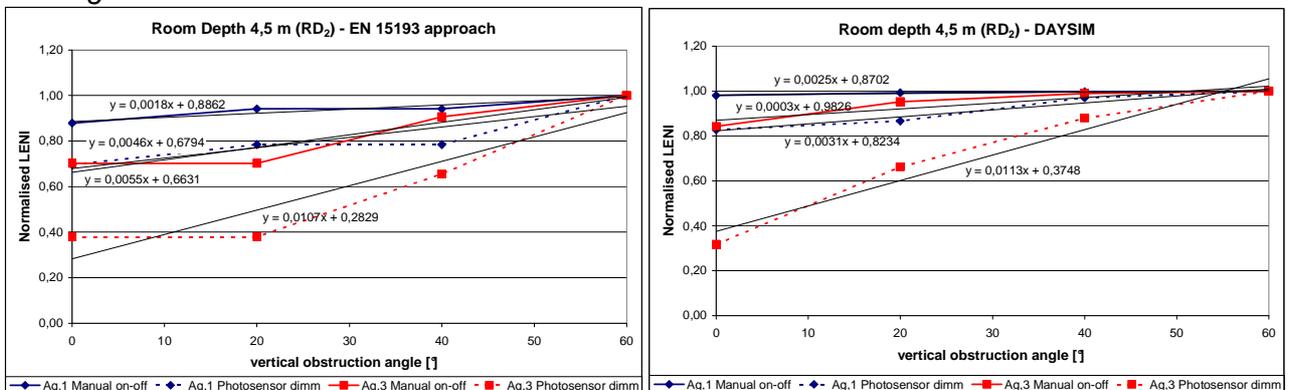


Tabella 2.12 –Incremento percentuale del LENI per incremento unitario dell'angolo di ostruzione esterna verticale[%/°].

OSTRUZIONE VERTICALE ESTERNA				
	EN 15193			
	RD <sub>2</sub>		RD <sub>5</sub>	
	on/off manuale	dimm. con fotosensore	on/off manuale	dimm. con fotosensore
A <sub>g,1</sub>	0,2%	0,5%	0,1%	0,2%
A <sub>g,2</sub>	0,3%	0,7%	0,2%	0,4%
A <sub>g,3</sub>	0,55%	1,1%	0,26%	0,5%
	DAYSIM			
	RD <sub>2</sub>		RD <sub>5</sub>	
	Manual on/off	dimm. con fotosensore	Manual on/off	dimm. con fotosensore
A <sub>g,1</sub>	0,03%	0,3%	0,02%	0,16%
A <sub>g,3</sub>	0,25%	1,1%	0,08%	0,52%

Tabella 2.12 –Incremento percentuale del LENI per incremento unitario della profondità della zona [%/m].

PROFONDITA' DELLA ZONA				
Assenza di ostruzioni esterne				
	EN 15193		DAYSIM	
	Manual on/off	dimm. con fotosensore	Manual on/off	dimm. con fotosensore
A <sub>g,1</sub>	2,5%	3,9%	0,43%	3,1 %
A <sub>g,2</sub>	2,8 %	5%	-	-
A <sub>g,3</sub>	3,8%	7,1%	2,4%	9,3%

### 2.4.3 Conclusioni

L'obiettivo delle analisi condotte è quello di fornire ad architetti e progettisti spunti e “regole del pollice” nella valutazione dei fabbisogni di energia elettrica per l'illuminazione, in relazione alle caratteristiche dell'edificio, dell'impianto di illuminazione e del tipo di sistema di controllo. Questi primi risultati non forniscono certamente un quadro esaustivo ma rappresentano un esempio di approccio per il raggiungimento dell'obiettivo.

Dai dati ottenuti è comunque possibile trarre alcune indicazioni, quali ad esempio la scarsa utilità ad utilizzare un sistema di integrazione automatico di luce naturale e artificiale in uffici open-space di medie dimensioni (9 m di profondità), con superfici vetrate ampie, ma in presenza di un'ostruzione verticale maggiore o uguale a 20°. Una scelta di questo genere porterebbe ad un risparmio (rispetto ad un controllo on/off manuale) di circa il 10%, mentre in assenza di ostruzione il guadagno salirebbe al 30%.

Alcune ulteriori considerazioni possono essere espresse in merito agli strumenti di calcolo. Il metodo della UNI EN 15193 è certamente molto semplificato e talvolta di difficile applicazione in relazione a quella che potrebbe essere la complessità del caso di studio. Daysim è viceversa più dettagliato, permette di simulare in modo più esaustivo l'architettura del caso di studio, ma anch'essa presenta alcune limitazioni e richiede un utilizzo da parte di utenti piuttosto esperti.

### **3. ATTIVITÀ SPERIMENTALE: MONITORAGGIO IN AMBIENTI ESISTENTI**

Di seguito vengono presentati alcuni casi di studio corrispondenti a sperimentazioni in campo per la valutazione delle prestazioni energetiche e ambientali e la verifica del grado di accettabilità da parte degli utenti di differenti sistemi di controllo dell'illuminazione naturale integrata con quella artificiale.

Il primo caso studio ha avuto come obiettivo la verifica delle prestazioni energetiche di un impianto di illuminazione dotato di un sistema di controllo automatico di base per l'integrazione della luce naturale e artificiale a confronto con un identico impianto a controllo manuale.

La sperimentazione è stata condotta in un edificio scolastico di scuola elementare ed il monitoraggio, che è stato condotto nell'arco di un intero anno solare, ha riguardato essenzialmente la misura dei consumi di energia elettrica relativi all'impianto di illuminazione artificiale tradizionale e con sistema di controllo.

Il secondo caso studio ha avuto come obiettivo quello di valutare le prestazioni energetiche ed ambientali di un sistema di building automation per il controllo dell'illuminazione artificiale.

Il sistema di controllo, installato presso gli uffici del Servizio Edilizia del Politecnico di Torino, è stato progettato ad hoc, utilizzando apparecchiature e dispositivi commerciali prodotti da differenti aziende ed aventi come elemento comune il protocollo di gestione standard Lon Works®.

Il monitoraggio condotto nell'arco di un anno solare ha riguardato essenzialmente la misura dei consumi di energia elettrica, mentre sporadicamente sono state misurate le condizioni di illuminazione in ambiente e il grado di soddisfazione dell'utenza. Ulteriori dati sulla modalità di funzionamento del sistema sono stati desunti dalle informazioni registrate dal sistema stesso (percentuale di dimmeraggio degli apparecchi, illuminamento misurato dai fotosensori, interazione manuale degli utenti, etc.).

#### **3.1 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.

L'attività sperimentale in questa Scuola è stata possibile grazie alla collaborazione della Società IRIDE, che gestisce gli impianti di illuminazione delle Scuole della Città di Torino, e della Scuola stessa che ha permesso l'intervento sugli impianti e l'installazione dell'attrezzatura necessaria al monitoraggio dei consumi di energia elettrica degli impianti di illuminazione delle aule singolarmente (un contatore di energia attiva a monte dell'impianto di illuminazione di ciascuna delle aule considerate).

##### **3.1.1 Descrizione del caso studio**

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 figura 3.1 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 (fig 3.2).

Entrambe le aule presentano lo stesso impianto di illuminazione ma nell'aula verso ovest è attivo il sistema di controllo automatico dell'illuminazione artificiale, mentre nell'aula verso est il controllo della luce è esclusivamente manuale.

Figura 3.1 – Collocazione planimetrica dell'edificio scolastico

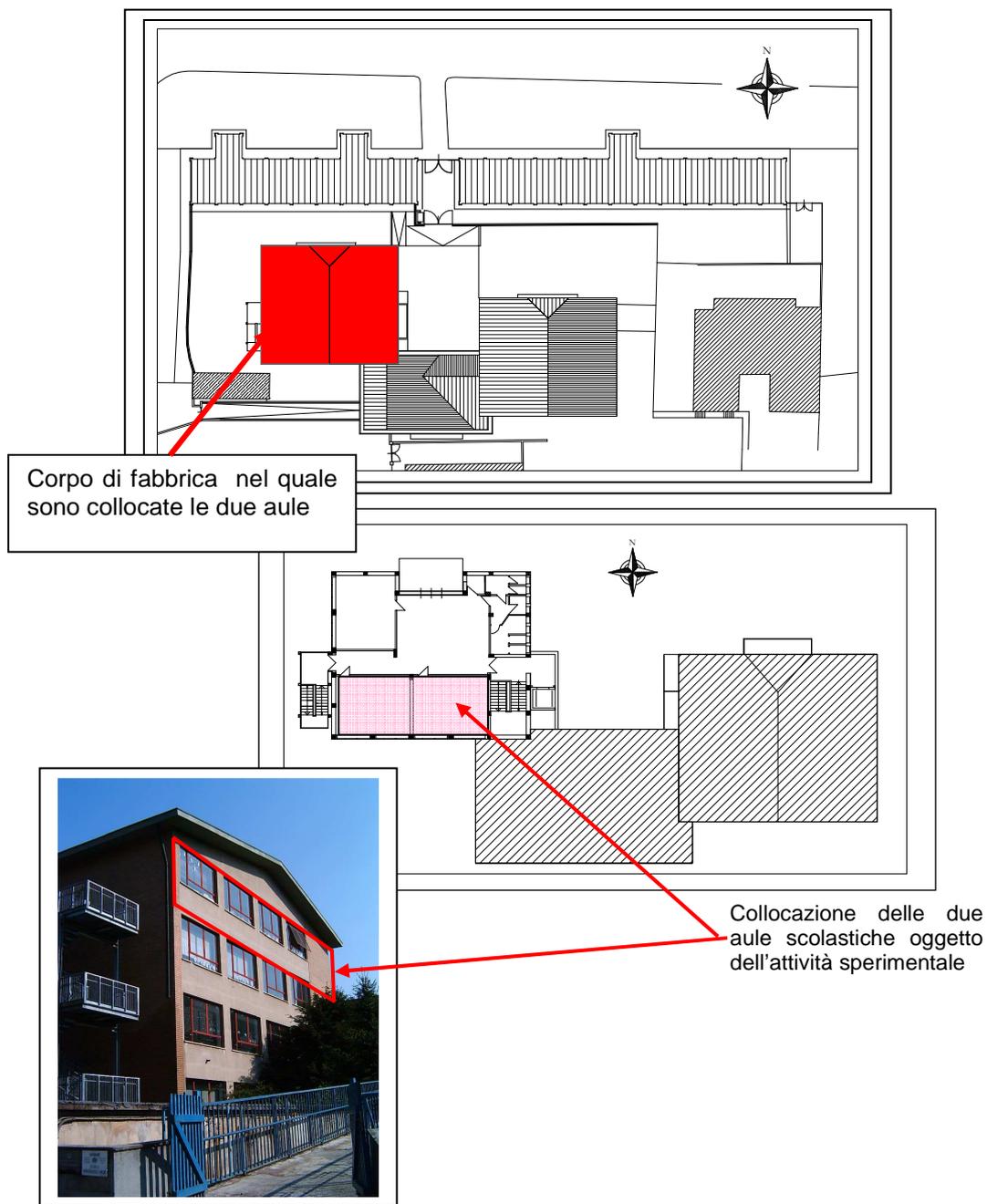


Figura 3.2 – Il sistema di schermatura interno



Le due aule, oltre ad essere adiacenti sono caratterizzate da un profilo di occupazione e da un'attività analoga, anche se risulta impossibile garantire una perfetta corrispondenza in ogni istante dell'anno.

Alle maestre coinvolte nella sperimentazione è stata spiegata la finalità della stessa; ciononostante gli si è richiesto di mantenere un normale comportamento di interazione sia con l'impianto di illuminazione artificiale sia con i sistemi di schermatura solare.

### **3.1.2 Descrizione del sistema di controllo e gestione**

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.

QUICKTRONIC® DIM MULTI 2, appartiene alla tipologia dei sistemi "closed loop", in quanto gestisce l'illuminazione artificiale tenendo contemporaneamente conto del contributo in ambiente sia della luce naturale che artificiale.

Nelle due aule scolastiche, l'impianto di illuminazione artificiale è costituito da 6 apparecchi a plafone, che montano ciascuno 2 sorgenti fluorescenti lineari da 36 W e da 2 apparecchi sospesi in prossimità della lavagna, che montano ciascuno 1 sorgente fluorescente lineare da 36 W. Solo i 6 apparecchi destinati all'illuminazione generale dell'aula, disposti secondo due file parallele alla finestra, sono regolati per mezzo del sistema di controllo mentre gli altri due sono predisposti per una gestione separata di tipo manuale.

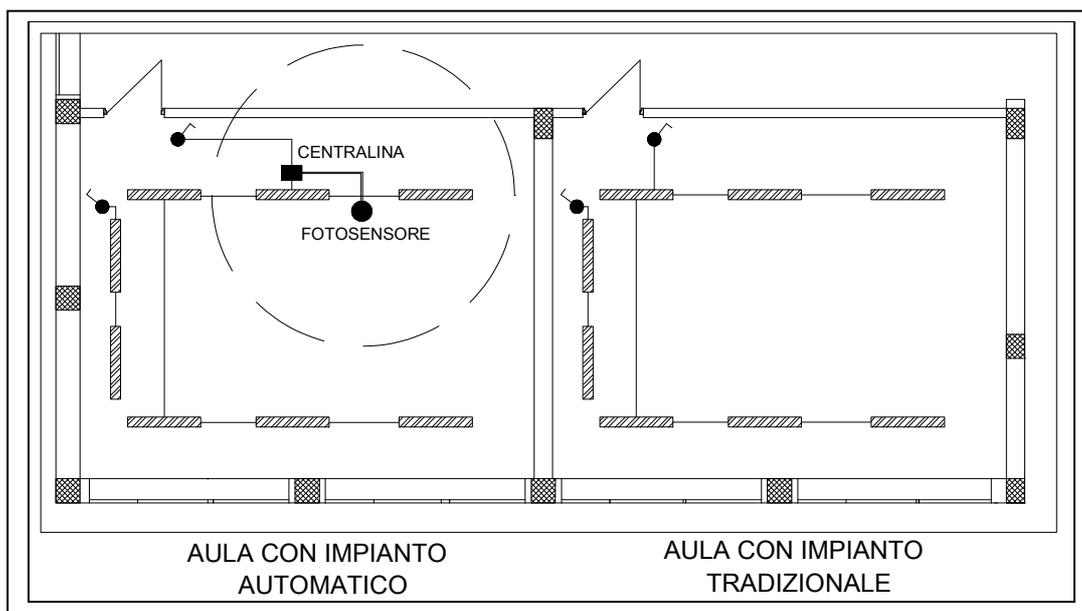
Il sistema di controllo è stato configurato in automatico per l'accensione e lo spegnimento attraverso un sensore misto occupazione più fotosensore. Il sensore è collocato a plafone, in prossimità della fila di apparecchi più distante dalla superficie vetrata, e regola contemporaneamente tutti gli apparecchi 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.

Nella figura 3.3 si riporta il cablaggio dell'impianto presente nelle due aule oggetto di analisi.

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.

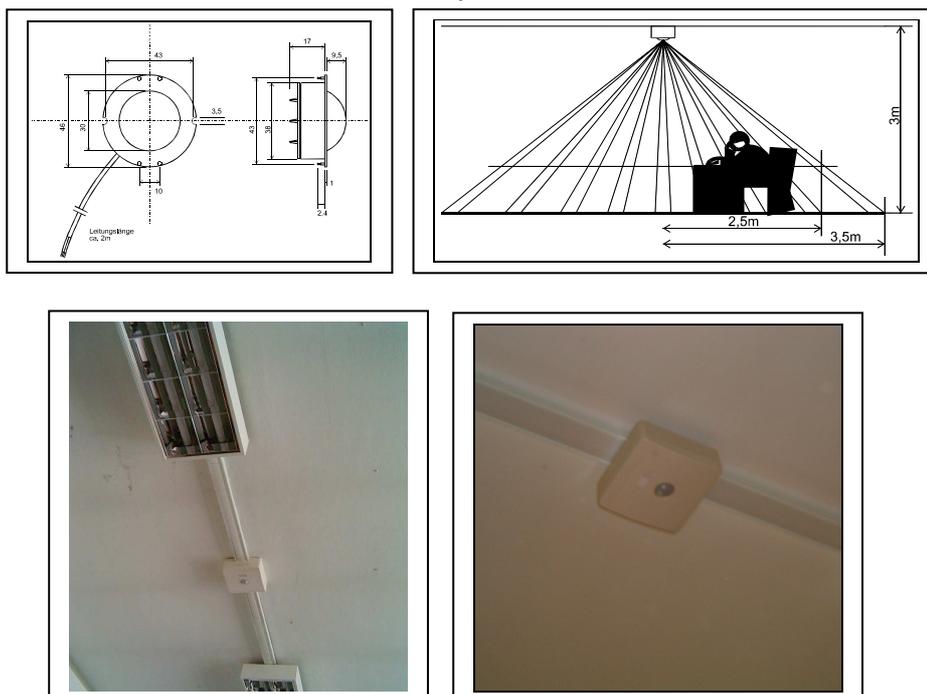
Figura 3.3 - Cablaggio elettrico e di segnale delle due aule



Descrizione dei dispositivi attivi installati

Il dispositivo attivo di controllo è un sensore misto costituito da un sensore di occupazione (con tecnologia ad infrarossi) e fotosensore di tipo closed loop che presenta una modalità di lettura su piano orizzontale, ed ha una sensibilità compresa tra 20-1000 lx. In seguito all'accensione il fotosensore entra in funzione dopo pochi istanti e regola l'illuminazione artificiale tra 100% ed il 10%, mentre, al superamento del valore di soglia di luminosità, determina lo spegnimento delle lampade dopo un tempo di ritardo di 10 minuti. Quando le condizioni di illuminazione in ambiente scendono poco al di sotto del valore di soglia il fotosensore riaccende immediatamente gli apparecchi. In assenza di utenti il sensore di occupazione spegne gli apparecchi di illuminazione. La sua capacità di rilevamento copre un angolo di 130° e se installato ad una altezza di 3 metri ha una capacità di lettura di 7 metri di diametro.

Figura 3.4 – Sensore misto: dimensioni, campo di lettura e collocazione in ambiente



Prima dell'inizio della campagna di misure il sensore misto è stato tarato per determinare il valore dell'illuminamento di soglia che deve essere garantito in ambiente.

Nella fase di programmazione del sistema di controllo, è stato predisposto il funzionamento di entrambi i sensori (fotosensore + sensore di occupazione) ma in realtà dopo un breve periodo di utilizzo dell'impianto le insegnanti dell'aula hanno fatto disattivare il sensore di occupazione richiedendo di poter utilizzare l'interruttore a rilascio per determinare l'on-off manuale.

Tale situazione si è resa necessaria in quanto il sensore di occupazione non leggeva correttamente la presenza degli utenti in ambiente e di conseguenza spegneva le luci durante lo svolgimento delle lezioni.

### 3.1.3 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 tabella 3.1 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).

Tabella 3.1 – Consumi di energia elettrica per l'illuminazione artificiale

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
<b>TOTALE CONSUMI ASSORBITI (kWh/anno)</b>	<b>345</b>	<b>247</b>

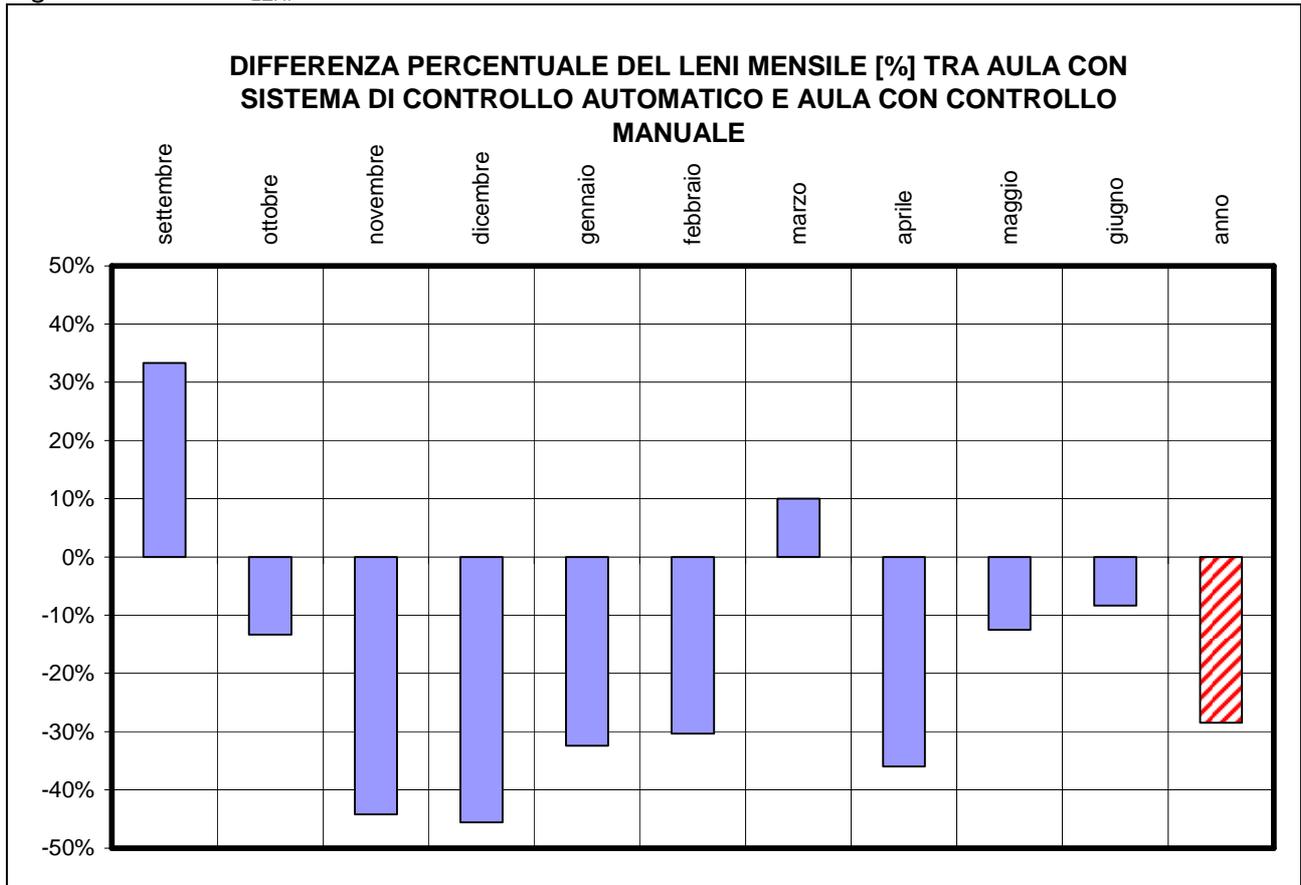
Il LENI (Lighting Energy Numerical Indicator) per le due aule risulta essere rispettivamente di 7,67 kWh/m<sup>2</sup>anno per l'aula con controllo dell'impianto esclusivamente manuale e di 5,49 kWh/m<sup>2</sup>anno per l'aula con sistema di integrazione automatica della luce naturale e artificiale.

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<sub>LENI</sub>, 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<sub>autodim</sub>) rispetto a quello con controllo esclusivamente manuale (LENI<sub>manual</sub>). Nella figura 3.5 sono riportati i valori di SAVE<sub>LENI</sub> mensili e annuale.

Figura 3.5 –  $SAVE_{LENI}$  mensile e annuale



### 3.1.4 Conclusioni

I risultati ottenuti dal monitoraggio dei consumi nelle due aule evidenzia un effettivo risparmio di energia elettrica in presenza del sistema di controllo automatico che integra la luce naturale con quella artificiale.

Su base annua il risparmio si attesta su un valore del 28%, mentre nel corso dell'anno, fatto salvo due mesi in cui la tendenza del  $SAVE_{LENI}$  risulta invertita, facendo registrare un maggior consumo per l'aula dotata di sistema di controllo, il risparmio mensile varia tra l'8% e il 46%.

E' importante considerare che, sia i valori di LENI, che i risparmi calcolati, fanno riferimento ai dati di consumo delle sole aule scolastiche, e quindi non possono essere considerati esaustivi del comportamento dell'intero edificio.

## 3.2 SISTEMA CENTRALIZZATO DI BUILDING AUTOMATION IN EDIFICIO PER UFFICI

Nel 2006 il Servizio Edilizia del Politecnico di Torino ha avviato una fase di ristrutturazione dei propri uffici con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici per l'illuminazione e la climatizzazione. L'intervento ha previsto la progettazione e l'installazione di un sistema di building automation per il controllo di questi due impianti tecnici, oltre alla sostituzione dell'impianto di illuminazione preesistente con apparecchi più coerenti con le esigenze funzionali e di qualità degli ambienti.

L'intervento si configura come un intervento pilota, nell'ottica di estendere successivamente la soluzione ad altre parti dell'edificio.

In questo contesto è stato possibile pianificare un'attività di supporto alla progettazione e successivamente di monitoraggio del funzionamento e delle prestazioni energetiche e ambientali degli impianti e del sistema di controllo.

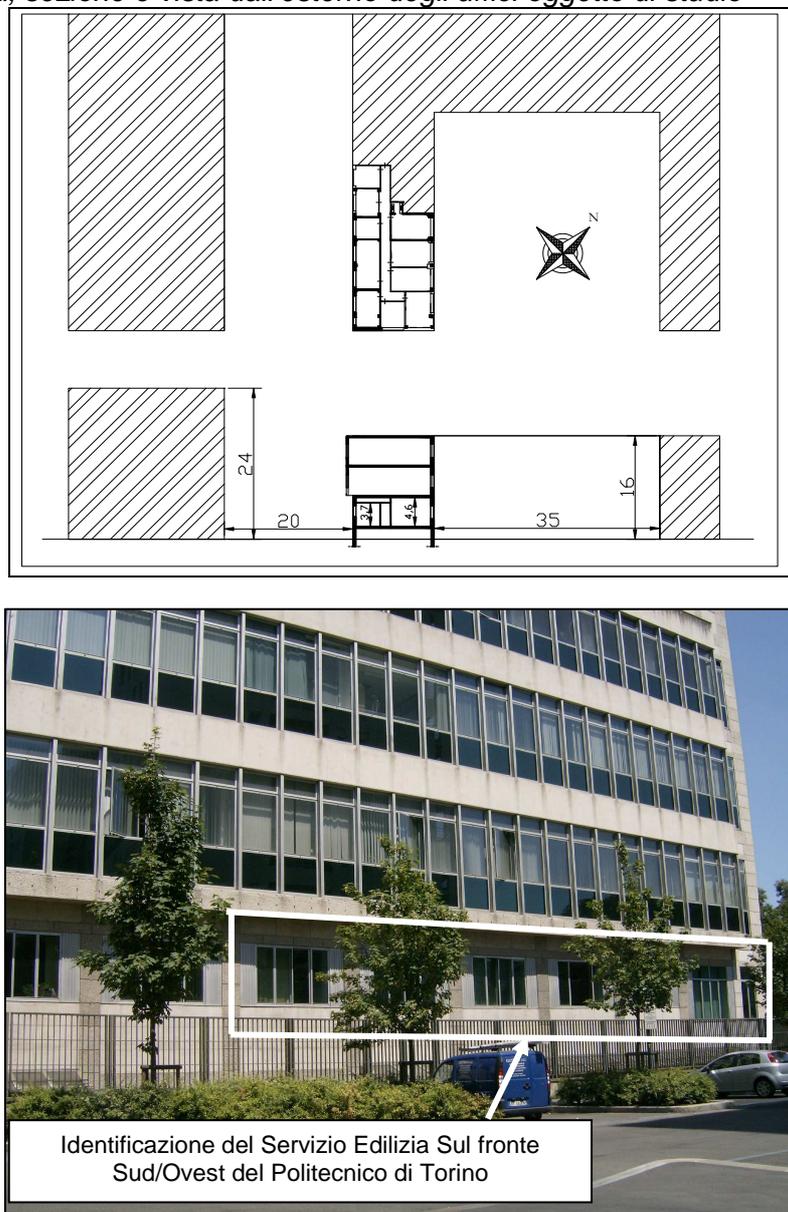
I principali obiettivi dello studio sono:

- verificare le prestazioni ambientali dell'impianto di illuminazione in presenza del sistema di controllo;
- verificare il funzionamento del sistema di controllo;
- valutare i consumi di energia elettrica imputabili all'impianto di illuminazione artificiale in seguito all'installazione del sistema di controllo;
- verificare la risposta dell'utenza al sistema ed il grado di accettazione finale.

### 3.2.1 Descrizione del caso di studio

Il progetto pilota di sistema di controllo è stato sviluppato per dieci uffici del Servizio Edilizia del Politecnico di Torino. Gli uffici sono collocati al piano terra dell'ala Sud/Est del Politecnico ed esposti a Sud/Ovest e a Nord/Est. Per entrambi gli affacci gli uffici presentano ostruzioni esterne dovute ad altri corpi di fabbrica che riducono la disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti (figura 3.6).

Figura 3.6 – Pianta, sezione e vista dall'esterno degli uffici oggetto di studio



Per semplificare la descrizione di tutti gli uffici, si riporta di seguito una tabella contenente alcune informazioni di carattere generale (tabella 3.2).

Tabella 3.2 – Sintesi dei dati dimensionali degli uffici oggetto di studio

ufficio	esposizione	Larghezza [m]	profondità [m]	altezza [m]	area di pavimento [m <sup>2</sup> ]	area della finestra [m <sup>2</sup> ]
1 & 3	Sud-Ovest	3.50	3.90	3.70	13.65	3.10 (ciascuno)
2	Sud-Ovest	4.40	3.90	3.70	17.16	3.10
4	Sud-Ovest	7.80	3.90	3.70	29.64	6.20
5	Sud-Ovest	6.00	3.90	4.60	23.40	5.34
6	Sud-Ovest	3.80	4.40	4.60	16.72	3.60
7	Nord-Est	6.50	4.20	4.60	23.52	5.34
8	Nord-Est	3.70	6.50	4.60	24.05	3.72
9 & 10	Nord-Est	4.10	6.50	4.60	26.65	3,72 (ciascuno)

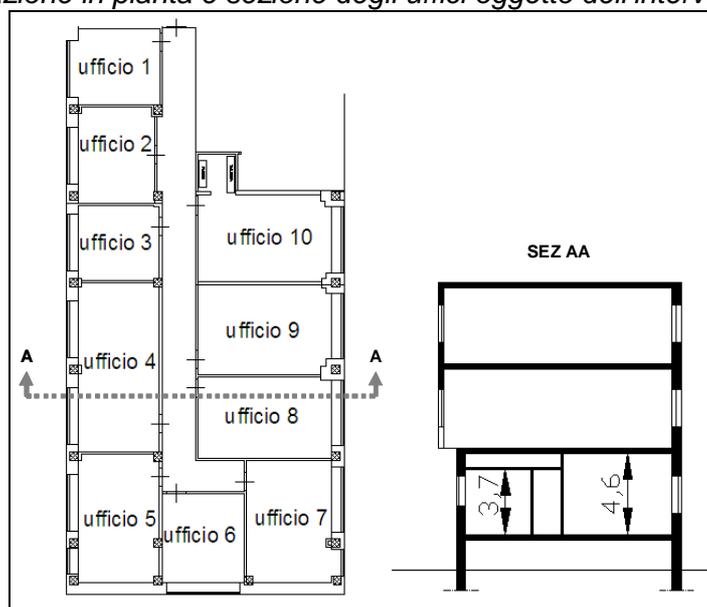
Le superfici vetrate, presentano dimensioni e caratteristiche differenti a seconda della loro collocazione rispetto all'esposizione. Per la schermatura della radiazione solare diretta sono presenti, internamente agli uffici, delle tende a bande verticali in tessuto, di colore grigio chiaro, la cui movimentazione è manuale.

**UFFICI A NORD:** ciascun ufficio presenta una unica superficie vetrata collocata sulla parete opposta all'ingresso dell'ufficio e caratterizzata da un serramento in alluminio con un vetro singolo chiaro. Le dimensioni della finestra sono 2,10 m di altezza per 3,00 m di larghezza.

**UFFICI A SUD ED A EST:** gli uffici presentano finestre con caratteristiche differenti, comunque collocate sulla parete opposta all'ingresso dell'ufficio e caratterizzate da un serramento in alluminio a taglio termico con vetro camera. Le dimensioni delle finestre sono differenti:

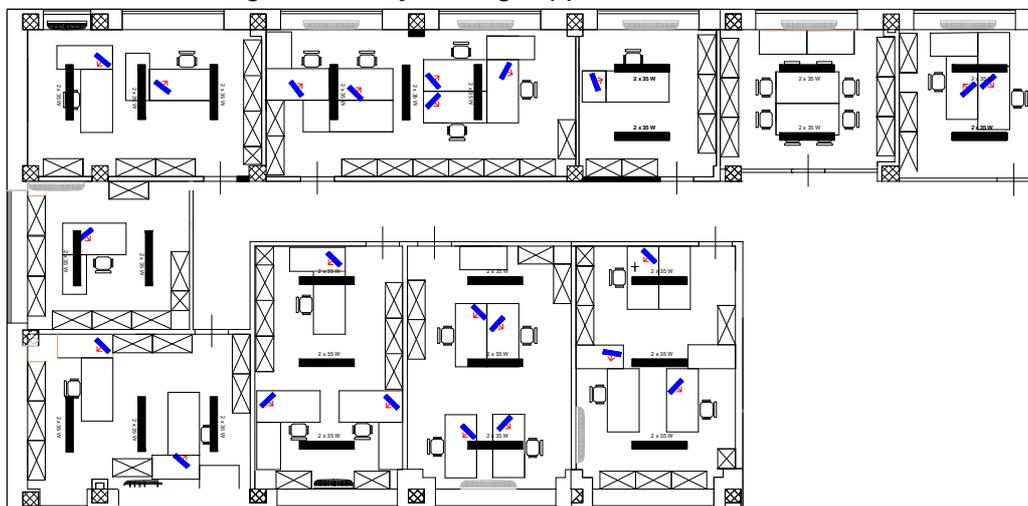
- per l'ufficio 6 (esposto a Sud/ Est) 1,70 m di altezza per 3,36 m di larghezza;
- per l'ufficio 5 (esposto a Sud/Ovest) una finestra di 2,10 m di altezza per 2,60 m di larghezza ed un'altra di 2,10 m di altezza per 1,20 m di larghezza;
- per i restanti uffici (esposti a Sud/Ovest) le dimensioni sono 1,70 m di altezza per 2,60 m. di larghezza.

Figura 3.7 – Individuazione in pianta e sezione degli uffici oggetto dell'intervento pilota



Gli apparecchi del nuovo impianto di illuminazione artificiale sono montati a sospensione (altezza di sospensione dal pavimento 3 m) e presentano emissione luminosa mista (diretta ed indiretta). Ciascuno è equipaggiato con due sorgenti fluorescenti lineari da 35 W e reattore elettronico dimmerabile digitale DALI. Nella figura 3.8 è presentata la collocazione degli apparecchi negli uffici.

Figura 3.8 – Allestimento degli uffici e layout degli apparecchi di illuminazione



### 3.2.2 Descrizione del sistema di controllo e gestione

Il sistema di automazione installato negli uffici appartiene alla tipologia dei sistemi centralizzati di building automation, ed è stato pensato per gestire due differenti tipologie di impianti:

- l'impianto di illuminazione artificiale (apparecchi con reattore elettronico digitale dimmerabile);
- l'impianto di climatizzazione (ventilconvettori).

Il sistema inoltre è stato progettato per consentire il monitoraggio, attraverso la visualizzazione e/o la memorizzazione, di alcune variabili quali ad esempio:

- stato di presenza e/o assenza degli utenti nell'ufficio;
- set point previsto per l'illuminamento da garantire in ambiente;
- emissione luminosa degli apparecchi (% della tensione dimmerata);
- illuminamento letto dal fotosensore;
- temperatura letta in ambiente dal sensore;
- set point previsto per la temperatura da mantenere in ambiente;
- modalità di funzionamento del sistema (automatico o manuale);
- etc.

Il protocollo di gestione utilizzato è il Lon Works® che consente un interfacciamento con qualsiasi altro tipo di impianto, anche di differente livello. Nel caso specifico il sistema di gestione si interfaccia con l'impianto di illuminazione artificiale (per la sola regolazione, on-off e dimm) attraverso il protocollo DALI.

Il sistema di controllo è stato progettato in relazione alle esigenze specifiche degli uffici e per quanto riguarda la regolazione automatica dell'illuminazione artificiale le strategie di controllo adottate sono:

- controllo in base alla presenza degli utenti (sensori di occupazione);
- controllo in base alla presenza di luce diurna (fotosensori closed loop).

E' comunque possibile interagire manualmente per bypassare i comandi del sistema mediante interruttori a rilascio on/off posti all'ingresso degli uffici.

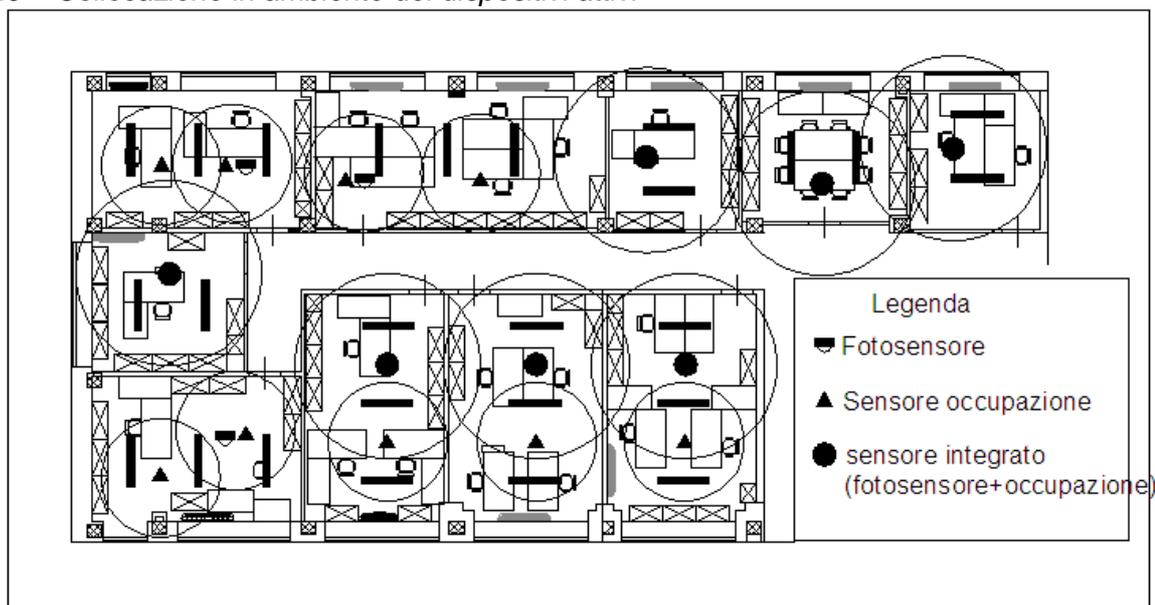
L'architettura del sistema è ad intelligenze distribuite, pertanto tutti i componenti presenti sulla rete dell'impianto sono in grado di svolgere la propria funzione in modalità stand alone, scambiando le informazioni relative allo stato degli uffici attraverso il protocollo di gestione dati Lon Works®, e quindi attuando le modifiche previste dalla programmazione.

Il numero di dispositivi di controllo presenti negli uffici dipende dalle dimensioni dell'ambiente. Nella tabella 3.2 è indicato il numero e la tipologia dei dispositivi installati per il controllo dell'illuminazione in ciascun ufficio mentre nella figura 3.9 è indicata la loro collocazione in ambiente.

Tabella 3.2 – Dispositivi attivi e passivi distribuiti negli ambienti

Numero Ufficio	DISPOSITIVI PASSIVI	DISPOSITIVI ATTIVI		
	Interruttore a rilascio on/off	Sensore misto (fotosensore + occupazione)	Sensore di occupazione	Fotosensori
1	1	1	/	/
2	1	1	/	/
3	1	1	/	/
4	1	/	2	1
5	1	/	2	1
6	1	1	/	/
7	1	/	2	1
8	1	1	1	/
9	1	1	1	/
10	1	1	1	/

Figura 3.9 – Collocazione in ambiente dei dispositivi attivi



Descrizione dei dispositivi attivi di controllo della luce artificiale

**Fotosensore LRA 1** (ditta Thermokon) presenta una modalità di lettura su piano orizzontale ed ha una sensibilità massima di 2000 lx (sistema closed loop).

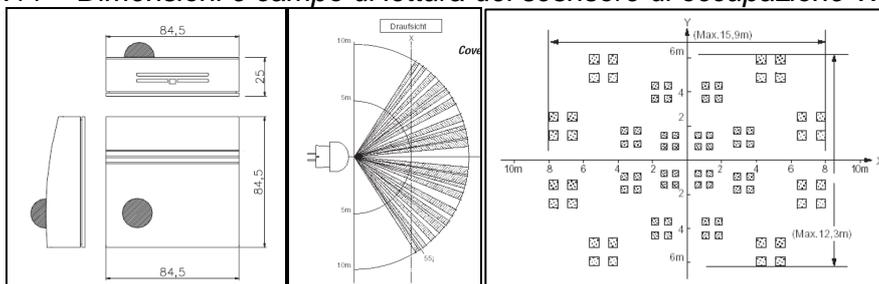
Se l'impianto di illuminazione è acceso dal sensore di occupazione, il fotosensore entra in funzione dopo pochi istanti e regola l'illuminazione artificiale dimmerandola tra 100% ed il 10% ed al superamento del valore di soglia di luminosità, determina lo spegnimento delle lampade dopo un tempo di ritardo di 5 minuti. Quando le condizioni luminose scendono poco al di sotto del valore di soglia, il fotosensore riaccende immediatamente gli apparecchi di illuminazione artificiale. Le caratteristiche dimensionali e la risposta spettrale del fotosensore sono riportate nella figura 3.10.

Figura 3.10 – Dimensioni e risposta spettrale del fotosensore LRA1



**Sensore di occupazione WRF 041** (ditta Thermokon) presenta una modalità di lettura su piano orizzontale con tecnologia di rilevamento ad infrarosso. L'angolo massimo del campo di lettura è 100°. Il tempo di ritardo dello spegnimento può essere previsto tra 1s e 30 minuti (Figura 3.11)

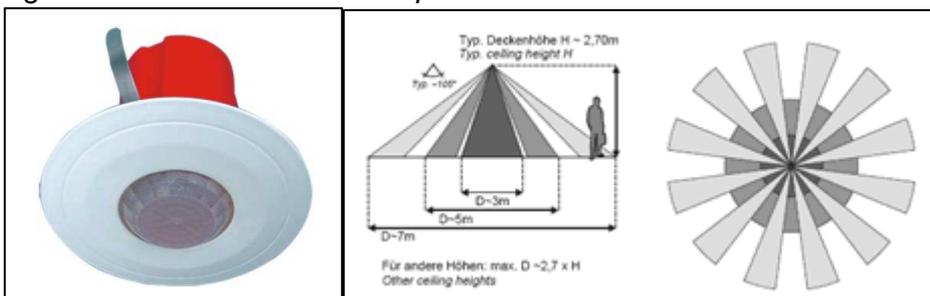
Figura 3.11 – Dimensioni e campo di lettura del sensore di occupazione WRF 041



**Sensore misto MDS** (sensore di occupazione e fotosensore) (ditta Thermokon) il sensore di occupazione presenta una modalità di lettura su piano orizzontale a 360° con tecnologia di rilevamento ad infrarosso, ha una capacità di lettura entro 7 metri se installato a plafone o ad incasso ad una altezza di 3.2 m. Il tempo di ritardo dello spegnimento può essere previsto tra 1s e 30 minuti.

La fotocellula integrata presenta una modalità di lettura su piano orizzontale con una sensibilità massima di 1000 lx (sistema closed loop). Quando l'impianto di illuminazione è acceso dal sensore di occupazione, il fotosensore entra in funzione dopo pochi istanti e regola l'illuminazione artificiale dimmerandola tra 100% ed il 10% ed al superamento del valore di soglia di luminosità, determina lo spegnimento delle lampade dopo un tempo di ritardo di 5 minuti.

Figura 3.12 – Dimensioni e campo di lettura del sensore di misto MDS



Tutti i dispositivi di controllo attivi (sensori) sono stati installati a sospensione ad una altezza di 2,90 m dal pavimento, al di sotto quindi degli apparecchi di illuminazione per evitare influenze dovute all'emissione luminosa degli apparecchi (nel caso dei fotosensori) e al calore emesso dall'apparecchio stesso (nel caso del sensore di occupazione)

Figura 3.13 - Collocazione in ambiente di un sensore misto



Per quanto riguarda il controllo della luce artificiale il sistema presenta un numero totale di 19 dispositivi e tre centraline di controllo LON/DALI.

La messa in funzione e la calibrazione del sistema è avvenuta nel tempo in tre diverse fasi:

- durante la prima fase gli apparecchi di illuminazione potevano essere controllati solo manualmente mediante gli interruttori posti a parete all'ingresso di ogni ufficio. Questa fase di collaudo dell'impianto di illuminazione è durata dal 10 aprile 2007 all'11 maggio 2007;
- durante la seconda fase è stato invece calibrata e testata la modalità di funzionamento automatico del sistema di controllo: gli apparecchi venivano accesi, spenti e regolati automaticamente mediante i dispositivi attivi, mentre il comando manuale risultava inibito. Questa fase di calibrazione è durata dal 16 luglio 2007 al 17 agosto 2007;
- con la terza fase ha avuto inizio il funzionamento definitivo, e quindi, automatico e manuale del sistema di controllo. Questa fase ha avuto inizio il 16 Gennaio 2008.

Il monitoraggio delle condizioni ambientali ha avuto luogo, con modalità differenti, in tutte e tre le fasi e risulta tutt'ora in corso.

### 3.2.3 Descrizione della campagna di monitoraggio

Durante le tre fasi di messa in funzione del sistema di controllo sono state registrate diverse informazioni e grandezze nell'ottica di valutare le condizioni di illuminazione ambientale, il funzionamento dell'impianto, i consumi di energia elettrica e le risposte degli utenti.

Per quanto riguarda le condizioni ambientali, è stato monitorato, in alcuni periodi e con un intervallo di misura di dieci minuti, l'illuminamento sul piano di lavoro di alcuni uffici.

I consumi di energia elettrica per l'illuminazione funzionale e parassita dei dieci uffici sono stati monitorati a partire dalla messa in funzione definitiva del sistema di controllo e risultano disponibili da marzo 2008. Anche in questo caso l'intervallo di acquisizione del dato è di 10 minuti.

Lo stato di funzionamento del sistema di controllo è stato monitorato durante la seconda e la terza fase. Sempre con intervallo di 10 minuti sono stati acquisiti, attraverso il sistema di controllo stesso, lo stato di funzionamento degli apparecchi (acceso, spento, percentuale di regolazione del flusso luminoso, funzionamento in automatico o in manuale). Inoltre, durante la prima fase di messa in funzione dell'impianto, in presenza di controllo solo manuale, è stato chiesto agli utenti di compilare una scheda in cui doveva essere segnalato quando gli apparecchi venivano accesi e spenti.

Oltre alle misure quantitative è stato distribuito, un questionario per verificare la risposta degli utenti in seguito alle diverse fasi di messa in funzione dell'impianto.

### 3.2.4 Risultati

Di seguito vengono descritti i risultati ottenuti rispetto ad alcuni degli obiettivi dello studio: la verifica delle prestazioni ambientali di illuminazione, la verifica del funzionamento del sistema di controllo e la verifica delle prestazioni energetiche dell'impianto di illuminazione.

#### 3.2.4.1 Prestazioni ambientali di illuminazione

La prestazione ambientale del sistema di illuminazione è stata monitorata utilizzando un luxmetro con acquisitore, posizionato sul piano orizzontale delle scrivanie.

L'illuminamento di riferimento è stato in alcuni casi modificato nel tempo; l'impianto di illuminazione è stato infatti progettato per garantire un illuminamento medio mantenuto di 500 lux, ma, in seguito alla messa in funzione del controllo automatico, alcuni utenti hanno chiesto di settare diversamente il valore di soglia nei propri uffici.

Nei grafici che seguono (figure 3.14 e 3.15) sono rappresentati i dati di illuminamento misurati sul piano delle scrivanie negli uffici n° 10 e n° 5, durante l'orario lavorativo (dalla 8,00 alle 18,00), e in corrispondenza di due periodi di misura nella fase di controllo manuale e automatico/manuale. La linea spessa corrisponde al valore di illuminamento di soglia considerato nei diversi casi.

Inoltre, nelle figure 3.16 e 3.17 viene riportata la distribuzione in frequenza e la frequenza cumulate dei valori di illuminamento misurati

E' importante sottolineare che i dati sono riferiti a diversi periodi dell'anno: primavera per quanto riguarda il controllo manuale e inverno per i dati riferiti al sistema di controllo nella sua modalità finale di funzionamento (automatica + manuale)

Figure 3.14 - Controllo manuale. Illuminamenti misurati sulla scrivania nel periodo dal 10/04/07 al 11/05/07

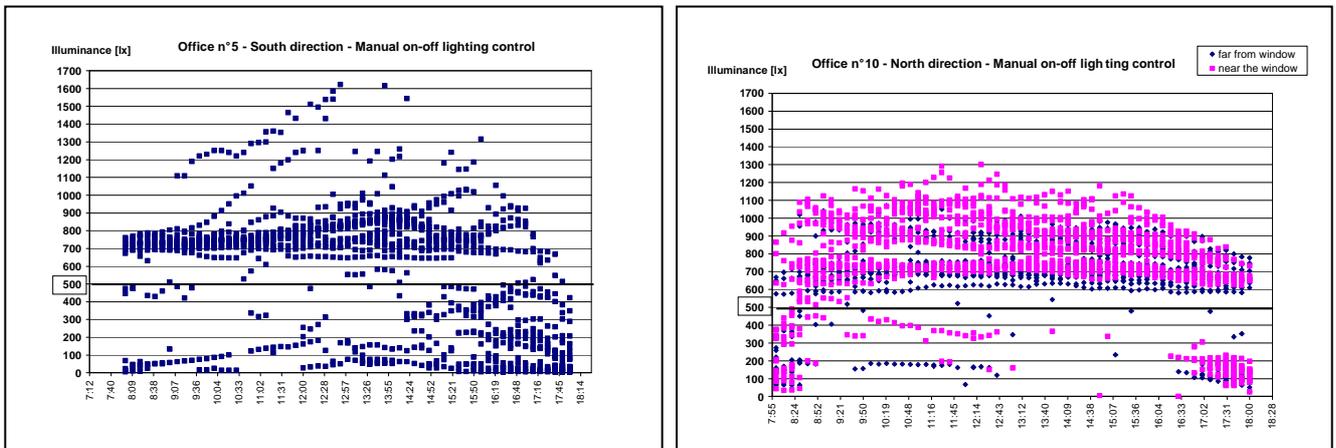


Figure 3.15 - Controllo automatico & manuale. Illuminamenti misurati sulla scrivania nel periodo dal 16/01/08 to 14/03/08

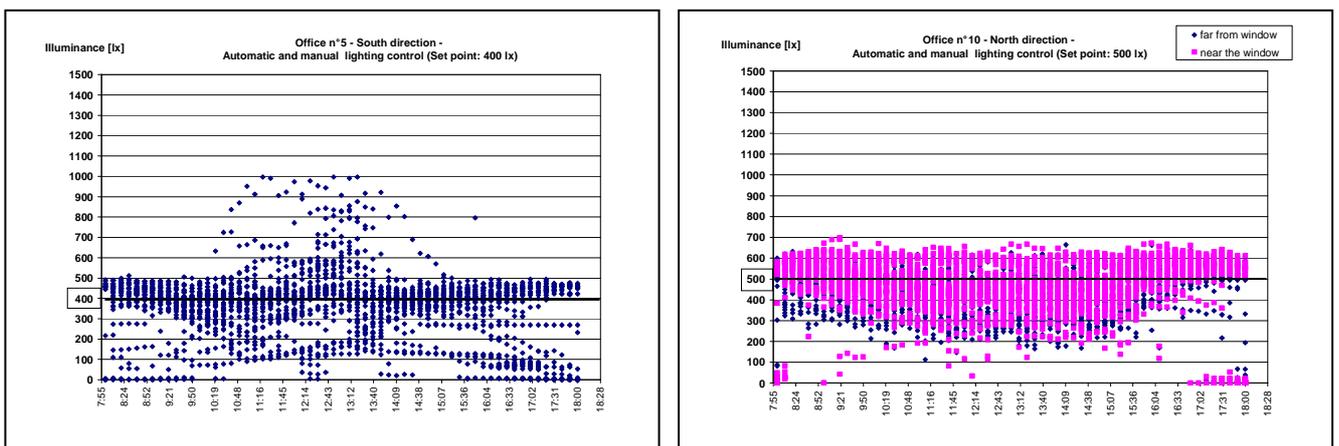


Figure 3.16: Controllo manuale. Distribuzione di frequenza e frequenza cumulata dell'illuminamento (dal 10/04/07 al 11/05/07)

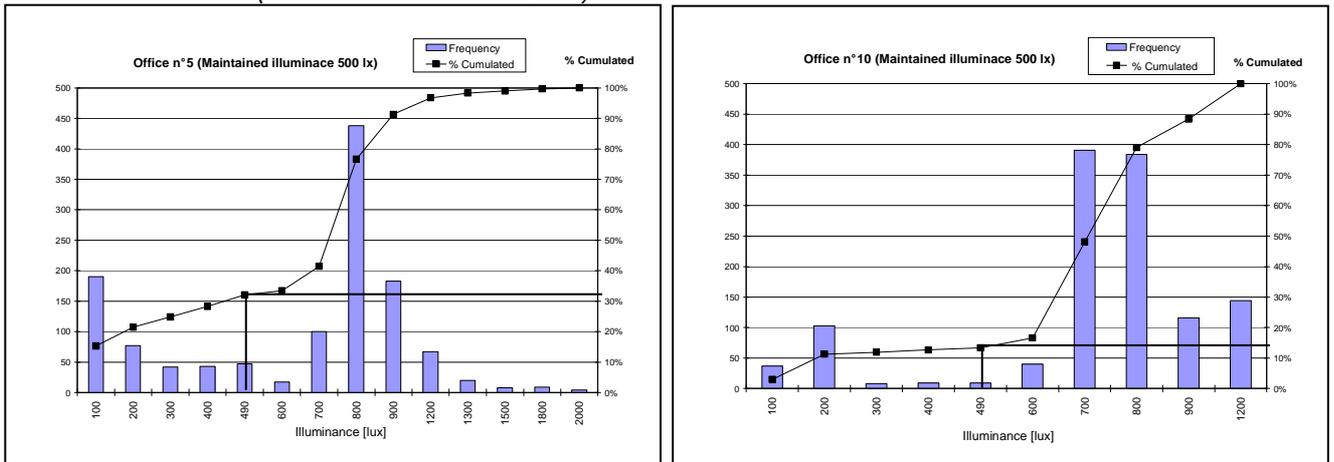
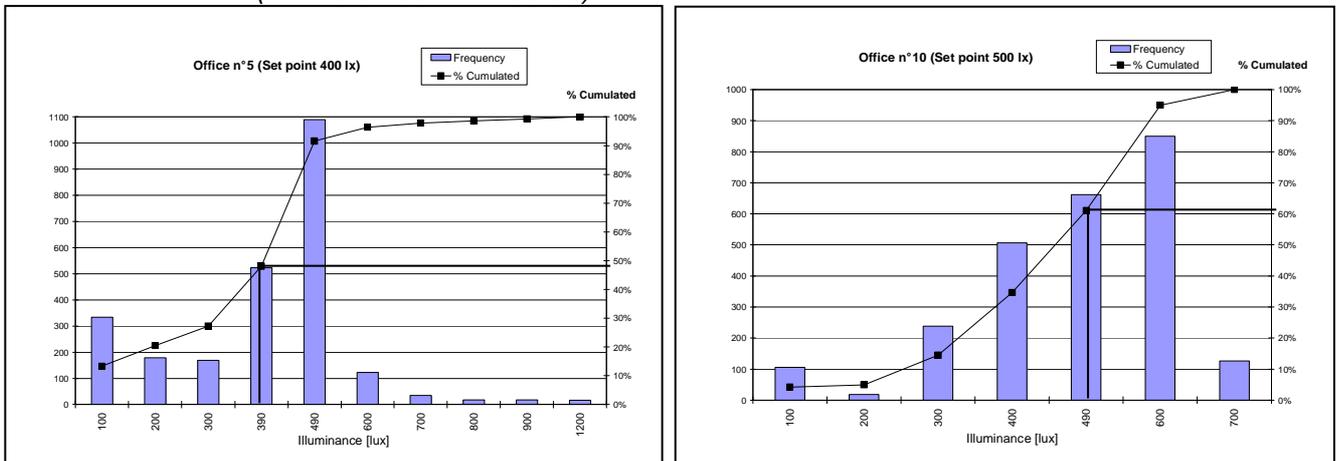


Figure 3.17: Controllo automatico & manuale. Distribuzione di frequenza e frequenza cumulata dell'illuminamento (dal 16/01/08 al 14/03/08)



### 3.2.4.2 Funzionamento del sistema di controllo

Nelle figure 3.18 e 3.19 sono riportati, a titolo di esempio, alcuni grafici che rappresentano in sovrapposizione l'andamento dell'illuminamento sul piano delle scrivanie e lo stato di funzionamento delle lampade (acceso/spento o % di regolazione del flusso). Nei grafici riferiti ai periodi di funzionamento in automatico & manuale (figura 3.18) è anche riportato il valore dell'illuminamento secondo la lettura del fotosensore.

Figura 3.18: Controllo manuale. Illuminamento interno misurati sulla scrivania rapportato allo stato di funzionamento degli apparecchi

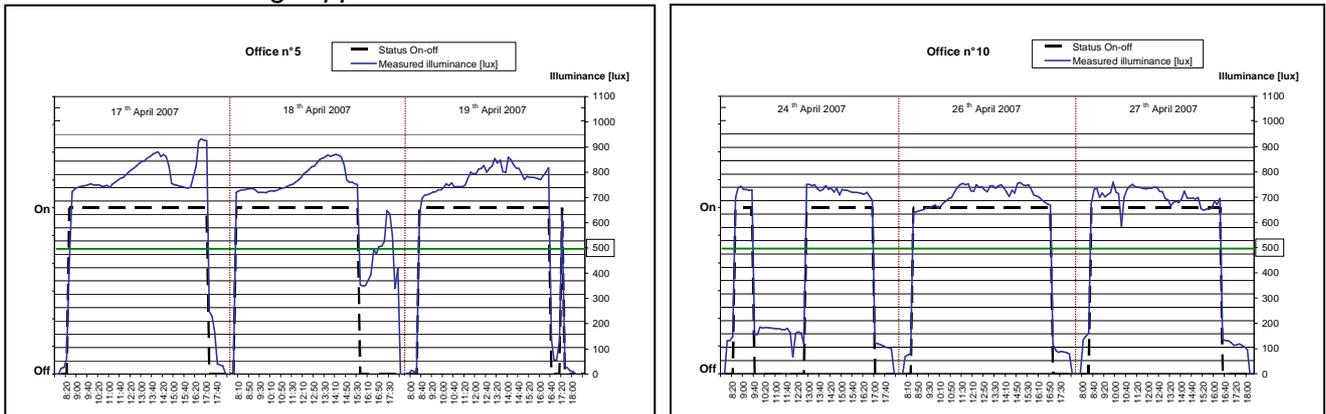
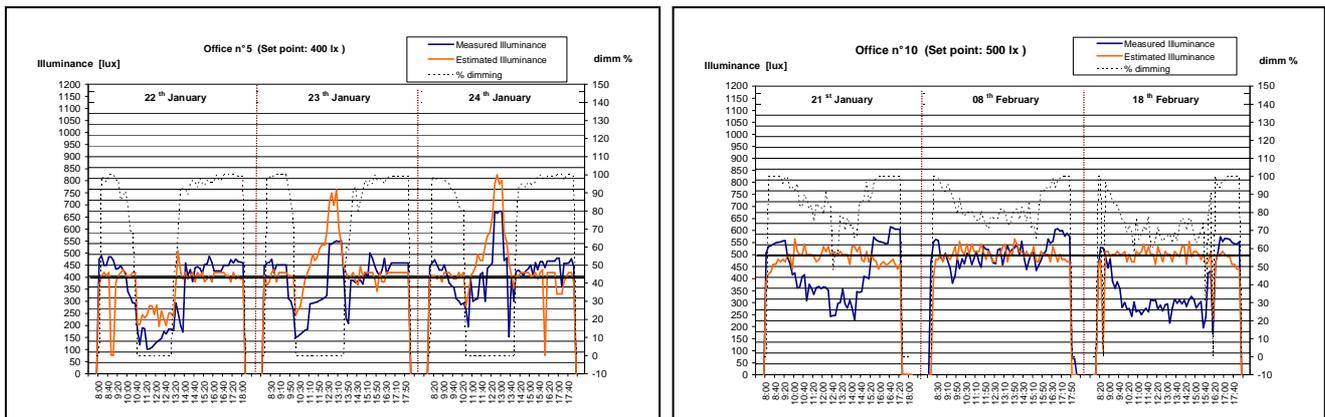


Figura 3.19: Controllo automatico & manuale. Illuminamento interno misurati sulla scrivania rapportato allo stato degli apparecchi (% di regolazione) e all'illuminamento secondo la lettura del fotosensore



### 3.2.4.3 Prestazioni energetiche dell'impianto di illuminazione

I dati di consumo dell'impianto di illuminazione dei dieci uffici sono stati monitorati considerando l'assorbimento esclusivo degli apparecchi di illuminazione e di dispositivi e centraline dedicate al controllo della luce.

Con i dati misurati è stato possibile determinare il LENI annuale e mensile dell'intero gruppo di uffici (escluso il corridoio la cui illuminazione non è stata modificata, non è collegata la sistema di controllo e non è stata oggetto di monitoraggio). I risultati ottenuti sono presentati nella tabella 3.4.

Tabella 3.4 – Valori di LENI calcolati sulla base dei dati misurati per i 10 uffici

LENI (kWh/m <sup>2</sup> mese)												LENI (kWh/m <sup>2</sup> anno)
mar-08	apr-08	mag-08	giu-08	lug-08	ago-08	set-08	ott-08	nov-08	dic-08	gen-09	feb-09	ANNO
1,152	0,801	1,358	0,893	0,912	0,821	1,052	1,363	1,587	2,072	1,622	1,417	

Sono stati inoltre misurati i consumi parassiti dovuti all'assorbimento di energia elettrica da parte dei reattori e dei dispositivi distribuiti dell'impianto di controllo. I consumi parassiti sono stati determinati verificando i dati registrati di notte e di domenica, in assenza cioè di utenti in ambiente e quindi ad apparecchi di illuminazione spenti.

Il consumo parassita è stato verificato sia con gli apparecchi spenti, ma in modalità di funzionamento automatica (assorbimento parassita dei reattori elettronici degli apparecchi più quello dei dispositivi del sistema di controllo) sia con gli apparecchi spenti manualmente e cioè eliminando l'assorbimento dovuto ai reattori degli apparecchi. La potenza parassita assorbita globalmente risulta essere pari a 0,417 W/m<sup>2</sup>, valore che scende a 0,278 W/m<sup>2</sup> se si esclude l'assorbimento dei reattori.

Con questi dati si ottiene un LENI dovuto esclusivamente ai consumi parassiti (per reattori e componenti del sistema di controllo pari) a 3,654 kWh/m<sup>2</sup>anno, che significa pari a circa 1/3 dei consumi dovuti esclusivamente all'illuminazione funzionale.

Questo dato evidenzia l'importanza dei consumi parassiti di un sistema di controllo di building automation, ed in particolare nel caso in cui, mediante strategie di controllo basate sull'integrazione tra luce naturale e artificiale, si riducano sensibilmente i consumi per l'illuminazione funzionale.

Per quanto riguarda la stima del risparmio di energia elettrica dovuto alla presenza del sistema di controllo è stata fatta un'analisi confrontando il LENI calcolato dai dati misurati e quello che si otterrebbe considerando l'impianto di illuminazione acceso per 8 ore al giorno, 5 giorni alla

settimana, escluse 2 settimane di ferie estive. Il risparmio di energia elettrica in presenza del sistema di controllo risulta essere pari al 55%.

### 3.2.5 Conclusioni

Alcune considerazioni possono innanzi tutto essere fatte in merito ai risultati relativi alle prestazioni ambientali di illuminazione. Nella fase di controllo manuale (prima fase di installazione), avvenuta nel periodo primaverile, si riscontra sovente la presenza di illuminamenti sul piano di lavoro al di sopra del valore di riferimento. Questo può essere in parte spiegato con l'impossibilità di regolare il flusso luminoso degli apparecchi in funzione della luce naturale. Durante l'orario di occupazione degli ambienti l'illuminamento sul piano di lavoro è risultato essere al di sopra del valore di riferimento nel 68% dei casi nell'ufficio n° 5 e nell'86% dei casi nell'ufficio n° 10. La frequenza maggiore si è registrata attorno a valori di 700 -800 lux, mentre i valori al di sotto della soglia si registrano prevalentemente nelle prime ore del mattino o nel tardo pomeriggio, ore in cui gli utenti potrebbero non essere presenti.

Con il sistema di controllo in modalità automatica & manuale, nel periodo invernale, gli illuminamenti misurati sul piano di lavoro risultano spesso al di sotto del valore di riferimento (nel 49% dei casi per l'ufficio n° 5 e nel 61% dei casi nell'ufficio n° 10). A questo proposito possono essere fatte diverse considerazioni: se si confronta l'andamento degli illuminamenti misurati sul piano delle scrivania dell'ufficio 10 con quelli stimati dal corrispondente fotosensore (figura 3.19) si può notare che il fotosensore sovente sovrastima le condizioni di illuminazione durante le ore centrali della giornata (quando è presente la luce naturale), mentre funziona più correttamente all'inizio e alla fine della giornata, quando è presente solo illuminazione artificiale. Questo potrebbe essere anche spiegato considerando che il luxmetro sulla scrivania è stato collocato nella posizione meno favorevole, per registrare le condizioni peggiorative di illuminazione, mentre il fotosensore, essendo collocato a soffitto ed avendo un campo di lettura angolare piuttosto ampio risulta influenzato dalla luce corrispondente a superfici più ampie. Inoltre va ricordato che non è stato possibile escludere dai dati registrati quelli corrispondenti a condizioni di assenza degli utenti. In questo caso il sistema di controllo spegne l'impianto e i valori di illuminamento scendono certamente al di sotto del valore di soglia (confronta figura 3.19, ufficio 5, 22 gennaio).

Per quanto riguarda i risultati relativi ai consumi energetici dell'impianto di illuminazione i dati di LENI elaborati evidenziano una variazione significativa dei consumi nei diversi mesi dell'anno (consumi maggiori nei mesi invernali), coerentemente con l'andamento della disponibilità di luce naturale e la conseguente regolazione automatica del sistema di controllo.

Per contro, con la riduzione dei consumi dell'impianto si incrementa il peso percentuale dei consumi parassiti (associati ai reattori degli apparecchi e ai componenti del sistema di controllo della luce) che raggiunge, in questo caso, quasi un terzo di quelli funzionali (determinati come differenza tra energia globale consumata ed energia globale parassita).

Dal confronto teorico con una situazione "di riferimento" di controllo manuale emerge un dato di risparmio significativo (circa 50%), anche se va sottolineato che questa ipotesi (luce accesa al 100% per 8 ore al giorno) non tiene conto della possibilità, reale, che gli utenti agiscano manualmente sull'impianto in relazione alla presenza della luce naturale.

Nota:

Il presente rapporto sintetizza le analisi condotte in merito alle attività di simulazioni numeriche e sperimentazioni in campo che sono state oggetto di pubblicazioni in ambito nazionale e internazionale, riportate in bibliografia.

#### 4. BIBLIOGRAFIA

**2008:** AGHEMO C; BLASO L; PELLEGRINO A; SERRA V., Consumi energetici per l'illuminazione artificiale negli edifici: la norma europea UNI EN 15193-2008 e sue applicazioni, In: Certificazione energetica: normativa e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto, Convegno AICARR, Torino 25 novembre 2008, pp. 139-150, 2008, ISBN: 978-88-95620-24-4

**2008:** PELLEGRINO A; BLASO L., AGHEMO C., Environmental and energy performances of lighting control systems in buildings: results from different case studies, Lighting Engineering Society of Slovenia (SVN), the 4th Conference BalkanLight 2008 and the 17th International Symposium Lighting Engineering 2008, Ljubljana 7-10 ottobre 2008, pp. 131-140, 2008, ISBN: 978-961-248-127-8

**2008:** BLASO L., PELLEGRINO A., SERRA V., AGHEMO C., Energy consumption assessment of lighting installations equipped with control systems through the European standard EN 15193 approach: a first comparison with measured data, in Proceedings of the First International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), 13-16 July, 2008, Dalian, China, Topic 5. Indoor and outdoor lighting, control lighting, and visual comfort , (T05-11), pp. 1147-1154, ISBN: 978-0-9816881-1-4

**2007:** AGHEMO C., BLASO L., PELLEGRINO A., SERRA V. , Energy consumption for electric lighting in buildings : the European Standard EN 15193 and its application, 62° Convegno Nazionale ATI, 11-14 Settembre 2007, Salerno, Volume I, pp 145-150 ISBN: 978 88 87998 77 1

**2007:** AGHEMO C., BLASO L., PELLEGRINO A., SERRA, V., Improving energy performance of buildings through the use of lighting control systems: an overview of assessment tools, Atti del Convegno The 26th Session of the CIE, 4-11 July, 2007, Beijing China, Volume 2° pp. D3-275 a D3-278, ISBN: 978 3 901 906 59 6 (convegno internazionale con referee)

**2006:** PELLEGRINO A., BLASO L., *Sistemi di controllo ed integrazione luce naturale ed artificiale. Stato dell'arte e presentazione di un'attività di ricerca sperimentale*, atti del Convegno Internazionale di Illuminazione – Luce e Architettura AIDI, Venezia 9-10 ottobre 2006, pp. 245-257.