



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di criteri di diagnosi per una correzione delle stime di consumi energetici dovuti all'illuminazione

F. Gugliermetti, F. Laudani, F. Bisegna

DEFINIZIONE DI CRITERI DI DIAGNOSI PER UNA CORREZIONE DELLE STIME DI CONSUMI ENERGETICI DOVUTI ALL'ILLUMINAZIONE

F. Gugliermetti, F. Laudani, F. Bisegna (SAPIENZA Università di Roma)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Applicabilità di tecnologie Innovative e modelli per la realizzazione di interventi di Efficienza Energetica

Responsabile del Progetto: arch Gaetano Fasano ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Università di Roma Sapienza, DIAEE aventi ad oggetto Analisi delle metodologie di diagnostica energetica degli edifici in ambito illuminotecnico

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico SAPIENZA Università di Roma: F. Gugliermetti

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 ASPETTI NORMATIVI: LA NORMA TECNICA UNI EN 15193.....	7
2.1 DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI DIPENDENZA DALLA LUCE DIURNA F_D	8
2.1.1 <i>Suddivisione dell'edificio</i>	10
2.1.2 <i>Facciate Verticali</i>	10
2.1.3 <i>Coperture</i>	10
2.2 FATTORE DI DISPONIBILITÀ LUCE DIURNA $F_{D,S,N}$	10
2.2.1 <i>Classificazione del fattore di luce diurna – Facciate verticali</i>	10
A. INDICE DI TRASPARENZA.....	10
B. INDICE DI PROFONDITÀ.....	11
C. INDICE DI OSTRUZIONE.....	11
D. FATTORE DI LUCE DIURNA.....	11
E. CLASSIFICAZIONE DEL FATTORE DI LUCE DIURNA.....	11
F. FATTORE DI DISPONIBILITÀ DELLA LUCE DIURNA PER FACCIATE VERTICALI.....	11
2.2.2 <i>Classificazione del fattore di luce diurna – Lucernari</i>	12
FATTORE DI DISPONIBILITÀ DELLA LUCE DIURNA PER LUCERNARI.....	12
2.2.3 <i>Fattore di controllo della luce diurna</i>	12
2.2.4 <i>Metodo mensile</i>	12
2.3 DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI DIPENDENZA DALL'OCCUPAZIONE F_O	13
2.4 DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI ILLUMINAMENTO COSTANTE F_C	13
3 ANALISI CRITICA DELLA METODOLOGIA IMPOSTA DALLA NORMA.....	13
4 METODOLOGIA PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO PROPOSTO DALLA NORMA.....	14
5 SCELTA E DESCRIZIONE DEI CASI TIPO.....	15
6 CALCOLO DEL <i>LENI</i> PER I DUE CASI TIPO.....	16
6.1 CALCOLO DEL <i>LENI</i> ATTRAVERSO FOGLIO EXCEL.....	16
6.1.1 <i>Caso studio 1: stanza 5*7*h3, finestra 3*2, destinazione d'uso: ufficio</i>	16
6.1.2 <i>Caso studio 2: stanza 5*7*h3, finestra 5*2, destinazione d'uso: aula scolastica</i>	20
6.2 CALCOLO DEL <i>LENI</i> ATTRAVERSO SOFTWARE COMMERCIALE.....	20
6.2.1 <i>Caso studio 1: stanza 5*7*h3, finestra 3*2, destinazione d'uso: ufficio</i>	21
6.2.2 <i>Caso studio 2: stanza 5*7*h3, finestra 5*2, destinazione d'uso: aula scolastica</i>	22
6.3 CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI.....	23
7 VALUTAZIONI SPERIMENTALI CON MODELLO IN SCALA.....	23
7.1 MODELLO UTILIZZATO.....	23
8 RISULTATI DELLE MISURE EFFETTUATE.....	26
8.1 ESPOSIZIONE EST, FEBBRAIO.....	26
8.2 ESPOSIZIONE SUD, FEBBRAIO.....	27
8.3 ESPOSIZIONE EST, GIUGNO.....	27
8.4 ESPOSIZIONE SUD, GIUGNO.....	28

9	VERIFICA DEI CONSUMI ENERGETICI EFFETTIVI	29
9.1	CASO STUDIO 1.....	30
9.2	CASO STUDIO 2.....	34
10	CRITICITÀ RISCONTRATE E INDIVIDUAZIONE DI POSSIBILI STRATEGIE MIGLIORATIVE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA DALLA UNI EN 15193	38
10.1	STIMA DEI VALORI DI ILLUMINAMENTO INTERNO SULLA BASE DEI DATI CLIMATICI ESTERNI.....	39
10.2	VALUTAZIONE ENERGETICA EFFETTUATA CON IL METODO ALTERNATIVO.....	41
10.2.1	<i>Caso studio 1</i>	41
10.2.2	<i>Caso studio 2</i>	45
10.3	CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI CON I DIVERSI METODI	49
11	CONCLUSIONI.....	50
12	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	51
13	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	52

Sommario

La Direttiva 2002/91/CE o EPBD (Energy Performance of Building Directive), oggi sostituita dalla 2010/31/CE, è il primo strumento normativo europeo per il calcolo del fabbisogno energetico e dei requisiti di rendimento energetico per gli edifici di nuova costruzione e per gli edifici soggetti a ristrutturazioni di un certo livello. A livello nazionale, la certificazione delle prestazioni energetiche degli edifici è divenuta realtà con il DLgs 192/2005, in attuazione della direttiva 2002/91/CE, poi sostituito dal DLgs 311/2006, e con i relativi strumenti attuativi (D.P.R. n. 59 del 2009 e D. M. 26/6/2009) e normativi (norme UNI TS 11300).

Ad oggi la Certificazione Energetica degli edifici permane tuttavia uno strumento incompleto. Per quanto riguarda il calcolo dell'indice di efficienza degli impianti di illuminazione, la norma tecnica di riferimento, a livello europeo, è la UNI EN 15193, finalizzata al calcolo del LENI (Lighting Energy Numeric Indicator).

In letteratura sono riportati diversi esempi applicativi della norma, ma sono frequenti critiche e proposte di metodologie più affidabili in risposta alle criticità riscontrate a livello internazionale e locale, relativamente alla valutazione dei sistemi automatizzati per la regolazione ed alla valutazione dell'importanza dei fattori comportamentali, ovvero alla difficoltà di valutare attraverso la norma edifici obsoleti i cui impianti non garantiscono gli illuminamenti minimi previsti dalle norme tecniche di settore per i diversi compiti visivi ed alla impossibilità di stimare correttamente le ore di uso dell'edificio in presenza o assenza di luce diurna.

A partire da un'analisi critica della vigente normativa, volta ad evidenziarne i punti deboli, e sulla base di considerazioni effettuate in un precedente lavoro incentrato sull'utilizzo della luce naturale nella progettazione degli ambienti, con particolare riferimento a simulazioni e misure effettuate su alcuni ambienti tipo, il presente lavoro vuole indagare le potenzialità dell'illuminazione naturale dal punto di vista energetico, attraverso una stima del consumo energetico sia attraverso il metodo proposto dalla normativa sia attraverso una metodologia semplificata che consideri sia la radiazione diffusa, sia la radiazione diretta. Dimostrata la limitata efficacia del metodo proposto dalla norma in una valutazione dettagliata del contributo dell'illuminazione naturale nella riduzione dei consumi energetici derivanti dagli impianti di illuminazione artificiale, si è valutata l'efficacia del metodo proposto e la possibilità di integrarlo all'interno di software di calcolo attraverso un semplice modello di calcolo.

1 Introduzione

Dalle crisi energetiche degli anni '70 ad oggi il tema dell'efficienza energetica è divenuto sempre più rilevante in tutti gli ambiti della vita umana, dal settore produttivo, al settore dei trasporti, fino all'ambito dei servizi e degli edifici poiché, come ormai ampiamente dimostrato, i consumi energetici di questi ultimi costituiscono una porzione importante negli usi energetici globali.

In ambito europeo la Direttiva 2002/91/CE o EPBD (Energy Performance of Building Directive) il cui tema è incentrato "sul rendimento energetico in edilizia" è il primo strumento normativo che mira a imporre l'obbligo di individuare una metodologia per il calcolo del fabbisogno energetico, di fissare dei requisiti di rendimento energetico per gli edifici di nuova costruzione e per gli edifici soggetti a ristrutturazioni di un certo livello, di istituire il sistema della certificazione energetica, di prevedere ispezioni periodiche degli impianti e di individuare elenchi di esperti indipendenti per la redazione dei certificati e le ispezioni. Nel 2010 la precedente direttiva è stata sostituita dalla 2010/31/CE "sulla prestazione energetica nell'edilizia" che mantiene molti dei punti della precedente direttiva introducendo, però, importanti innovazioni. Si aggiungono, tra le definizioni, il concetto di edificio a "energia quasi zero" per indicare le altissime prestazioni offerte, e di "ristrutturazione importante" che sostituisce la superficie minima che l'edificio deve avere affinché, in caso di ristrutturazione, sia obbligatorio l'adeguamento ai requisiti minimi. Viene inoltre evidenziata la necessità di istituire strumenti per l'incentivazione ed il finanziamento di edifici ad alte prestazioni.

A livello nazionale, nonostante l'emanazione di strumenti di indirizzo legislativo estremamente in anticipo rispetto alle direttive europee (legge 373/1976, legge 10/1991) la certificazione delle prestazioni energetiche degli edifici è divenuta una realtà solamente con l'emanazione del DLgs 192/2005, in attuazione della direttiva 2002/91/CE, poi sostituito dal DLgs 311/2006, e con i relativi strumenti attuativi (D.P.R. n. 59 del 2009 e D. M. 26/6/2009) e normativi (norme UNI TS 11300).

Ad oggi la Certificazione Energetica degli edifici permane tuttavia uno strumento incompleto poiché, nonostante nelle intenzioni del D.M 26/6/2009 "Linee Guida per la Certificazione Energetica" il coefficiente globale di prestazione energetica doveva essere costituito dai coefficienti parziali relativi all'energia necessaria per il riscaldamento, alla produzione di acqua calda, al raffrescamento e all'illuminazione artificiale dell'edificio, al momento solo i primi due concorrono a formare l'indice prestazionale. Questo è probabilmente dovuto alle problematiche riscontrate nella predisposizione delle norme tecniche per il calcolo dei due coefficienti mancanti, che ne hanno ritardato l'emanazione.

Mentre per i primi tre coefficienti le norme di riferimento sono le UNI TS 11300, parte 1-2-3, per quanto riguarda il calcolo dell'indice relativo all'efficienza degli impianti illuminanti la norma tecnica di riferimento, a livello europeo, è la norma tecnica UNI EN 15193. Tale norma è finalizzata al calcolo del LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) e propone sostanzialmente due percorsi metodologici, uno per la misurazione dei consumi energetici per l'illuminazione e, quindi, per la stima del LENI, ed un secondo metodo, che può a sua volta essere applicato in modo sintetico o completo, che consente invece di calcolare il LENI anche solo a partire dai dati di progetto dell'edificio o del locale da esaminare. In tal modo si voleva proporre uno strumento utile sia per una stima postuma dei consumi sia per una valutazione preventiva degli stessi mirata ad una ottimizzazione dei vari sistemi impiantistici. La metodologia di calcolo prevede la valutazione dell'indice di efficienza energetica del sistema di illuminazione a partire dall'energia utilizzata per l'alimentazione degli apparecchi illuminanti e degli apparecchi di emergenza. L'energia consumata per l'illuminazione viene a sua volta calcolata in base alla potenza impegnata per gli apparecchi illuminanti, alle ore di utilizzo diurne ed, eventualmente, notturne, all'illuminamento mantenuto sulla base dei compiti visivi, ai fattori legati ai profili di occupazione del locale ed all'accesso alla luce diurna. In letteratura sono riportati diversi esempi applicativi della norma [1, 2] ma sono frequenti anche critiche e proposte di metodologie più affidabili in risposta alle criticità riscontrate a livello internazionale e locale. In particolare vengono mosse critiche alla valutazione dei sistemi automatizzati per la regolazione ed alla valutazione dell'importanza dei fattori comportamentali [3] oppure alla difficoltà di valutare attraverso la norma edifici obsoleti i cui impianti illuminanti non garantiscono gli illuminamenti minimi previsti dalle norme tecniche di settore per i diversi compiti visivi ed alla impossibilità di stimare correttamente le ore di uso dell'edificio in

presenza o assenza di luce diurna [4]. Un ulteriore elemento critico nella metodologia proposta dalla norma, si può individuare nella corretta valutazione del contributo della luce diurna, in un articolo D. Iatauro, P. Signorelli, L.Terrinoni e M. Zinzi [5] propongono un metodo alternativo per affinare tale valutazione: conoscendo il fattore medio di luce diurna del locale e l'illuminamento da garantire in funzione del compito visivo si utilizza il Diagramma Dresler [6] per stimare la percentuale di ore, durante l'orario lavorativo, nell'arco di un anno, in cui l'illuminamento esterno dovuto a radiazione diffusa (in condizioni standard di cielo coperto) raggiunge il valore minimo necessario a garantire i livelli di illuminamento medio interni richiesti; il LENI calcolato con questo metodo risulta inferiore rispetto a quello calcolato seguendo la UNI EN 15193, che, chiaramente non tiene in debita considerazione il contributo della luce naturale sovrastimando, in tal modo, i consumi energetici.

Il presente lavoro, infine, vuole indagare le potenzialità del considerare non solo l'illuminazione naturale dovuta a radiazione diffusa, ma anche quella dovuta alla radiazione diretta che, nelle latitudini europee più basse, in cui la condizione di cielo coperto non risulta essere preponderante nel corso dell'anno, risulta essere una condizione più ricorrente della precedente.

A partire dalle considerazioni effettuate in un precedente lavoro incentrato sull'utilizzo della luce naturale nella progettazione degli ambienti [7], con particolare riferimento alle simulazioni ed alle misure effettuate su alcuni ambienti tipo si è scelto di utilizzare alcuni di questi ambienti per una valutazione del LENI secondo norma e per ulteriori valutazioni sulla base delle suddette simulazioni e misure che sono state nel frattempo affinate ed ampliate.

In particolare si è cercato di individuare le ore, nell'arco di una giornata lavorativa-tipo del periodo estivo e di una del periodo invernale, in cui i livelli di illuminamento interno dovuti alla sola illuminazione naturale, considerando però la radiazione totale, raggiungono o superano i livelli minimi di illuminamento imposti dalle normative di riferimento per scuole ed uffici. A tale scopo sono stati utilizzati sia i valori di illuminamento simulati e misurati per i due periodi di riferimento sia i valori di radiazione di un anno meteorologico tipo [8] costituito sulla base dei dati registrati in maniera continua dal 1951 al 1970 in 68 stazioni sparse sul territorio italiano

A partire da una analisi critica della normativa, volta ad evidenziarne i punti deboli, si procede, quindi ad una stima del consumo energetico annuale sia attraverso il metodo proposto sia sulla base dei suddetti valori. Dimostrata l'evidenza dell'inaffidabilità del metodo proposto dalla norma in una valutazione dettagliata del contributo dell'illuminazione naturale nella riduzione dei consumi energetici derivanti dagli impianti di illuminazione artificiale degli edifici si procede nella individuazione di un coefficiente correttivo che consenta di affinare tale valutazione.

2 Aspetti normativi: la norma tecnica UNI EN 15193

La direttiva europea 2002/91/CE specifica che l'indice di prestazione energetica globale degli edifici risulta dalla somma del fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale ed estiva, dal fabbisogno energetico per la produzione di acqua calda per usi sanitari e dal fabbisogno energetico per illuminazione artificiale.

Per il calcolo di tali valori sono state emanate specifiche norme, per quanto riguarda la valutazione del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale la norma tecnica di riferimento è la UNI EN 15193:2008.

La UNI EN 15193 [9] definisce un metodo di calcolo per la quantificazione dell'energia elettrica utilizzata per l'illuminazione degli edifici, tale metodo può essere utilizzato sia per gli edifici esistenti che in fase di progetto ma riguarda solamente gli edifici non residenziali.

Il LENI (Lighting Energy Numeric Indicator o Indice di efficienza energetica del sistema di illuminazione) è l'indice introdotto dalla norma per la valutazione dei consumi energetici per illuminazione e può essere ottenuto attraverso la misurazione dei consumi energetici per illuminazione, secondo il metodo descritto nel paragrafo 5 e negli allegati "A" e "B" della norma, oppure può essere calcolato con metodo semplificato o completo.

$$LENI=W/A \quad [kWh/m^2\text{anno}] \quad (1)$$

dove W è l'energia totale annua utilizzata per l'illuminazione, mentre A è la superficie utile dell'edificio in esame. W , è ricavato dalla (2):

$$W = W_L + W_p \quad [kWh/anno] \quad (2)$$

in cui W_L è l'energia necessaria per soddisfare i requisiti di illuminamento dell'edificio e si ricava dalla (3):

$$W_L = \frac{\sum(P_n * F_C) + [(t_D * F_O * F_D) + (t_N * F_O)]}{1000} \quad [kWh] \quad (3)$$

mentre W_p rappresenta l'energia necessaria per la ricarica delle batterie dei sistemi di illuminazione di emergenza e per la fase di stand-by dei sistemi di controllo e si ricava dalla (4):

$$W_p = \frac{\sum[P_{pc} * (t_y - t_D + t_N) + (P_{em} * t_{em})]}{1000} \quad [kWh] \quad (4)$$

La norma propone quindi due metodi di calcolo, il metodo rapido prevede che l'energia annua utilizzata per l'illuminazione sia stimata attraverso la (2) e, quindi, la (3) e la (4); i valori t_D , t_N , F_C , F_D , F_O e W_p in tal caso vengono ricavati dalle tabelle riportate nelle appendici E, F, e G; la norma stessa specifica però che tale metodo può restituire valori LENI più elevati rispetto a quelli ottenibili con il metodo completo.

Il metodo completo, infatti, prevede una valutazione più accurata dei consumi energetici per illuminazione, che può essere effettuata per periodi mensili, oltre che annuali. Il metodo utilizza sempre la formula (2) ma prevede la determinazione analitica di F_D , F_O , F_C , secondo quanto previsto rispettivamente negli allegati C, D, ed E.

2.1 Determinazione del fattore di dipendenza dalla luce diurna F_D

Il coefficiente di dipendenza dalla luce diurna F_D consente di valutare i valori relativi al risparmio energetico ottenibile attraverso una corretta integrazione tra illuminazione artificiale e illuminazione naturale degli ambienti interni ma rappresenta, di fatto, un valore ideale che, almeno nel metodo di calcolo, non è effettivamente corrispondente alla realtà, questo perché a meno che non vengano effettuate simulazioni con software dedicati oppure misurazioni dell'illuminamento esterno, quest'ultimo non è mai disponibile se non per approssimazioni.

La determinazione di F_D per la zona n ^{esima} avviene attraverso la formula (5)

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

in cui $F_{D,S,n}$ è il fattore di disponibilità della luce diurna attraverso finestre verticali nella zona n e $F_{D,C,n}$ è il fattore di comando della luce diurna, e dipende dal tipo di sistema di controllo utilizzato.

La procedura prevede cinque fasi:

1. Suddivisione dell'edificio in zone a seconda che ricevano o meno illuminazione naturale.
2. Determinazione dell'impatto dei parametri relativi alla stanza, alla geometria della facciata ed alla presenza di ostruzioni esterne sulla illuminazione naturale degli spazi interni attraverso il fattore di luce diurna.
3. Stima del potenziale risparmio energetico descritto dal fattore di fornitura di luce diurna $F_{D,S,n}$ come funzione dei dati climatici locali, mantenimento dei valori di illuminamento e fattore di luce diurna.
4. Determinazione dello sfruttamento della luce naturale disponibile considerando il tipo di sistema di controllo utilizzato attraverso il fattore di controllo della luce diurna.
5. Eventuale conversione dei valori annuali di $F_{D,n}$ in valori mensili.

Lo schema in Fig.1 riporta il diagramma di flusso relativo alla valutazione di F_D .

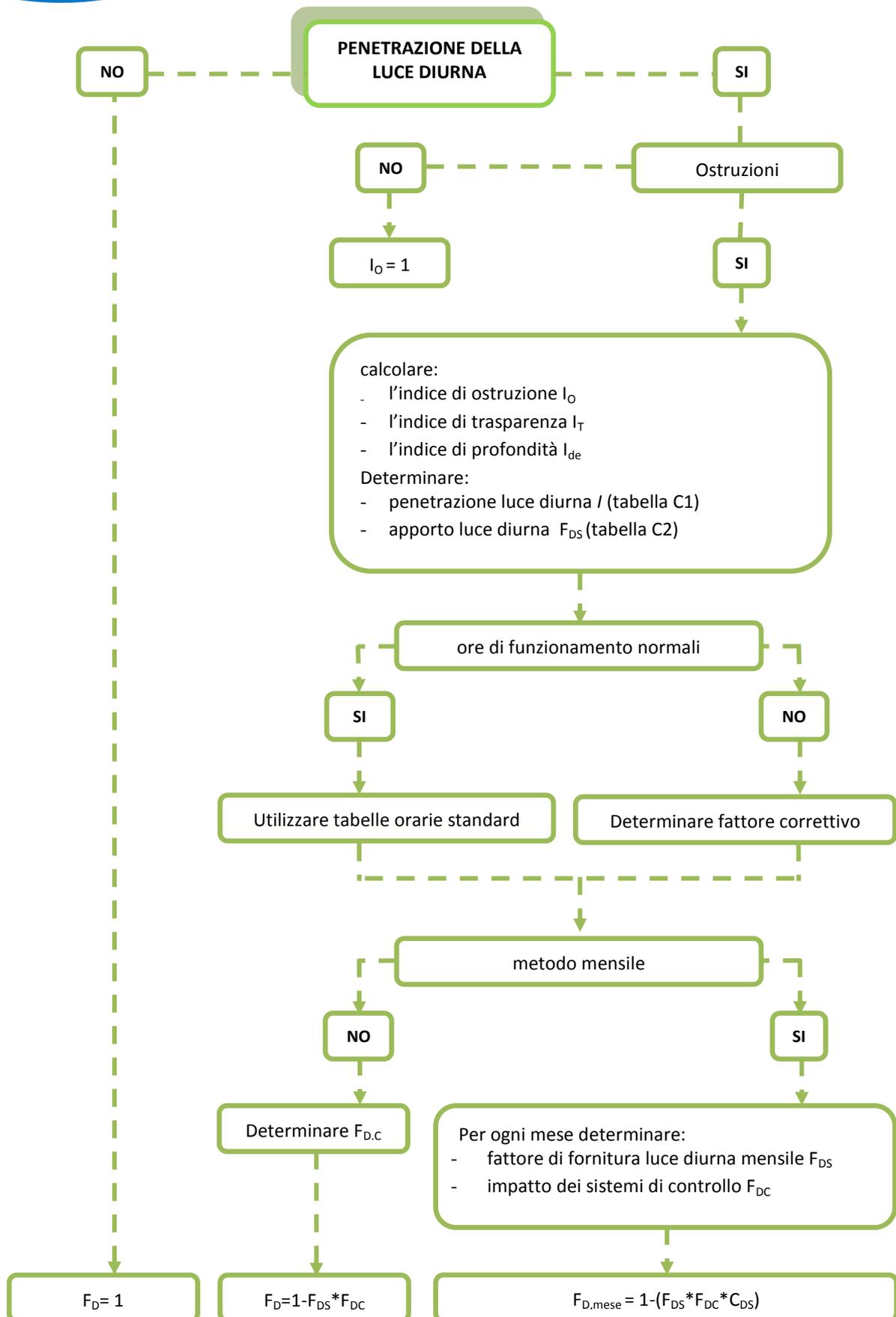


Figura 1. Schema per la determinazione del fattore di dipendenza della luce diurna in una zona.

2.1.1 Suddivisione dell'edificio

L'edificio deve essere suddiviso in zone $A_{D,j}$, che ricevono la luce diurna e zone $A_{ND,j}$ che non la ricevono. Il dimensionamento delle aree $A_{D,j}$ è differente se esse ricevono illuminazione dalle facciate o dalla copertura. Per le aree che non ricevono luce diurna F_D è considerato pari a 1.

2.1.2 Facciate Verticali

La profondità massima della zona $A_{D,max}$ che riceve la luce naturale attraverso le facciate si ricava dalla (6)

$$A_{D,max} = 2,5 * (h_{Li} - h_{Ta}) \quad [m] \quad (6)$$

in cui $A_{D,max}$ è la massima profondità della zona illuminata dalla luce naturale, mentre h_{Li} è l'altezza dell'architrave della finestra dal pavimento e h_{Ta} è l'altezza del piano di lavoro (stessa altezza del davanzale) rispetto al suolo.

La profondità massima dell'illuminazione naturale è calcolata partendo dalla superficie interna della parete esterna, perpendicolarmente alla superficie considerata. Se la profondità effettiva della zona è minore rispetto alla profondità massima calcolata dell'illuminazione naturale, la profondità dell'ambiente può essere assunta come profondità massima della zona con luce naturale A_D .

La sub-area $A_{D,j}$ dello spazio con luce diurna j risulta quindi dalla (7)

$$A_{Dj} = a_{D,max} * b_D \quad [m^2] \quad (7)$$

in cui $a_{D,max}$ è la profondità dell'area che riceve luce naturale, mentre b_D è la larghezza.

Generalmente la larghezza della zona illuminata naturalmente corrisponde alla larghezza interna della facciata della zona dell'edificio o del settore che si sta verificando. I muri interni possono essere trascurati. Se le finestre sono disposte solo in parte della facciata la larghezza della zona illuminata naturalmente riferibile a questa parte della facciata corrisponde alla larghezza della porzione di facciata contenente le finestre più metà della profondità della zona daylight. La norma riporta schemi geometrici per la determinazione delle zone a luce diurna.

2.1.3 Coperture

Generalmente, poiché le aperture zenitali sono uniformemente distribuite sulle coperture tutta l'area sottostante la copertura è trattata come zona luce a diurna. In caso di singole aperture o per le aree marginali rispetto a settori uniformemente illuminati vengono considerate facenti parte della zona a luce diurna le aree poste all'interno della distanza $A_{D,max}$ (8)

$$a_{D,max} \leq (h_R - h_{Ta}) \text{ verso il bordo dell'apertura successiva} \quad [m] \quad (8)$$

in cui h_R è l'altezza netta dello spazio sottostante la copertura finestrata.

2.2 Fattore di disponibilità luce diurna $F_{D,S,n}$

2.2.1 Classificazione del fattore di luce diurna – Facciate verticali

La disponibilità di luce diurna in una zona illuminata di luce naturale dipende dalla geometria delle chiusure perimetrali ed è descritta dall'indice di trasparenza I_T , dall'indice di profondità I_{De} e dall'indice di ombreggiamento (obstruction index) I_o .

A. Indice di trasparenza

L'indice di trasparenza della parte di edificio che beneficia dell'illuminazione naturale è definito dalla (9)

$$I_T = A_C / A_D \quad (9)$$

In cui A_c è l'area delle aperture nella facciata, mentre A_D è l'area totale delle superfici di lavoro orizzontali che ricevono illuminazione naturale.

B. Indice di profondità

L'indice di profondità del locale che riceve illuminazione naturale è definito dalla (10)

$$I_{De} = a_D / (h_{Li} - h_{Ta}) \quad (10)$$

C. Indice di ostruzione

L'indice di ostruzione tiene conto della riduzione della luce naturale che incide sulla facciata dell'edificio per effetto di ostruzioni esterne quali, ad esempio:

- presenza di altri edifici e di ostacoli naturali (alberi o montagne);
- corti e atri facenti parte dell'edificio stesso;
- sporgenze verticali o orizzontali facenti parte della facciata;
- doppie facciate vetrate.

L'indice di ostruzione I_O può essere calcolato attraverso la (11):

$$I_O = I_{O,OB} * I_{O,OV} * I_{O,VF} * I_{O,CA} * I_{O,GDF} \quad (11)$$

in cui $I_{O,OB}$ è il fattore di correzione per ostruzioni lineari, $I_{O,OV}$ è il fattore di correzione per sbalzi orizzontali, $I_{O,VF}$ è il fattore di correzione per sporgenze verticali, $I_{O,CA}$ è il fattore di correzione per corti ed atri e $I_{O,GDF}$ è il fattore di correzione per doppie facciate vetrate.

La norma riporta i metodi geometrici per ricavare i valori dei fattori sopraindicati.

D. Fattore di luce diurna

Gli indici geometrici I_T , I_{de} e I_O consentono quindi di stimare la disponibilità di luce diurna per la zona relativa alla facciata esaminata attraverso la (12)

$$D_C = (4,13 + 20,0 * I_T - 1,3 * I_{de}) * I_O \quad [\%] \quad (12)$$

Dove D_C è il fattore di luce diurna che considera la sola apertura, non tiene quindi conto delle proprietà del sistema di chiusura.

E. Classificazione del fattore di luce diurna

Per considerare l'impatto della finestratura sul fattore di luce diurna è necessario introdurre nel calcolo i fattori che la caratterizzano, il fattore di luce diurna in tal caso è desumibile dalla (13):

$$D = D_C * \tau_{D65} * k_1 * k_2 * k_3 \quad [\%] \quad (13)$$

In cui τ_{D65} è la trasmissione emisferica diretta della finestratura, k_1 , k_2 e k_3 sono fattori che tengono conto, rispettivamente, del telaio della finestra, dello sporco sulla vetratura e dell'incidenza non perpendicolare della luce sulla facciata. In funzione del peso attribuito alle proprietà del sistema finestra si può scegliere se utilizzare D o D_C come indice di penetrazione della luce diurna.

F. Fattore di disponibilità della luce diurna per facciate verticali

Il fattore di disponibilità della luce diurna $F_{D,S}$ può essere approssimato, per latitudini che variano da 38° a 60° Nord attraverso la (14):

$$F_{D,S} = a + b * \gamma_{Site} \quad (14)$$

γ_{site} è l'angolo di latitudine relativo alla località in cui si trova l'edificio, mentre a e b sono dei coefficienti per la determinazione del fattore di disponibilità di luce diurna $F_{D,S}$ e sono tabellati nella norma in funzione dell'illuminamento mantenuto nelle aree di lavoro (300, 500 e 750 lux) e della penetrazione di luce diurna negli ambienti (debole, media, forte). La norma riporta anche i valori di $F_{D,S}$ già calcolati per alcune città europee e specifica che, per orari di lavoro prolungati oltre la fascia oraria 8-17, $F_{D,S}$ dovrebbe essere moltiplicato per 0,7 mentre, per periodi prolungati di assenza di luce diurna in orario lavorativo, si applica $F_{D,S,n}=0$, ovvero $F_{D,S}=1$.

2.2.2 Classificazione del fattore di luce diurna – Lucernari

La classificazione del fattore di luce diurna per i lucernari dipende da fattori geometrici relativi alle aperture stesse, dal loro orientamento e dall'illuminamento mantenuto.

Nelle sale con lucernari il fattore di luce diurna medio \bar{D}_j può essere calcolato attraverso la (15):

$$\bar{D}_j = D_{ext} * \tau_{D65} * k_{Obl,1} * k_{Obl,2} * k_{Obl,3} * \frac{\sum A_{Rb}}{A_{RG}} * \eta_R \quad (15)$$

In cui A_{Rb} è l'area dell'apertura del lucernario, A_{RG} è l'area dello spazio in esame, τ_{D65} è la trasmissione luminosa della vetratura, $k_{Obl,1}$ è il fattore che tiene conto dell'intelaiatura, $k_{Obl,2}$ è il fattore che tiene conto dello sporco, $k_{Obl,3}$ è il fattore che tiene conto dell'incidenza non perpendicolare della luce e η_R è il fattore di utilizzo ed è tabellato nella norma stessa. D_{ext} , infine, è il fattore di luce diurna esterno, ed è definito dalla (16):

$$D_{ext} = \frac{E_F}{E_{ext}} \quad [\%] \quad (16)$$

In cui E_F è l'illuminamento incidente sulla superficie esterna del lucernario nel piano della vetratura per cielo coperto ed E_{ext} è l'illuminamento orizzontale privo di ostruzioni in condizioni di cielo coperto.

Una volta ottenuto D_j sarà possibile ricavare il livello di penetrazione della luce diurna.

Fattore di disponibilità della luce diurna per lucernari

Contrariamente a quanto riportato per le facciate verticali, per i lucernari non è possibile ricavare il fattore di disponibilità della luce diurna $F_{D,S,n}$ attraverso interpolazione lineare, ma deve essere calcolato caso per caso. La norma a tal proposito riporta una serie di tabelle, relative solo ad alcune località europee rappresentative, che consentono di ricavare $F_{D,S}$ in funzione dell'illuminamento mantenuto (300, 500, 750 lux), dell'orientamento (Nord, Sud, Est/Ovest), dell'angolo di inclinazione del lucernario.

2.2.3 Fattore di controllo della luce diurna

$F_{DC,n}$ è un fattore che descrive l'efficienza del sistema di controllo dell'illuminazione artificiale in funzione dell'illuminazione naturale e si ricava da una tabella in funzione del sistema di regolazione adottato e del livello di penetrazione (debole, media, forte) della luce diurna.

2.2.4 Metodo mensile

Per ricavare i valori mensili relativi al fattore di dipendenza dalla luce diurna $F_{D,n}$ e, quindi, ripartire il LENI nei dodici mesi la norma fornisce l'equazione (17):

$$F_{D,n} = 1 - (F_{D,S,n} * F_{D,C,n} * c_{DS,n}) \quad (17)$$

in cui $c_{D,S,n}$ è il fattore di redistribuzione mensile ed è riportato nella norma in una tabella contenente i valori, per diversi gradi di penetrazione della luce diurna, per alcune città europee rappresentative.

2.3 Determinazione del fattore di dipendenza dall'occupazione F_O

Il Fattore di dipendenza dall'occupazione F_O consente di tenere conto di quanto l'illuminazione artificiale venga utilizzata in relazione alle modalità di utilizzo dell'edificio o della zona e dei sistemi di controllo installati.

F_O è sempre pari a 1 per quei locali nei quali l'illuminazione viene attivata centralmente oppure per i quali l'area illuminata da un gruppo di apparecchi attivati insieme sia maggiore di 30 m². Altrimenti F_O deve essere determinato secondo le formule (18), (19) e (20).

1) Se $0,0 \leq F_A \leq 0,2$

$$\text{allora: } F_O = \left[\frac{(1-F_{OC}) * F_A}{0,2} \right] \quad (18)$$

2) Se $0,2 \leq F_A \leq 0,9$

$$\text{allora: } F_O = F_{OC} + 0,2 - F_A \quad (19)$$

3) Se $0,9 \leq F_A \leq 1,0$

$$\text{allora: } F_O = [7 - (10 * F_{OC})] * (F_A - 1) \quad (20)$$

In cui F_A è un valore che rappresenta la proporzione di tempo nel quale lo spazio non è occupato ed è tabellato nella norma in funzione della destinazione d'uso dell'edificio e del compito visivo cui è destinata l'area in esame.

F_{OC} , invece è fissato in funzione del tipo di sistema di controllo, a seconda che si tratti di accensione e spegnimento manuale, accensione e spegnimento manuale con spegnimento generale automatico, oppure, in presenza di sistemi di rilevamento di presenza/assenza con accensione e regolazione automatica, accensione e spegnimento automatici, accensione manuale con regolazione e spegnimento automatici o accensione manuale e spegnimento automatico.

2.4 Determinazione del fattore di illuminamento costante F_C

Il fattore di illuminamento costante tiene conto del fatto che tutte le sorgenti artificiali, con i relativi apparecchi illuminanti, dal momento della loro installazione iniziano a degradarsi e a ridurre la propria potenza in uscita, e si ricava dalla (21).

$$F_C = \frac{(1+MF)}{2} \quad (21)$$

In cui MF è il fattore di manutenzione del sistema di illuminazione ed è determinato, secondo quanto riportato dalla IEC 97-2005 [10], attraverso la (22):

$$M_F = LLMF * LSF * LMF * RSMF \quad (22)$$

In cui LLMF tiene conto della riduzione del flusso luminoso nel tempo, LSF è il tasso di mortalità delle lampade, LMF dipende dal fattore dallo sporco che si deposita sulle lampade ed RSMF è il decadimento delle proprietà di riflessione del locale per effetto dello sporco.

3 Analisi critica della metodologia imposta dalla norma

La norma UNI EN 15193 propone un percorso che, a partire dai dati geometrici del locale e dai valori relativi alla potenza installata per l'illuminazione artificiale va a calcolare, innanzitutto, l'incidenza dell'illuminazione naturale, vengono poi considerati i fattori relativi all'occupazione del locale (quindi al suo utilizzo), alla manutenzione del locale e degli apparecchi illuminanti, ed alla eventuale presenza di sistemi automatici di controllo dell'illuminazione artificiale e della integrazione dell'illuminazione artificiale-naturale. Seguendo ogni passaggio del metodo di calcolo risulta evidente che la norma considera

l'illuminazione naturale come dovuta alla sola componente di radiazione diffusa dal cielo, quindi in condizioni standardizzate di cielo coperto e senza considerare l'orientamento geografico delle finestrate. Questa scelta, nata certamente dalla volontà di semplificare il calcolo, di fatto può risultare estremamente fuorviante, specialmente per le latitudini mediterranee e per quelle in cui la condizione di cielo coperto non è preponderante nel corso dell'anno. In tali condizioni, infatti, la presenza di radiazione diretta dovuta alla presenza del sole (cielo sereno) comporta un notevole innalzamento dei valori di illuminamento interno dei locali, ovviamente con un andamento orario legato all'orientamento del locale, che va ad incidere fortemente sulla necessità di attivare i sistemi di illuminazione artificiale. Va infine evidenziato come la norma metta in relazione l'irraggiamento ricevuto dai locali con la latitudine, proponendo quindi una valutazione estremamente semplificata anche dei valori di radiazione diffusa.

E' quindi evidente come considerare la sola radiazione diffusa quale unica fonte di illuminazione naturale porti da un lato ad un sovradimensionamento dei consumi energetici stimati per l'illuminazione artificiale e, dall'altro, ad un appiattimento di tali consumi, in quanto locali di egual dimensione ma con orientamento diverso risultano avere i medesimi consumi.

L'obiettivo che si propone di raggiungere, dunque, è una maggiore accuratezza nella valutazione del contributo della luce naturale, in modo da ridurre il gap tra i valori del LENI che vengono misurati su edifici esistenti secondo il metodo diagnostico proposto dalla norma ed i valori del LENI calcolati per i medesimi edifici partendo dai relativi dati geografici, geometrici e morfologici.

Solo in tal modo il calcolo del LENI potrà essere effettivamente utilizzato per una valutazione preventiva dei consumi energetici dovuti all'illuminazione che non risulti maggiorata da una scarsa considerazione dell'illuminazione naturale degli ambienti interni.

4 Metodologia per la validazione del modello di calcolo proposto dalla norma

Al fine di valutare se i risultati ottenuti attraverso il calcolo sviluppato a partire dalla UNI EN 15 163 siano effettivamente coerenti con la realtà dei consumi energetici per l'illuminazione artificiale degli edifici si è ritenuto necessario analizzare in modo approfondito il metodo di calcolo proposto dalla norma, viste le criticità evidenziate, le effettive condizioni di illuminamento interno riferibili alla luce naturale.

Una prima fase consiste nella scelta di alcuni casi tipo che possano rappresentare alcune situazioni comuni (Cap. 5); tali casi tipo devono poi essere analizzati attraverso il metodo proposto dalla norma, al fine di calcolarne i consumi energetici annuali ed il LENI (Cap. 6).

Una seconda fase consiste nella simulazione numerica delle condizioni di illuminamento dovuto alla radiazione naturale, sia all'interno dell'edificio che all'esterno sul piano orizzontale, in alcuni giorni tipo dell'anno, preferibilmente uno in periodo invernale ed uno in periodo estivo; tale simulazione è finalizzata alla valutazione delle ore effettive di utilizzo degli impianti di illuminazione artificiale all'interno degli ambienti studiati.

Una volta verificato che, effettivamente le condizioni di illuminamento interno siano sufficienti a garantire il comfort nel compito visivo cui il locale analizzato è dedicato, per un numero elevato di ore nell'arco temporale di utilizzo, si può procedere con una ulteriore verifica sperimentale, approntando un modello in scala dei casi tipo e misurando i valori di illuminamento interno effettivo nei periodi scelti (Cap. 7 e 8).

Durante la procedura di misura sarebbe opportuno studiare il modello sia con le finestrate orientate a Sud che a EST (orientamento il cui l'andamento del ciclo di illuminazione naturale diurno è simmetrico rispetto all'orientamento Ovest) in modo da avere una panoramica completa delle possibili condizioni di illuminamento interno in relazione all'orientamento delle aperture.

I valori risultanti dalle misure devono quindi essere analizzati al fine di individuare i tempi effettivi di utilizzo degli impianti di illuminazione artificiale nelle condizioni reali studiate, sulla base di tali valutazioni è quindi possibile effettuare una nuova verifica dei consumi energetici per illuminazione artificiale riportando i consumi giornalieri stimati al consumo mensile per i due periodi esaminati e confrontando tali valori con i valori del LENI calcolati attraverso la norma per i due mesi di riferimento (Cap. 9).

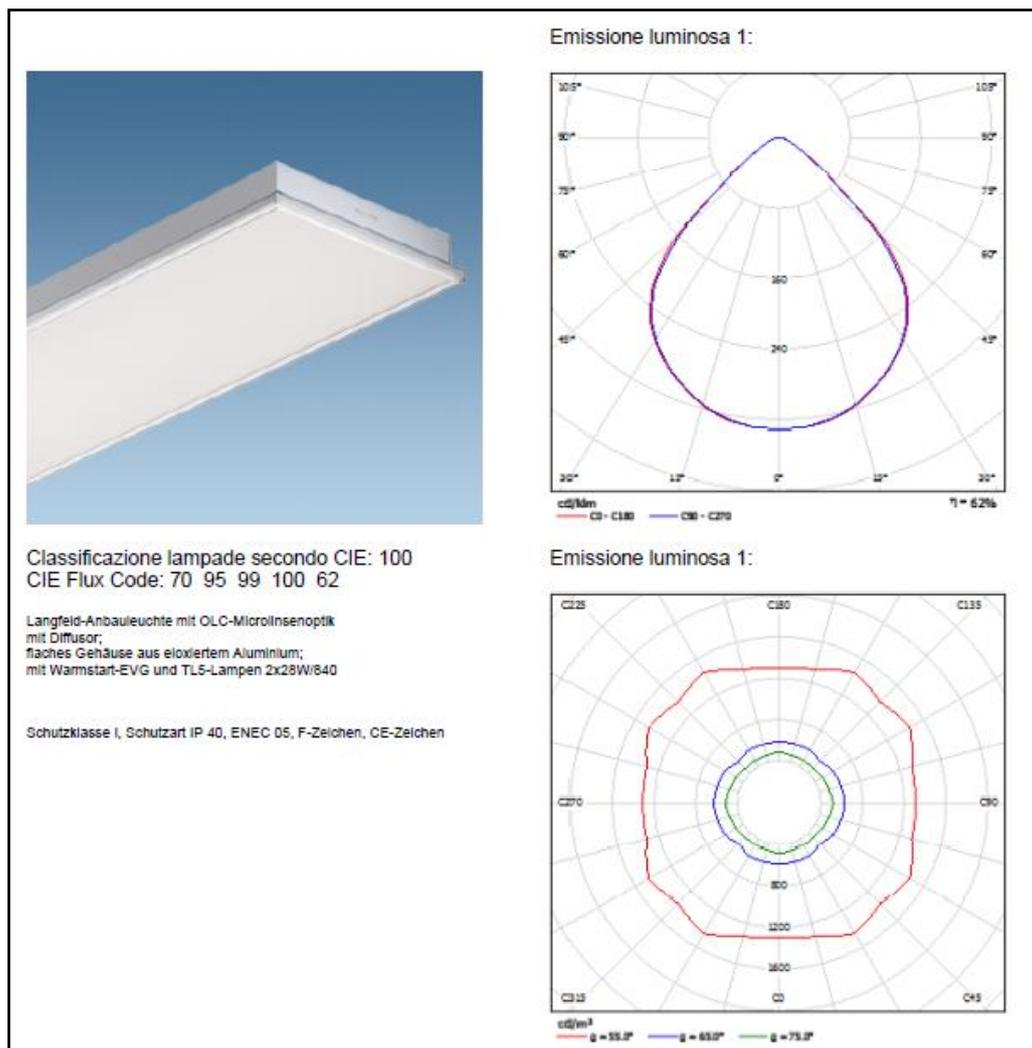
5 Scelta e descrizione dei casi tipo

Per effettuare una verifica del metodo proposto dalla norma sono stati individuati due casi tipo, è stato quindi scelto un ambiente a pianta rettangolare con dimensioni fisse (larghezza 5m, altezza 3m, profondità 7m). La parete esterna, è quella che fa da supporto alla superficie trasparente (finestra); nello studio effettuato, si sono prese in considerazione due geometrie dell'elemento vetrato, mantenendo la sua altezza a 2 metri dal pavimento e variando la sua lunghezza, da 3 a 5 metri (finestra centrale-finestra a nastro). È stata prevista la presenza di un davanzale alto 1m e la parete in cui è inserita la finestra è ritenuta non ombreggiata da ostacoli esterni. Le caratteristiche geometriche dei due ambienti tipo sono quindi:

1. ambiente di dimensioni 5x3x7m con finestra 3x2m (ambiente tipo ufficio per 5-6 persone);
2. ambiente di dimensioni 5x3x7m con finestra 5x2m (ambiente tipo aula scolastica con finestra a nastro).

Per semplificare la verifica del LENI è stato supposto che i vari ambienti disponessero di un sistema di illuminazione artificiale adatto a garantire un illuminamento di 500 lx sufficientemente uniforme all'altezza del piano di lavoro (scrivanie o banchi scolastici) e non sono stati introdotti sistemi di controllo dell'illuminazione artificiale. In tal modo il entrambi i casi studio, aventi le stesse dimensioni risultano dotati di 8 apparecchi illuminanti aventi le caratteristiche descritte nella scheda tecnica in Fig. 2.

Non è stata infine considerata la presenza di sistemi per l'illuminazione di emergenza dei locali.



**Figura 2. Corpi illuminanti utilizzati nei casi studio.
(PHILIPS Leuchten Savio TCS760 2x28W/840 HFP AC-MLO / Scheda tecnica apparecchio).**

6 Calcolo del LENI per i due casi tipo

6.1 Calcolo del LENI attraverso foglio EXCEL

Per velocizzare il calcolo del LENI per i due casi studio è stato impostato un foglio EXCEL semplificato, le fasi di calcolo sono interamente automatizzate mentre, almeno in questa fase, non sono state inserite tutte le tabelle di riferimento e si rimanda direttamente alla norma per le tabelle stesse e per gli schemi grafici che illustrano i metodo geometrici utilizzati, ad esempio, per determinare la massima profondità dell'area illuminata da luce diurna.

A titolo esemplificativo si riportano le parti salienti del foglio di calcolo utilizzato per l'analisi del "Caso Studio 1", per in secondo caso vengono invece riportati i risultati ottenuti.

6.1.1 Caso studio 1: stanza 5*7*h3, finestra 3*2, destinazione d'uso: ufficio.

$A_{d,max}$	massima profondità della zona illuminata dalla luce naturale $A_{D,max} = 2,5 * (h_{Li} - h_{Ta})$	fig. C.2 e C.3	
h_{Li}	l'altezza dell'architrave della finestra dal pavimento		3,00
h_{Ta}	l'altezza del piano di lavoro (stessa altezza del davanzale) rispetto al suolo		1,00
$A_{d,max} =$			5,00

$A_{D,j}$	subarea dello spazio con luce diurna j $A_{D,j} = a_{D,max} * b_D$	fig. C.2 e C.3	
a_D	profondità dell'area che riceve luce naturale		5,00
b_D	larghezza dell'area che riceve luce naturale		5,00
$A_{D,j} =$			25,00

I_T	Indice di trasparenza $I_T = A_C / A_D$		A
A_C	area delle aperture nella facciata		6,00
A_D	subarea dello spazio con luce diurna		25,00
$I_T =$			0,24

I_{de}	Indice di profondità del locale che riceve illuminazione naturale $I_{De} = a_D / (h_{Li} - h_{Ta})$		B
a_D	profondità		5,00
h_{Li}	l'altezza dell'architrave della finestra dal pavimento		3,00

h_{Ta}	= l'altezza del piano di lavoro (stessa altezza del davanzale) rispetto al suolo	1,00
Ide =		2,50

Io	= Indice di ostruzione $I_O = I_{O,OB} * I_{O,OV} * I_{O,VF} * I_{O,CA} * I_{O,GDF}$	C
$I_{O,OB}$	= fattore di correzione per ostruzioni lineari	1,00
$I_{O,OV}$	= fattore di correzione per sbalzi orizzontali	1,00
$I_{O,VF}$	= fattore di correzione per sporgenze verticali	1,00
$I_{O,CA}$	= fattore di correzione per corti ed atri	1,00
$I_{O,GDF}$	= fattore di correzione per doppie facciate vetrate	1,00
Io =		1,00

D_C	= fattore di luce diurna per l'apertura della facciata NON considerando la finestra $D_C = (4,13 + 20,0 * I_T - 1,3 * I_{De}) * I_O$	D
I_T	= Indice di trasparenza	0,24
I_{de}	= Indice di profondità del locale che riceve illuminazione naturale	2,50
Io	= Indice di ostruzione	1,00
Dc (%) =		5,68

D	= Classificazione del fattore di luce diurna $D = D_C * \tau_{D65} * k_1 * k_2 * k_3$	E
D_C	= fattore di luce diurna per l'apertura della facciata NON considerando la finestra	5,68
τ_{D65}	= trasmissione emisferica diretta delle finestre (vetro singolo)	prosp. C.1a 0,90
k_1	= fattore che tiene conto del telaio-finestra	0,70
k_2	= fattore che tiene conto dello sporco sulla vetrata	0,80
k_3	= fattore che tiene conto dell'incidenza NON perpendicolare della luce sulla facciata	0,85

D =	2,43
------------	-------------

$F_{D,s}$	=	Fattore di disponibilità della luce diurna $F_{D,S} = a + b * \gamma_{Site}$	F
a	=	prospetto C.1b + prospetto C.2a	1,2425
b	=	prospetto C.1b + prospetto C.2a	-0,0117
γ_{site}	=	angolo di latitudine della località in cui si trova l'edificio	41,90
$F_{D,s} =$			0,75

$F_{D,c}$	=	Comando dell'illuminazione artificiale dipendente dalla luce diurna	
$F_{D,c}$	=	prospetto C.9	0,30
$F_{D,c} =$			0,30

$F_{d,n}$	=	fattore di dipendenza dalla luce diurna $F_{D,n} = 1 - (F_{D,S,n} \times F_{D,C,n})$	
$F_{D,n} =$			0,7743

F_o	=	fattore di dipendenza dall'occupazione	appendice D	
1) Se $0,0 \leq F_A \leq 0,2$				
allora: $F_o = \left[\frac{(1-F_{OC}) * F_A}{0,2} \right]$			0,00	
2) Se $0,2 \leq F_A \leq 0,9$				
allora: $F_o = F_{OC} + 0,2 - F_A$			0,90	
3) Se $0,9 \leq F_A \leq 1,0$				
allora: $F_o = [7 - (10 * F_{OC})] * (F_A - 1)$			0,00	
F_A	=	proporzione di tempo nel quale lo spazio NON è occupato	prosp. D.2	0,30
F_{OC}	=	valore in funzione del sistema di controllo dell'illuminazione	prosp. D.1	1,00
$F_o =$				0,90

F_c	=	fattore di illuminamento costante	appendice E	
LLMF	=	fattore di manutenzione del flusso luminoso che indica la riduzione del flusso specifica di una lampada nel corso della sua durata		0,89

LSF	=	fattore di durata delle lampade che indica la percentuale di lampade ancora funzionanti trascorso un certo intervallo di manutenzione	1,00
LMF	=	fattore di manutenzione dell'apparecchio che indica il calo di efficienza di un apparecchio dovuto alla sporcizia che si accumula trascorso un certo intervallo di manutenzione/pulizia; (apparecchi IP2X chiusi)	0,82
RSMF	=	fattore di manutenzione del locale che indica il calo degli indici di riflessione delle superfici perimetrali, dovuto alla sporcizia che si accumula trascorso un certo intervallo di manutenzione/pulizia.	0,96
MF	=	MF = LLMF x LSF x LMF x RSMF	0,70
			F_c = 0,85

P _n	=	potenza di illuminazione installata nel locale (W)	=	448,00
F _O	=	[8 apparecchi 2x28 W]	=	0,90
F _c	=	Fattore di occupazione	=	0,85
F _{D,n}	=	Fattore di illuminamento costante	=	0,7743
t _D	=	Fattore di dipendenza dalla luce diurna	=	2250,00
t _N	=	utilizzo nelle ore diurne (h)	=	250,00
t _y	=	utilizzo nelle ore NON diurne (h)	=	8760,00
t _{em}	=	durata di un anno normale (h)	=	0,00
P _{PC}	=	tempo caricamento illuminazione emergenza	=	0,00
P _{em}	=	potenza parassita controllo (kwh/m2 anno)	=	0,00
	=	potenza parassita emergenza (kwh/m2 anno)	=	0,00
W _{L,t}	=	$\sum[(P_n * F_c) * ((t_D * F_O * F_D) + (t_N * F_O)) / 1000]$	=	683,02
W _{p,t}	=	$\sum[[P_{PC} * (t_y - (t_D + t_N)) + (P_{em} * t_e)] / 1000]$	=	0,00
W	=	W _{L,t} + W _{p,t}	=	683,02
LENI	=	W / (sup locale) [kWh/(m²*a)]	=	19,51

6.1.2 Caso studio 2: stanza 5*7*h3, finestra 5*2, destinazione d'uso: aula scolastica.

	potenza di illuminazione installata nel locale (W)	
P_n	= [8 apparecchi 2x28 W]	= 448,00
F_o	= Fattore di occupazione	= 0,95
F_c	= Fattore di illuminamento costante	= 0,84
$F_{D,n}$	= Fattore di dipendenza dalla luce diurna	= 0,74
t_D	= utilizzo nelle ore diurne (h)	= 1800,00
t_N	= utilizzo nelle ore NON diurne (h)	= 200,00
t_y	= durata di un anno normale (h)	= 8760,00
t_{em}	= tempo caricamento illuminazione emergenza	= 0,00
P_{PC}	= potenza parassita controllo (kwh/m2 anno)	= 0,00
P_{em}	= potenza parassita emergenza (kwh/m2 anno)	= 0,00
$W_{L,t}$	= $\sum[(P_n * F_c) * ((t_D * F_o * F_D) + (t_N * F_o))]/1000$	= 548,88
$W_{p,t}$	= $\sum[(P_{PC} * (t_y - (t_D + t_N)) + (P_{em} * t_e)]/1000$	= 0,00
W	= $W_{L,t} + W_{p,t}$	= 548,88
LENI	= $W / (\text{sup locale})$ [kWh/(m²*a)]	= 15,68

6.2 Calcolo del LENI attraverso software commerciale

La verifica degli illuminamenti nei due locali scelti come caso studio è stata effettuata con un software commerciale gratuito. Tale software contiene, inoltre, un modulo che consente di utilizzare gli stessi dati inseriti per la parte illuminotecnica, completati con alcuni parametri, per effettuare la valutazione energetica del progetto secondo la norma UNI EN 15193.

Il calcolo avviene in modo totalmente integrato, i parametri geografici, geometrici e illuminotecnici inseriti per la parte progettuale vengono automaticamente utilizzati per la verifica energetica, viene solamente richiesto di integrare i parametri relativi all'assorbimento dei sistemi di ricarica dell'illuminazione d'emergenza, quelli relativi al fattore di presenza, e quelli legati all'eventuale presenza di sistemi automatici di regolazione; il fattore di dipendenza dalla luce naturale viene, invece, calcolato automaticamente.

Il flusso di lavoro prevede, quindi, che venga impostata la geometria del locale, scegliendo la localizzazione geografica e l'esposizione della finestra, segue poi la fase di assegnazione delle proprietà di riflessione dei materiali utilizzati per gli ambienti interni e per la finestra. Vengono quindi scelti e posizionati i corpi illuminanti che saranno oggetto della verifica illuminotecnica. Si procede, quindi ad approfondire il progetto con la valutazione energetica, il software riconosce automaticamente le aree a luce diurna da quelle non illuminate e, con l'inserimento dei parametri già citati è possibile effettuare velocemente la valutazione energetica dei differenti locali-casi studio. Si riportano di seguito (Figg. 3-4) le schede con i risultati ed i dati di calcolo del software per i due casi studio.

6.2.1 Caso studio 1: stanza 5*7*h3, finestra 3*2, destinazione d'uso: ufficio.

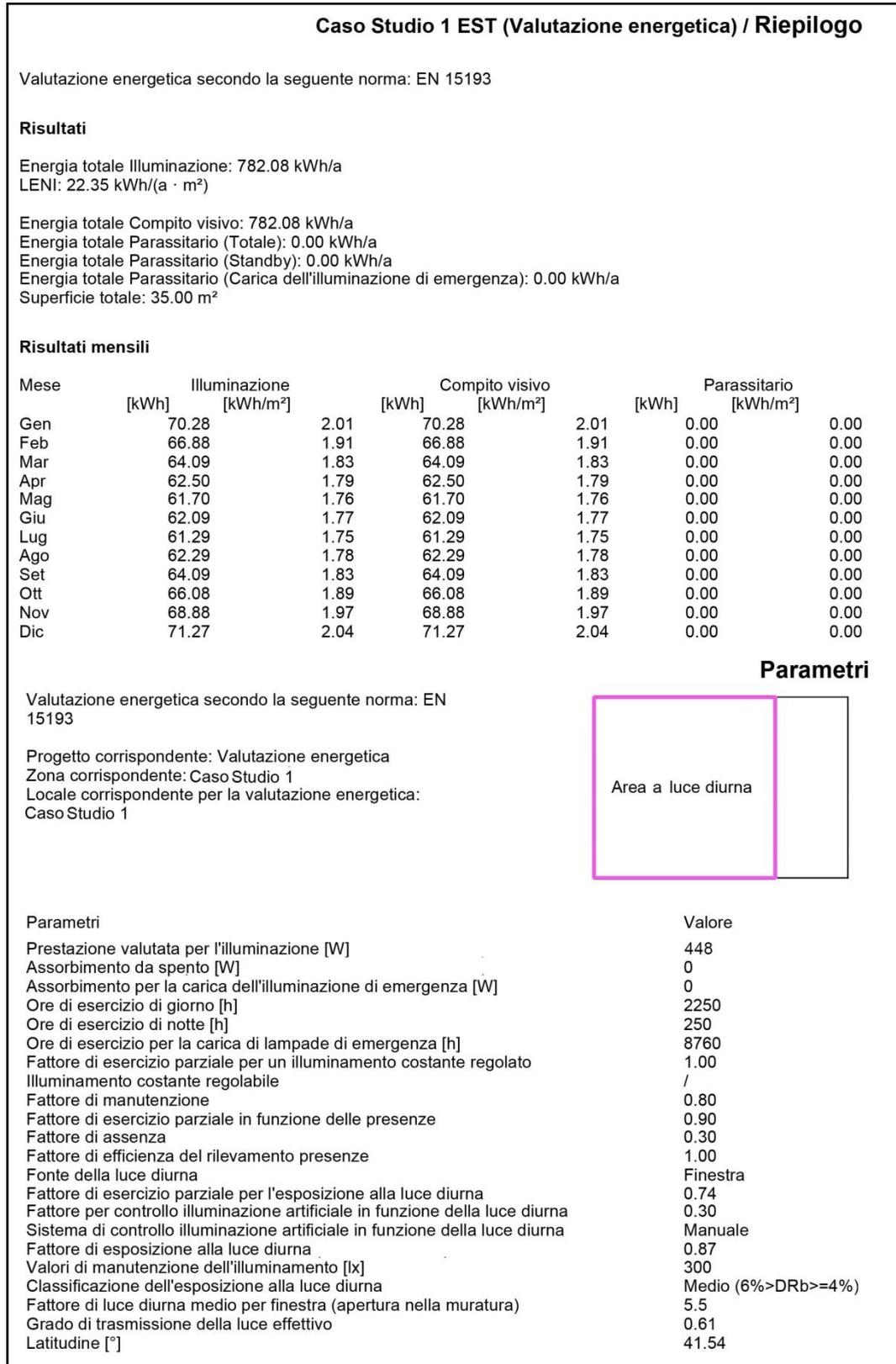


Figura 3. Caso studio 1: stanza 5*7*h3, finestra 3*2, destinazione d'uso: ufficio (Risultati software)

6.2.2 Caso studio 2: stanza 5*7*h3, finestra 5*2, destinazione d'uso: aula scolastica.

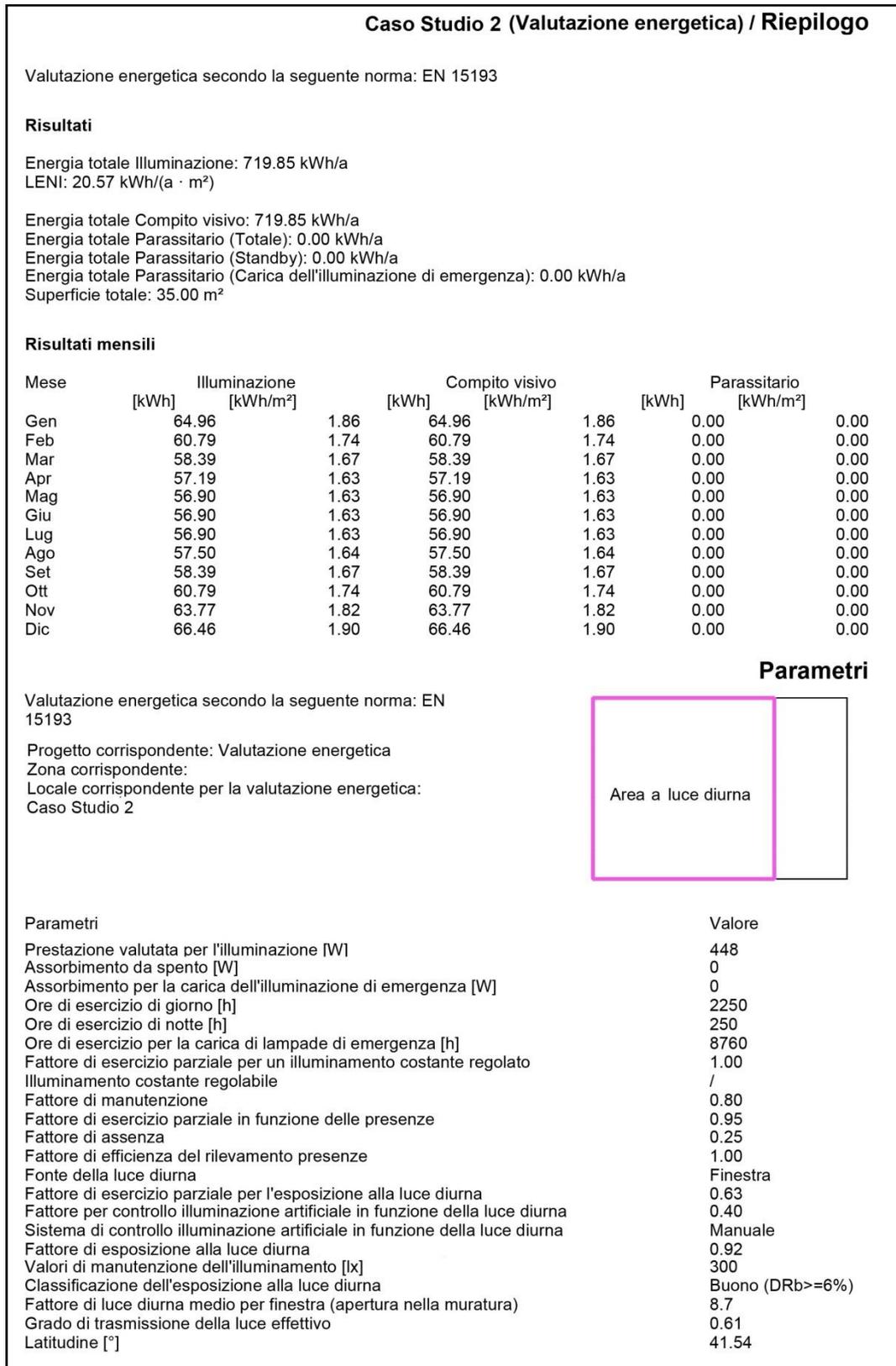


Figura 4. Caso studio 2: stanza 5*7*h3, finestra 5*2, destinazione d'uso: aula scolastica. (Risultati software)

6.3 Confronto dei risultati ottenuti

I risultati ottenuti attraverso il foglio di calcolo sviluppato sulla base della norma UNI EN 19153 possono essere confrontati con i valori ottenuti con il software commerciale di riferimento attraverso la Tab. 1.

I valori ottenuti con i due metodi sono abbastanza coerenti da consentire di affermare che il foglio di calcolo è stato sviluppato correttamente.

Tabella 1. Risultati ottenuti attraverso il foglio di calcolo EXCEL e attraverso il software di calcolo

	Dimensioni locale (m)	Dimensioni finestra (m)	Uso	Energia totale EXCEL kWh/a	LENI EXCEL kWh/(m ² *a)	Energia totale software kWh/a	LENI software kWh/(m ² *a)
Caso studio 1	5*7 h3	3*2	uffici	683	20,41	782	22,35
Caso studio 2	5*7 h3	5*2	scuole	548	16,65	719	20,57

7 Valutazioni sperimentali con modello in scala

I due casi studio scelti sono stati esaminati dapprima con un software commerciale e uno di livello scientifico in modo da ottenere una valutazione preventiva sui valori di illuminamento interno. Per effettuare la verifica sperimentale necessaria a convalidare il risultato ottenuto per via numerica, è stato quindi necessario ricorrere alla realizzazione di un modello che rappresentasse le caratteristiche degli ambienti presi in esame nella fase di calcolo.

La scelta di utilizzare un modello è stata dettata dalla pratica impossibilità di individuare un ambiente confinato con le caratteristiche utili alla sperimentazione; la necessità di poter disporre di un ambiente con volumi differenti e finestre di dimensioni diverse, situato ad una certa latitudine e, soprattutto, che avesse la parete esterna (ovvero quella contenente la finestra) orientata, per ogni gruppo di misure, secondo un'esposizione differente, sono stati i motivi che hanno spinto alla scelta di costruire un modello fisico in scala che rappresentasse la generica situazione reale.

7.1 Modello utilizzato

Sulla base di considerazioni effettuate sulla teoria dei modelli fisici in scala [11, 12] è stato utilizzato, per la fase sperimentale, un modello di ambiente in scala precedentemente realizzato [7], che è stato riassembleto e disposto per il completamento della campagna di misure.

Avendo considerato di analizzare il comportamento dell'illuminamento naturale in ambienti confinati di diverse dimensioni e con finestre anche queste variabili nella superficie, il modello era stato progettato con una superficie mobile con cui poter variare la cubatura del sistema.

Il modello è stato costruito in scala 1:5 in modo da poter simulare ambienti di dimensione variabile da 5x3x7m a 5x3x9m con una certa precisione senza che le rilevazioni potessero risentire delle dimensioni relative delle teste fotometriche utilizzate per il rilevamento.

Anche la superficie vetrata (vetro chiaro) è stata dimensionata in modo tale da poter rientrare in tutta la casistica necessaria per le prove: per questo elemento si passa da una dimensione massima, in scala, di 5x2m fino a 3x2m oscurando, mediante l'uso di pannelli opportuni, la superficie del vetro a seconda delle necessità.

Prima di iniziare la fase di progettazione e realizzazione del modello si è cercato di individuare il sito più adatto al posizionamento dello stesso per effettuare la sperimentazione: infatti trattandosi di un elemento che fuori tutto misura più di 2x1x0,70 metri (la scala è 1:5) ci si è dovuti assicurare dal rischio del sovradimensionamento rispetto a strutture come scale, ascensori, porte. Quindi si è scelto di posizionare il modello sul solaio di copertura della palazzina del dipartimento di Meccanica ed Aeronautica della Facoltà di Ingegneria dell'Università Sapienza, che per l'assenza di elementi architettonici circostanti (gli edifici limitrofi hanno tutti un'altezza minore e quindi non comportano nessun tipo di riflessione o di ostruzione) è risultato essere adatto allo scopo.

La struttura del modello è stata realizzata con dei profili metallici ad L (tipo Safim) serrati mediante bullonatura; per unire i diversi moduli è stato utilizzato un sistema di attacchi a flangia sui fianchi esterni del sistema al fine di evitare di modificare le superfici interne rispetto al caso reale cui si è fatto riferimento. Con gli stessi profili metallici è stato realizzato un supporto rigido per il vetro e mediante l'utilizzo di inserti in plastica e guarnizioni in silicone sono state consentite le deformazioni per effetti termici ed è stata prevista una guida per permettere di inserire e posizionare gli elementi atti a variare le dimensioni della finestra. Per rendere mobile la parete posteriore della stanza, e modificarne di conseguenza la cubatura, è stato realizzato telaio metallico con due supporti che consentono allo stesso di scorrere su guide metalliche posizionate sui fianchi interni della struttura. Le sonde sono state fissate, mediante supporti regolabili, alla sistema appena descritto.

L'intera struttura è stata rivestita con pannelli sagomati di compensato (spessore di 6mm per evitare fenomeni di inflessione); le superfici interne hanno subito due trattamenti: è stato applicato uno strato di cementite per preparare la superficie e successivamente sono state trattate con due strati di vernice il cui colore è stato ottenuto dalla miscela di più tonalità al fine di raggiungere le caratteristiche di riflessione necessarie alla sperimentazione. Sono state colorati tutti i supporti interni, quelli delle sonde, e le guide della parete posteriore. Per assicurare la tenuta della parete posteriore rispetto a possibili rientri di luce dovuti allo scarto, necessario al movimento, tra le dimensioni di questa quelle della stanza, è stato approntato un sistema di guarnizioni in gomma (verniciate nella parte interna).

Strumentazione utilizzata e impostazione della sessione di misure

Per il rilevamento delle grandezze e delle misure utili all'analisi del comportamento del sistema sono stati utilizzati una serie di strumenti di cui si riporta una breve descrizione:

- **BABUC ABC:** acquisitore di dati provenienti da sonde; gli ingressi sono in grado di ricevere un'ampia gamma di segnali, adattando automaticamente i propri circuiti logico-elettronici alle necessità del tipo fisico del segnale proveniente dal sensore connesso. Gli ingressi vengono singolarmente configurati per il tipo di segnale, per il significato e l'ingegnerizzazione da attribuire alla grandezza. All'acquisitore è stato collegato un personal computer portatile per registrare i risultati su file Excel e per gestire il sistema di misura.

- **Sonde:** per l'analisi è stato necessario l'uso di diverse tipologie di sonde:

1. sonda luxmetrica CIE 0-25000 lux con tolleranza $\pm 1.5\%$ sul valore letto (lux (cod. BSR001)), campo di misura 0-300 mV, segnale analogico lineare, correzione del coseno;
2. sonda luxmetrica CIE 5-100000 lux con tolleranza $\pm 1.5\%$ sul valore letto (lux (cod. BSR003)), campo di misura 0-300 mV, segnale analogico lineare, correzione del coseno;
3. sonda per la misura della radiazione globale, 0-1500 con tolleranza 5% sul valore letto , sensibilità spettrale 300-1000nm, senza correzione del coseno.

Sono state utilizzate: tre sonde del tipo 1, distribuite sul piano di lavoro del modello sul fondo della stanza in modo da rilevare sempre il valore del punto più sfavorito, una sonda di tipo 2, posizionata all'esterno del modello lontano da superfici che potessero influire su una corretta rilevazione dei dati.

Alle prime due classi appartengono sensori che hanno la capacità di misurare l'illuminamento secondo la risposta dell'occhio umano.

Infine sono state utilizzate due sonde del tipo 3 posizionate all'esterno su una struttura di supporto che ha la funzione di riparare il sensore dall'illuminamento diretto del Sole al fine di ottenere i valori della componente di radiazione sia totale che diffusa e quindi, dalla loro differenza, anche quelli della componente diretta.

In Fig. 5 viene riportato il modello nel suo insieme con la disposizione dei sistemi utilizzati per effettuare le misure sperimentali.

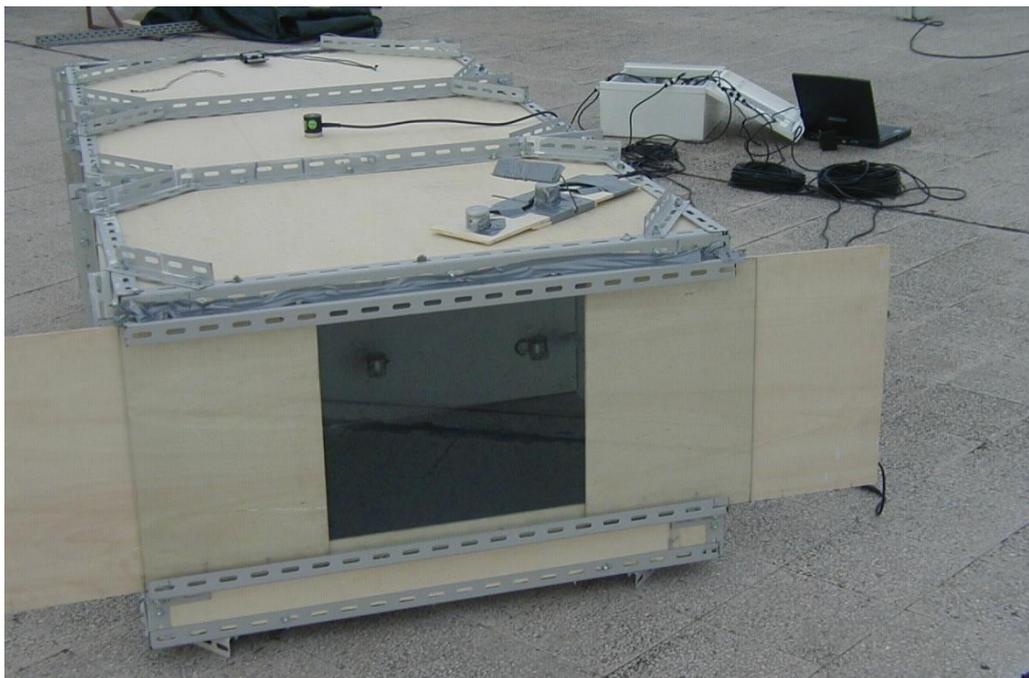


Figura5. Modello completo con apparato di misura in sede

Nella programmazione delle sessioni di misura si è tenuto conto di diversi fattori:

- tempo di adeguamento delle sonde utilizzate per la misura dell'illuminamento interno;
- tempo di adeguamento delle sonde che misurano la radiazione;
- incertezza delle prime misure successive alla variazione della geometria del modello;
- rata di acquisizione del BABUC ABC;
- numero di canali da utilizzare;
- memoria necessaria per i dati rilevati.

Tutte le sonde utilizzate hanno un tempo di risposta pari a 50ms mentre per il BABUC ABC la rata di acquisizione è programmabile da 1 sec. a 12 ore con un tempo di scansione di 0,5 secondi ad ingresso. Si è deciso di utilizzare 6 canali separati per le sei sonde: quindi, con il tempo di scansione indicato prima, per ogni rilievo sono necessari 3 secondi.

Si è scelto di effettuare, per ogni sessione di misure, 10 rilievi al minuto (6 valori utili per ogni rilievo) della durata totale quindi di 30 secondi e di ripetere questa procedura per 5 volte: dovendo, ad esempio conoscere i dati alle ore 08:00 la sessione delle misure inizia alle ore 07:58 e termina alle ore 08:02. Questa scelta è stata dettata dalla considerazione che i fenomeni oggetto dell'analisi hanno tempi di variazione non confrontabili con i tempi necessari alle misure e quindi il ripetere queste procedure ha garantito un elevato numero di dati disponibili.

Questa scelta ha consentito di assicurare un periodo di tempo necessario (circa 30 secondi) all'operatore per intervenire sul modello e poter effettuare le variazioni relative ai casi da analizzare delle dimensioni della stanza o della finestra. Si è comunque tenuto conto della possibilità che le prime misure relative ad una nuova configurazione geometrica potessero essere influenzate proprio dal detto intervento, escludendo dall'operazione di calcolo della media i primi 3 rilievi del primo minuto delle misure riguardanti la nuova configurazione.

8 Risultati delle misure effettuate

I due casi studio sono stati dapprima analizzati attraverso i software di simulazione; i risultati di tali simulazione sono stati poi utilizzati per verificare la correttezza dell'andamento dei valori rilevati durante le due campagne di misure.

Le sessioni di misura sono state effettuate sia durante il periodo invernale [7] che durante il periodo estivo. Per avere dei dati confrontabili con i risultati dell'elaborazione dei programmi di calcolo, è stato necessario centrare ogni sessione di misure intorno al giorno 21 che è il giorno a cui fanno riferimento i dati di posizionamento del Sole utilizzati per le simulazioni software. Le condizioni di cielo in cui sono state effettuate le misure corrispondono a quelle di cielo sereno, variabile e coperto.

Si è scelto di effettuare le misure per le esposizioni sud ed est, vista la simmetria di quest'ultima con il caso ovest; sono state quindi considerate le seguenti geometrie:

- ambiente di dimensioni 5x3x7m con finestra 3x2m (Caso 1);
- ambiente di dimensioni 5x3x9m con finestra 5x2m (Caso 2).

Le misure sono state effettuate con scansioni temporali diverse in modo da ottenere un gamma di valori distribuita nel tempo. I grafici riportano i valori rilevati nell'ambiente interno dalla sonda posta nel punto più sfavorito della stanza a seconda dell'orientamento considerato.

Per le misure relative al mese di Febbraio si riporta a titolo esemplificativo il grafico relativo al caso 1, esposizione est, e sud (Figg 6-7), altrimenti si fa riferimento a [7], le misure relative al mese di Giugno, invece, sono riportate nei grafici in Figg. 8-11.

8.1 Esposizione EST, Febbraio

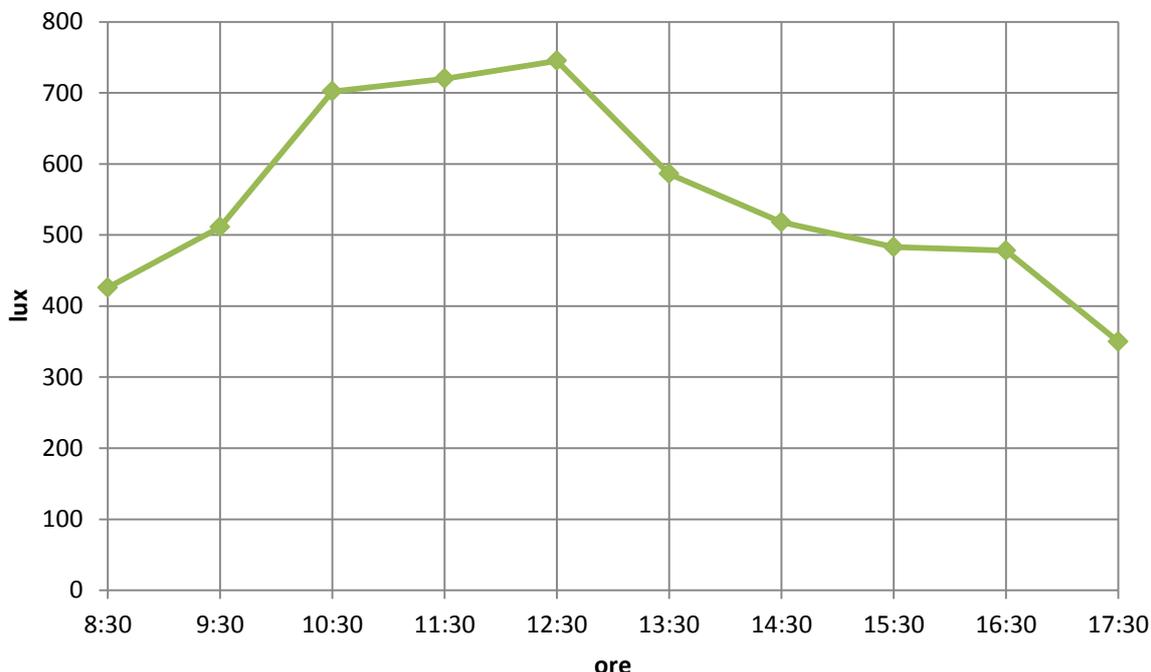
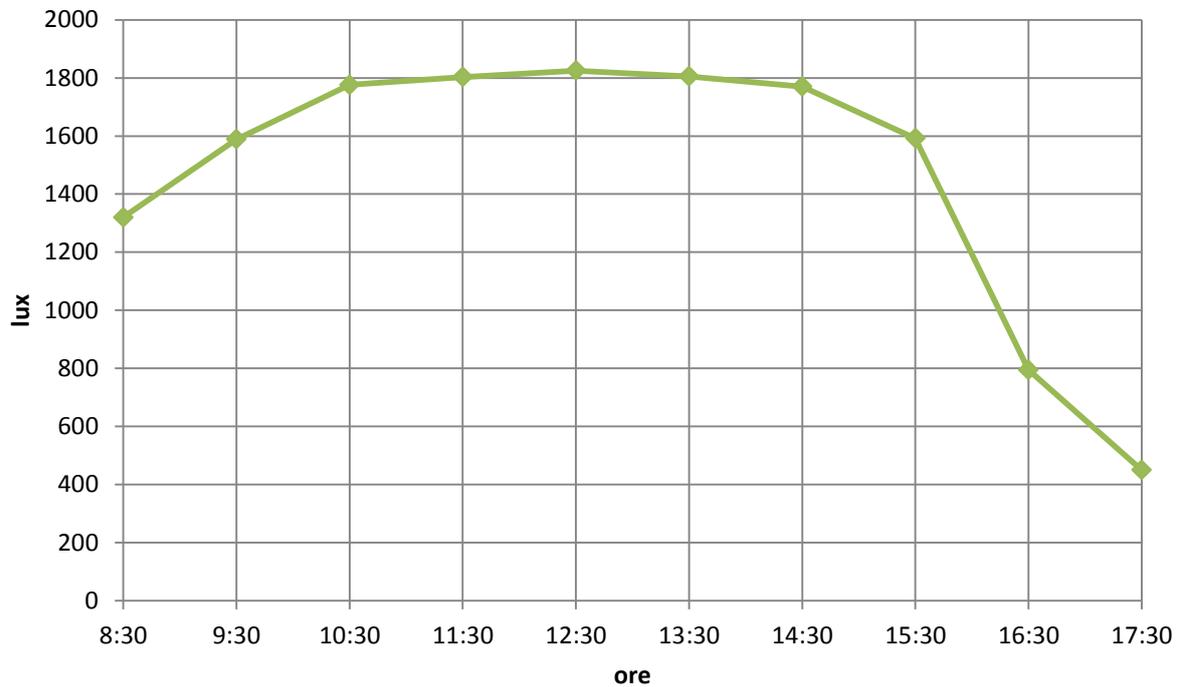


Figura 6. Roma. Misure del 21 FEBBRAIO, Caso studio 1 (stanza 5x7m finestra 3x2m).

8.2 Esposizione SUD, Febbraio



7 Figura 7. Roma. Misure del 21 FEBBRAIO, Caso studio 1 (stanza 5x7m finestra 3x2m).

8.3 Esposizione EST, Giugno

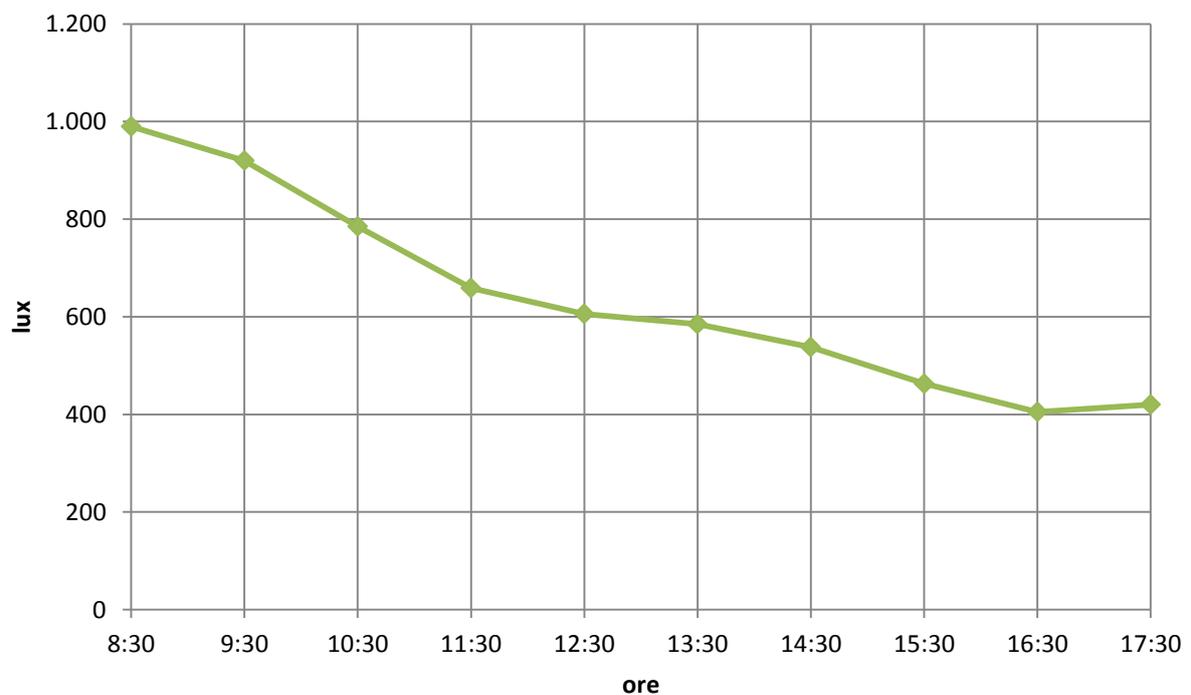


Figura 8. Roma. Misure del 21 Giugno, Caso studio 1 (stanza 5x7m finestra 3x2m).

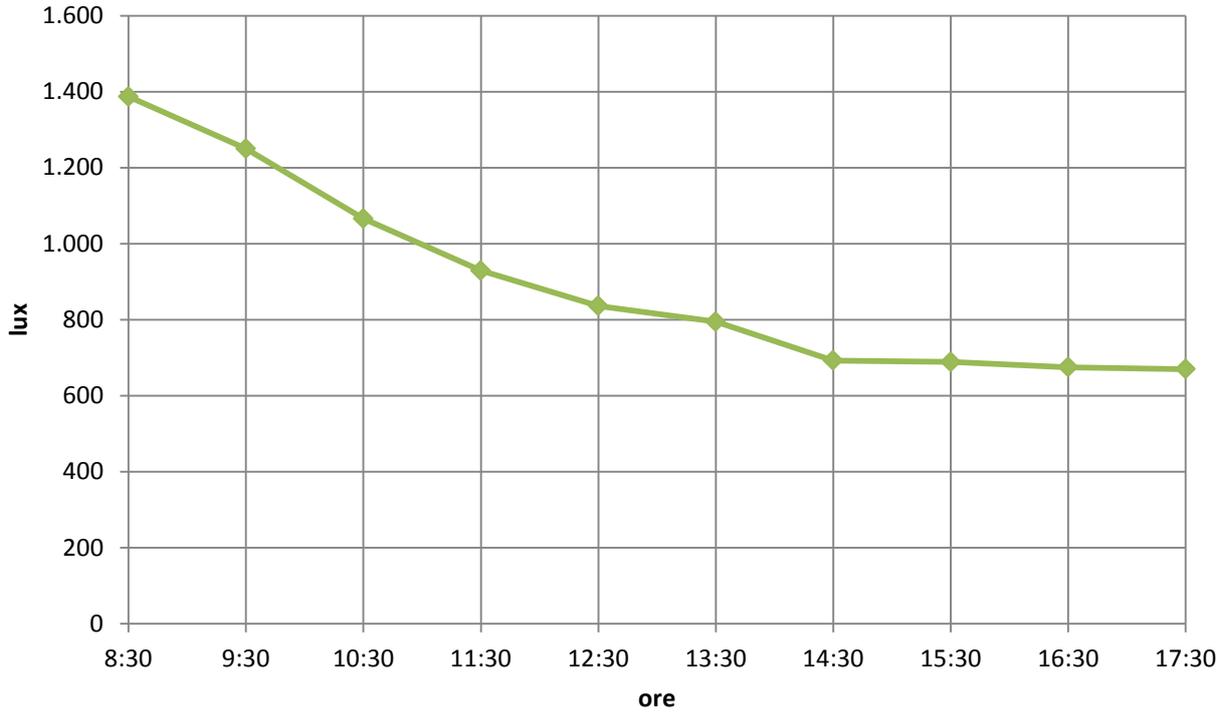


Figura 9. Roma. Misure del 21 Giugno, Caso studio 2 (stanza 5x7m finestra 5x2m).

8.4 Esposizione SUD, Giugno

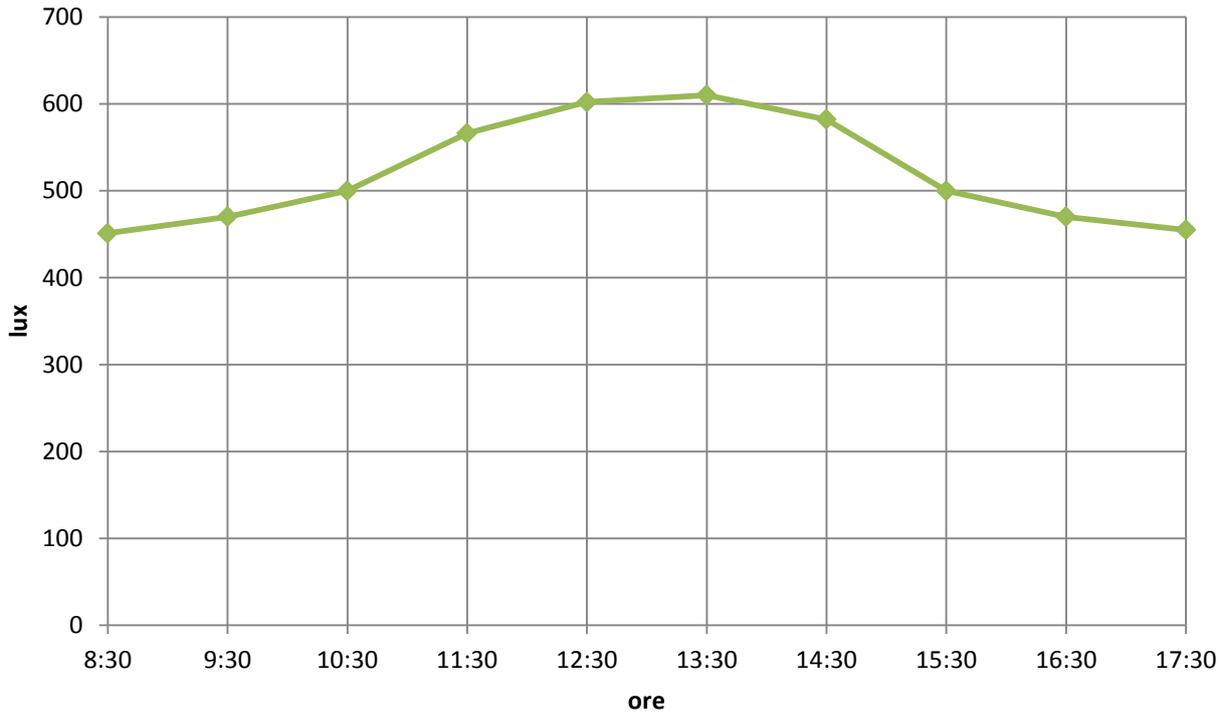


Figura 10. Roma. Misure del 21 Giugno, Caso studio 1 (stanza 5x7m finestra 3x2m).

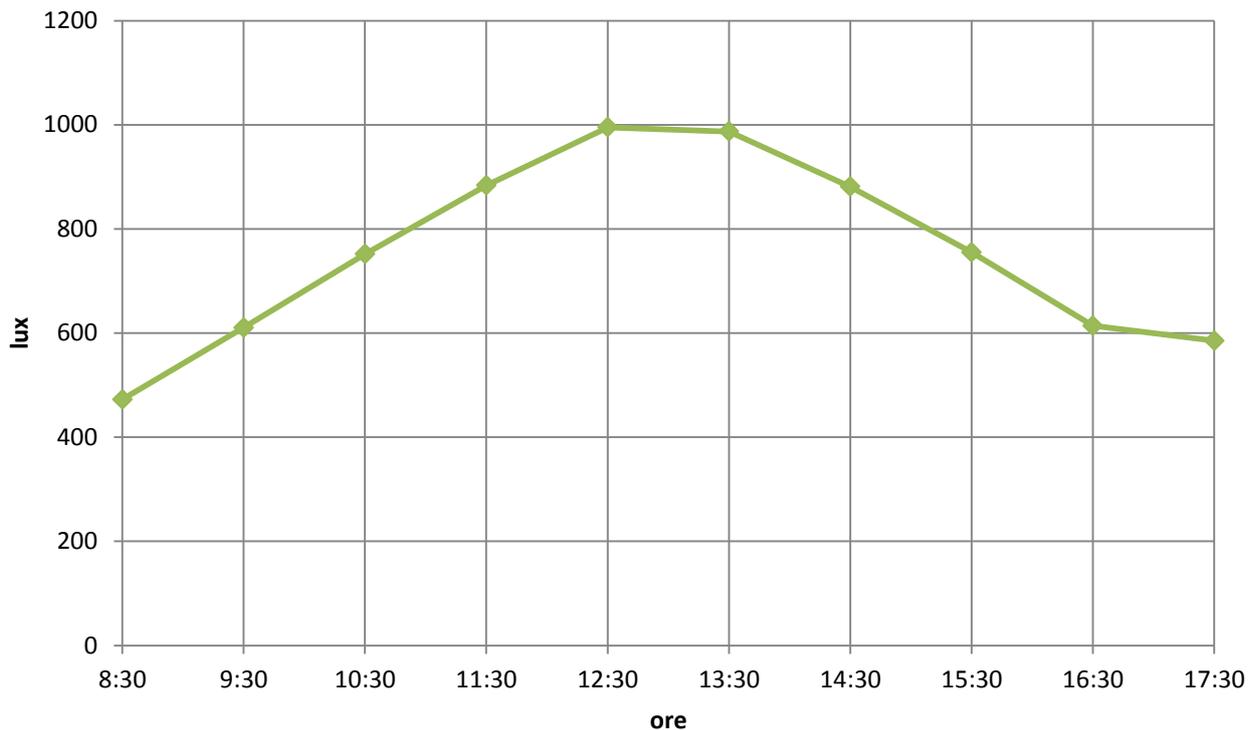


Figura 11. Roma. Misure del 21 Giugno, Caso studio 2 (stanza 5x7m finestra 5x2m).

9 Verifica dei consumi energetici effettivi

Sulla base delle misure effettuate sul modello in scala per i due giorni rappresentativi dei mesi di Giugno e Febbraio, sono state redatte delle semplici tabelle contenenti gli illuminamenti interni nel punto più sfavorito dei due casi studio per l'orientamento SUD e per l'orientamento EST. Le tabelle riportano gli illuminamenti misurati in una fascia oraria tra le 8 e le 18 durante alcuni giorni nei due mesi di riferimento e sono state utilizzate per la valutazione del numero di ore in cui i valori di E_{min} superano i 500 lx imposti dalle norme di settore per lo svolgimento dei compiti visivi legati ad uffici ed aule scolastiche. Sulla base di tale valutazione sono state calcolate, in funzione del profilo orario di utilizzo proprio della destinazione del locale, le ore di accensione degli impianti illuminanti. Come previsto nel calcolo effettuato dalla normativa, per i locali destinati ad uffici sono state considerate 10 ore operative, in modo da comprendere oltre alle normali 8 ore, anche la pausa pranzo e mezz'ora prima e dopo l'orario di lavoro; per le scuole, invece, sono state considerate 8 ore.

Nelle tabelle di valutazione energetica, per ogni caso studio e per ogni orientamento e periodo considerato, sono stati inseriti gli orari giornalieri di accensione degli impianti illuminanti e sono stati quindi moltiplicati per i giorni lavorativi mensili medi (21-22 gg.) Sulla base di tali profili orari sono stati stimati sinteticamente i consumi energetici dei locali in esame per i mesi di riferimento e confrontati con i valori calcolati attraverso la normativa per i medesimi periodi.

E' importante evidenziare come, nonostante le misure di riferimento siano sempre riferibili alla sonda posta nel punto più sfavorito del modello, che nel locale reale si troverebbe in un angolo del fondo della stanza a poche decine di centimetri dal muro, tali misure restituiscano quasi sempre degli orari di accensione degli impianti di illuminazione molto ridotte rispetto a quelle che ci si aspetterebbe di dover considerare sulla base dei consumi energetici stimati dalla normativa. Considerando che difficilmente i piani di lavoro saranno posti in aree così svantaggiate della stanza, è possibile immaginare che gli impianti vengano accesi anche per un numero inferiore di ore rispetto a quelle stimate, con guadagni energetici superiori a quelli stimati.

Risulta dunque chiaro come la normativa, escludendo dal calcolo considerazioni legate alla presenza della radiazione diretta e, quindi, all'orientamento del locale in esame, restituisca risultati fuorvianti e generalmente più elevati rispetto alle condizioni reali.

Le tabelle 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16 riportano, quindi, i valori di illuminamento misurati nel punto più sfavorito dei casi studio per i due orientamenti e per i due periodi e le relative ore di accensione degli impianti, mentre le tabelle 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 e 17 riportano le relative valutazioni dei consumi energetici.

9.1 Caso studio 1

Tabella 2. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 1, esposizione EST

		DATI MISURATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	990	NO
2	9,30	920	NO
3	10,30	785	NO
4	11,30	659	NO
5	12,30	606	NO
6	13,30	585	NO
7	14,30	538	NO
8	15,30	463	SI
9	16,30	405	SI
10	17,30	420	SI
Ore accensione effettive =			3

Tabella 3. Valutazione energetica del Caso 1, GIUGNO , esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_5gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione GIUGNO	3
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive GIUGNO	62
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	56,48
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	27,55
Δ E	28,93

Tabella 4. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 1, esposizione SUD

		DATI MISURATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	451	SI
2	9,30	470	SI
3	10,30	500	NO
4	11,30	566	NO
5	12,30	602	NO
6	13,30	610	NO
7	14,30	582	NO
8	15,30	500	NO
9	16,30	470	SI
10	17,30	455	SI
Ore accensione effettive =			4

Tabella 5. Valutazione energetica del Caso 1, GIUGNO, esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_5gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione GIUGNO	4
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive GIUGNO	82
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	56,48
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	36,74
ΔE	19,74

Tabella 6. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 1, esposizione EST

		DATI MISURATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	426	SI
2	9,30	511	NO
3	10,30	702	NO
4	11,30	720	NO
5	12,30	745	NO
6	13,30	586	NO
7	14,30	518	NO
8	15,30	483	SI
9	16,30	478	SI
10	17,30	350	SI
Ore accensione effettive =			4

Tabella 7. Valutazione energetica del Caso 1, FEBBRAIO, esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_5gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	4
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	80
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	61,34
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	35,84
ΔE	25,50

Tabella 8. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 1, esposizione SUD

		DATI MISURATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	1320	NO
2	9,30	1589	NO
3	10,30	1776	NO
4	11,30	1803	NO
5	12,30	1825	NO
6	13,30	1805	NO
7	14,30	1770	NO
8	15,30	1592	NO
9	16,30	795	NO
10	17,30	450	SI
Ore accensione effettive =			1

Tabella 9. Valutazione energetica del Caso 1, FEBBRAIO, esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_5gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	1
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	20
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	61,34
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	8,96
ΔE	52,38

9.2 Caso studio 2

Tabella 10. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 2, esposizione EST

		DATI MISURATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	1.387	NO
2	9,30	1.250	NO
3	10,30	1066	NO
4	11,30	929	NO
5	12,30	836	NO
6	13,30	795	NO
7	14,30	693	NO
8	15,30	689	NO
	16,30	675	
	17,30	670	
Ore accensione effettive =			0

Tabella 11. Valutazione energetica del Caso 2, GIUGNO ,esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione GIUGNO	0
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive GIUGNO	0
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	45,65
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	0,00
ΔE	45,65

Tabella 12. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 2, esposizione SUD

		DATI MISURATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	472	SI
2	9,30	610	NO
3	10,30	752	NO
4	11,30	884	NO
5	12,30	995	NO
6	13,30	987	NO
7	14,30	881	NO
8	15,30	755	NO
	16,30	614	
	17,30	585	
Ore accensione effettive =			1

Tabella 13. Valutazione energetica del Caso 2, GIUGNO ,esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione GIUGNO	0
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive GIUGNO	0
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	45,65
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	0,00
ΔE	45,65

Tabella 14. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 2, esposizione EST

		DATI MISURATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	821	NO
2	9,30	762	NO
3	10,30	885	NO
4	11,30	1178	NO
5	12,30	1195	NO
6	13,30	1203	NO
7	14,30	1031	NO
8	15,30	879	NO
	16,30	798	
	17,30	822	
Ore accensione effettive =			0

Tabella 15. Valutazione energetica del Caso 2, FEBBRAIO, esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	0
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	0
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	50,29
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	0,00
Δ E	50,29

Tabella 16. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 2, esposizione SUD

		DATI MISURATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento medio punto sfavorito (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	1466	NO
2	9,30	1762	NO
3	10,30	2484	NO
4	11,30	2601	NO
5	12,30	2648	NO
6	13,30	2762	NO
7	14,30	2.639	NO
8	15,30	2.455	NO
	16,30	1.367	
	17,30	495	
Ore accensione effettive =			0

Tabella 17. Valutazione energetica del Caso 2, FEBBRAIO, esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	0
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	0
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	50,29
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	0,00
ΔE	50,29

10 Criticità riscontrate e individuazione di possibili strategie migliorative della metodologia proposta dalla UNI EN 15193

I casi tipo elencati, sono stati esaminati dapprima attraverso la metodologia proposta dalla norma, e successivamente sulla base delle misure sperimentali effettuate sul modello in scala, utilizzando sia le misure inserite in [7] relative al periodo invernale, sia nuove misure effettuate nel mese di Giugno riferibili, quindi, alla situazione estiva.

Una prima analisi dei grafici relativi agli illuminamenti interni nel punto più sfavorito del modello mostra che, tanto nel periodo invernale quanto nel periodo estivo, nei giorni in cui sono state effettuate le misure, gli orari di accensione ed utilizzo degli impianti illuminanti sono da fortemente a mediamente inferiori rispetto agli orari medi giornalieri considerati dalla normativa.

Prendendo in esame il caso 1 con finestra ad Est, e ipotizzando di poter estendere le condizioni misurate in una settimana tipo del mese di Giugno e del mese di Febbraio ai rispettivi mesi nella loro interezza avremo che, mentre la normativa considera per Giugno un consumo di 56,48 kWh e per Febbraio 61,34 kWh, calcolando le ore effettive di accensione degli apparecchi illuminanti sulla base delle misure i consumi saranno di 27,55 kWh per Giugno e 38,84 kWh per Febbraio con una differenza che per Giugno è pari a 28,93 mentre per Febbraio è pari a 25,50.

Ovviamente un'approssimazione di questo tipo sulle condizioni climatiche e di irraggiamento esterno e, quindi, di illuminamento interno comporta un margine di approssimazione che deve essere tenuto nel dovuto conto ma, data la differenza tra le due categorie di valori (calcolati in base alla norma e calcolati sulla base delle misure reali di illuminamento) è evidente che la norma sottostima il contributo della luce naturale sovrastimando per diretta conseguenza i consumi energetici per l'illuminazione artificiale.

Sulla base delle considerazioni effettuate, nell'impossibilità di effettuare misure delle condizioni reali di illuminamento o simulazioni sufficientemente accurate per ogni caso che si voglia studiare, si rende necessario tentare di predisporre una ipotesi di procedura semplificata, da approfondire in futuro, che possa consentire una stima più realistica del contributo della luce naturale nel risparmio di energia elettrica utilizzata per illuminare gli ambienti interni.

La messa a punto di tale metodologia non può essere immediata, in quanto la sua definizione deve basarsi su una appropriata conoscenza dei dati climatici e delle modalità di elaborazione ad essi legate, su una corretta interpretazione dei valori di illuminamento esterni, anche in presenza di radiazione diretta e su una adeguata valutazione dei profili orari di utilizzo degli ambienti in relazione ai compiti visivi cui sono destinati.

In un primo tentativo di approfondire la valutazione di cui sopra sarà effettuata una nuova valutazione energetica dei medesimi casi studio, utilizzando i valori di irraggiamento dovuto a radiazione diffusa e diretta dei TMY (Typical Meteorological Year) e ricavando gli illuminamenti interni analogamente a come generalmente viene fatto per la sola radiazione diffusa, cioè utilizzando un Fattore di Luce Diurna opportunamente corretto.

Generalmente il Fattore Medio di Luce Diurna viene calcolato sulla base delle caratteristiche geometriche del locale e delle caratteristiche di riflessione dei materiali e di trasparenza della finestra e viene utilizzato per ricavare dall'illuminamento esterno sul piano orizzontale, dovuto alla sola radiazione diffusa, l'illuminamento medio interno sul piano di lavoro. In tal caso, però, trattandosi di valori medi non verrebbero considerate quelle aree del locale caratterizzate da illuminamenti certamente inferiori a quello minimo necessario allo svolgimento del compito visivo che necessiterebbero comunque di illuminazione artificiale. Invece di un Fattore medio di luce diurna si è considerato inizialmente un Fattore minimo di luce diurna, ricavato dal rapporto tra l'illuminamento dovuto alla sola radiazione diffusa nel punto più sfavorito del locale e l'illuminamento esterno sul piano orizzontale, dovuto sempre alla sola radiazione diffusa. Tali valori sono stati misurati nei giorni tipo e validati attraverso le simulazioni software per un numero di giorni sufficientemente rappresentativo. Il Fattore di luce diurna minimo così calcolato risulta però relativo al punto in assoluto più sfavorito del locale che, a seconda dell'orientamento delle finestre può essere sul fondo al centro o in uno dei due angoli della stanza, in ogni caso in prossimità della parete di fondo. Poiché è difficile immaginare che in un locale come quelli studiati sia proprio l'area più disagiata ad essere

destinata allo svolgimento del compito visivo si è deciso di mediare tale valore con gli altri valori di FD calcolati attraverso un software commerciale in una fascia profonda circa 1m posizionata nell'area più sfavorita del locale esaminato.

Per far sì che la componente diretta ed i fattori legati all'orientamento da essa dipendenti non fossero totalmente esclusi dalla valutazione energetica si è ritenuto opportuno correggere tale valore attraverso dei coefficienti relazionati all'entità della componente diretta, secondo i diversi orientamenti ed orari.

10.1 Stima dei valori di illuminamento interno sulla base dei dati climatici esterni

I TMY sono dati climatici relativi ad un anno tipo, ottenuto sulle medie dei valori rilevati per un certo numero di anni, in particolare. Nei dati presi come base per il presente lavoro [8], per quanto riguarda l'irraggiamento solare, sono presenti sia i valori relativi alla componente diffusa sul piano orizzontale, sia i valori relativi alla radiazione totale che incide sugli elementi verticali nei diversi orientamenti. Per il 21 Giugno (172° giorno dell'anno), alle ore 11, avremo, ad esempio (Tab. 18):

Tabella 18. Valori relativi alla radiazione incidente su piani orizzontali e verticali per il giorno 21, Giugno, ore 11, Roma.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
DAY	HOUR	SOUTH	WEST	NORTH	EAST	HTOT	HDIR	HDIF
172	11	462	183	183	409	908	702	206

in cui nelle colonne 3-4-5-6 sono riportati i valori di radiazione totale (in W/m²) su elementi verticali per i diversi orientamenti, mentre nella colonna 7 è riportata la radiazione totale sul piano orizzontale e nelle colonne 7 e 8 le quote di radiazione diretta e diffusa sempre incidenti sul piano orizzontale. Per ottenere i rispettivi illuminamenti esterni è necessario considerare l'efficienza luminosa che, per la radiazione solare diretta è stata assunta pari a 117 lumen/W, mentre per quella diffusa 125 lumen/W.

Per ottenere i valori di illuminamento interno dagli illuminamenti esterni si è utilizzato un metodo assimilabile al metodo del fattore medio di luce diurna, cercando, però, di considerare anche la quota di radiazione diretta.

Quindi mentre per definizione il fattore medio di luce diurna è dato dalla (23):

$$\eta = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (23)$$

in cui E_{in} è l'illuminamento interno sul piano di lavoro mentre E_{out} è l'illuminamento all'esterno su un piano orizzontale non ombreggiato, in condizioni di cielo coperto, viceversa, conoscendo il fattore medio di luce diurna l'illuminamento interno sarà dato dalla (24):

$$E_{in} = \eta * E_{out} \quad (24)$$

Il fattore medio di luce diurna viene generalmente calcolato sulla base dei parametri geometrici e morfologici del locale attraverso la formula (25):

$$\eta = \frac{A_f * \tau * \xi * \psi}{A_{tot} * (1 - \rho)} \quad (25)$$

in cui A_f è l'area della finestra, τ è il coefficiente di trasmissione luminosa del vetro, ξ è il fattore finestra (rapporto tra l'illuminamento sul baricentro della finestra e l'illuminamento su una superficie orizzontale liberamente esposta alla volta celeste), ψ è un valore che tiene conto dell'ombreggiamento indotto sulla finestra dall'arretramento rispetto al profilo esterno della muratura, A_{tot} è la somma di tutte le superfici interne del locale (pavimento, soffitto e pareti) e ρ è il fattore medio di riflessione delle superfici interne ottenuto dalla media ponderata dei valori di riflessione relativi ai diversi materiali.

Il coefficiente ottenuto in questo caso consente però di ricavare il solo illuminamento “medio” dell’interno della stanza dovuto alla sola radiazione diffusa ed è stato quindi ritenuto inadatto per una stima delle condizioni di illuminamento interno che si avvicinasse il più possibile alla realtà. Sulla base delle misure effettuate sarebbe stato possibile stimare il fattore di luce diurna “minimo” in funzione dei rapporti tra l’illuminamento interno misurato nel punto più sfavorito della stanza e l’illuminamento esterno, considerando, in questo caso la radiazione totale e, quindi, l’orientamento del locale. Il coefficiente così ottenuto sarebbe però utile per ricavare solamente l’illuminamento minimo (seppur dovuto a radiazione totale e non solo alla diffusa) nel punto meno illuminato del locale che certamente non può essere considerato particolarmente rappresentativo.

Per ovviare a tale problema si è utilizzato il fattore di luce diurna (dipendente da radiazione diffusa) relativo non al “punto” più sfavorito del locale ma all’“area” più sfavorita (η_A), dove con area più sfavorita abbiamo inteso la fascia di fondo della stanza, più distante dalla finestra nella quale il fattore di luce diurna tende a variare poco rispetto al resto dell’ambiente, e si è moltiplicato questo coefficiente per la somma dell’illuminamento esterno dovuto alla radiazione diffusa sul piano orizzontale ($E_{out,df,90}$) e l’illuminamento esterno dovuto alla sola componente diretta sul piano verticale in funzione dell’orientamento ($E_{out,dt,180,S}$) in base alla relazione (26) in modo da ottenere, appunto, un illuminamento interno medio nell’area più lontana dalla finestra del locale orientato, in questo caso, a Sud:

$$E_{in,S} = \eta_A * (E_{out,df,90} + E_{out,dt,180,S}) \quad (26)$$

Partendo quindi dai TMY e utilizzando il coefficiente corretto del fattore di luce diurna sono stati calcolati gli illuminamenti interni relativi all’area più sfavorita dei differenti casi studio. La scelta di considerare la radiazione solare diretta alla stregua della radiazione solare diffusa si basa sulla constatazione che generalmente in presenza di componente diretta all’interno dell’ambiente si fa uso di sistemi schermanti che hanno la funzione di eliminare la direzionalità riducendo la componente in ingresso e trasformandone la quota parte in ingresso essenzialmente in componente diffusa. Sia per il mese di Giugno che per il mese di Febbraio, è stato considerato il giorno 21. Per ogni giorno sono stati calcolati, ora per ora, gli illuminamenti esterni da considerare per l’orientamento EST e l’orientamento SUD e successivamente, in base alla (26) sono stati calcolati gli illuminamenti interni con i quali sono state redatte le relative tabelle che verranno utilizzate come base per effettuare le valutazioni energetiche semplificate dei casi studio.

In sintesi, quindi, il metodo può essere schematizzato attraverso i seguenti passaggi:

- 1) Calcolo con software illuminotecnico del fattore di luce diurna puntuale in condizioni di cielo coperto standard;
- 2) Calcolo del valore del fattore di luce diurna medio nella zona più sfavorita, intendendo con zona più sfavorita la fascia di fondo della stanza da parte opposta alla posizione della finestra;
- 3) Individuazione di un giorno di riferimento all’interno del TMY e conseguentemente dei valori di radiazione da utilizzare per l’applicazione della procedura di calcolo (26);
- 4) Calcolo dell’illuminamento nella zona sfavorita per moltiplicazione della radiazione solare, espressa in $[W/m^2]$, per l’efficienza luminosa della radiazione solare, espressa in $[lm/W]$, per il fattore di luce diurna medio nella zona sfavorita;
- 5) In funzione del valore ottenuto per l’illuminamento interno nella zona sfavorita, si valuta sull’accensione dell’impianto di illuminazione e sul conseguente consumo energetico orario.

10.2 Valutazione energetica effettuata con il metodo alternativo

Le tabelle 19, 21, 23, 25, 27, 31 e 33 riportano, quindi i valori di illuminamento calcolati secondo il metodo alternativo per la zona più sfavorita e le ore di accensione delle lampade per i due casi studio, per ogni periodo e orientamento considerato, mentre le tabelle 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32 e 34 riportano le rispettive valutazioni energetiche.

10.2.1 Caso studio 1

Tabella 19. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 1, esposizione EST

		DATI CALCOLATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	750	NO
2	9,30	794	NO
3	10,30	760	NO
4	11,30	646	NO
5	12,30	507	NO
6	13,30	251	SI
7	14,30	222	SI
8	15,30	206	SI
9	16,30	180	SI
10	17,30	146	SI
Ore accensione effettive =			5

Tabella 20. Valutazione energetica del Caso 1, GIUGNO , esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_5 lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione GIUGNO	5
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive GIUGNO	103
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	56,48
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	45,95
Δ E	10,53

Tabella 21. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 1, esposizione SUD

		DATI CALCOLATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	278	SI
2	9,30	408	SI
3	10,30	523	NO
4	11,30	603	NO
5	12,30	631	NO
6	13,30	603	NO
7	14,30	523	NO
8	15,30	408	SI
9	16,30	278	SI
10	17,30	189	SI
Ore accensione effettive =			5

Tabella 22. Valutazione energetica del Caso 1, GIUGNO , esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_5 lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione GIUGNO	5
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive GIUGNO	103
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	56,48
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	45,92
Δ E	10,56

Tabella 23. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 1, esposizione EST

		DATI CALCOLATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	530	NO
2	9,30	522	NO
3	10,30	539	NO
4	11,30	505	NO
5	12,30	311	SI
6	13,30	272	SI
7	14,30	239	SI
8	15,30	187	SI
9	16,30	119	SI
10	17,30	45	SI
Ore accensione effettive =			6

Tabella 24. Valutazione energetica del Caso 1, FEBBRAIO, esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_5 lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	6
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	120
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	61,34
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	53,76
Δ E	7,58

Tabella 25. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 1, esposizione SUD

		DATI CALCOLATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	242	SI
2	9,30	402	SI
3	10,30	540	NO
4	11,30	627	NO
5	12,30	644	NO
6	13,30	588	NO
7	14,30	468	SI
8	15,30	314	SI
9	16,30	161	SI
10	17,30	43	SI
Ore accensione effettive =			6

Tabella 26. Valutazione energetica del Caso 1, FEBBRAIO, esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_5 lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	9:00 -18:00
Ore giornaliere n.	9
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	6
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	2250
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	188
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	120
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	61,34
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	53,76
Δ E	7,58

10.2.2 Caso studio 2

Tabella 27. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 2, esposizione EST

		DATI CALCOLATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	1.033	NO
2	9,30	1.038	NO
3	10,30	931	NO
4	11,30	734	NO
5	12,30	487	SI
6	13,30	431	SI
7	14,30	400	SI
8	15,30	349	SI
	16,30	282	
	17,30	205	
Ore accensione effettive =			3

Tabella 28. Valutazione energetica del Caso 2, GIUGNO , esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione GIUGNO	3
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive GIUGNO	72
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	45,65
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	32,26
Δ E	13,39

Tabella 29. Riepilogo misure effettuate nel mese di GIUGNO, caso studio 2, esposizione SUD

		DATI CALCOLATI	
		GIUGNO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	319	SI
2	9,30	515	NO
3	10,30	685	NO
4	11,30	802	NO
5	12,30	844	NO
6	13,30	802	NO
7	14,30	685	NO
8	15,30	515	NO
	16,30	319	
	17,30	215	
Ore accensione effettive =			1

Tabella 30. Valutazione energetica del Caso 2, GIUGNO , esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione GIUGNO	1
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive GIUGNO	24
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	45,65
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	10,75
ΔE	34,90

Tabella 31. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 2, esposizione EST

		DATI CALCOLATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	590	NO
2	9,30	725	NO
3	10,30	735	NO
4	11,30	629	NO
5	12,30	449	SI
6	13,30	393	SI
7	14,30	345	SI
8	15,30	270	SI
	16,30	172	
	17,30	66	
Ore accensione effettive =			47

Tabella 32. Valutazione energetica del Caso 2, FEBBRAIO, esposizione EST

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	4
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	96
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193) (kWh)	50,29
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti) (kWh)	43,01
ΔE	7,28

Tabella 33. Riepilogo misure effettuate nel mese di FEBBRAIO, caso studio 2, esposizione SUD

		DATI CALCOLATI	
		FEBBRAIO	
ora		illuminamento calcolato nella zona sfavorita (lux)	Impianti ACCESI
1	8,30	350	SI
2	9,30	581	NO
3	10,30	780	NO
4	11,30	906	NO
5	12,30	931	NO
6	13,30	849	NO
7	14,30	676	NO
8	15,30	454	SI
	16,30	233	
	17,30	62	
Ore accensione effettive =			2

Tabella 34. Valutazione energetica del Caso 2, FEBBRAIO, esposizione SUD

Destinazione d'uso	UFFICIO_6gg. lav./sett.
Orario lavorativo giornaliero	8:00 -14:00
Ore giornaliere n.	7
Ore effettive di accensione FEBBRAIO	2
Assorbimento apparecchi installati (Lampade tipo fluorescenti lineari 2*28 (W))	56
N. Apparecchi	8
Potenza installata nel locale (W)	448
Ore esercizio annuali (da UNI EN 15193)	1800
ORE esercizio mensili (da UNI EN 15193)	150
ORE esercizio effettive FEBBRAIO	48
ENERGIA consumata (da UNI EN 15193)	50,29
ENERGIA consumata (da calcolo ore effettive utilizzo impianti)	21,50
ΔE	28,79

10.3 Confronto dei risultati ottenuti con i diversi metodi

La Tab. 35 riporta i risultati ottenuti nelle valutazioni energetiche, per i due casi studio, in Giugno e Febbraio per i due orientamenti, effettuate sia sulla base delle campagne di misure sia sulla base degli illuminamenti calcolati con il metodo proposto.

Tabella 35. Confronto dei risultati ottenuti nei diversi mesi, per i diversi orientamenti, per i due casi studio

		Caso 1		Caso 2	
		EST	SUD	EST	SUD
GIUGNO	UNI 15193	56,48	56,48	45,65	45,65
	Valutazione energetica basata su MISURE	27,55	36,74	0,00	0,00
	$\Delta E \%$	-51,22%	-34,96%	-100,00%	-100,00%
	Valutazione energetica basata su METODO ALTERNATIVO	45,95	45,92	32,26	10,75
	$\Delta E \%$	-18,64%	-18,70%	-29,34%	-76,45%
FEBBRAIO	UNI 15193	61,34	61,34	50,29	50,29
	Valutazione energetica basata su MISURE	35,84	8,96	0,00	0,00
	$\Delta E \%$	-41,57%	-85,39%	-100,00%	-100,00%
	Valutazione energetica basata su METODO ALTERNATIVO	53,76	53,76	43,01	21,50
	$\Delta E \%$	-12,36%	-12,36%	-14,48%	-57,24%

Dall'analisi dei valori calcolati emerge come nelle valutazioni effettuate sulla base delle misure il consumo energetico stimato sia sempre inferiore rispetto a quello calcolato dalla norma.

In particolare, si nota come la differenza tra i valori stimati dalla norma e quelli che si otterrebbero nel caso che il giorno medio considerato rappresentasse pienamente le condizioni dei due mesi considerati, è che per Giugno nel caso 1 si otterrebbe un risparmio approssimativamente del 50% per l'est e 35% per il sud, e per Febbraio rispettivamente del 41% e dell'85%, mentre per il caso 2 si arriva a percentuali di risparmio addirittura del 100%, sia per l'est che per il sud, fatto che sta a significare che la norma prevede orari di accensione che in realtà difficilmente si verificano nel concreto.

Per quanto riguarda, invece, i consumi stimati attraverso l'applicazione del metodo alternativo proposto, considerando il fatto che il calcolo fa riferimento ai dati di un giorno tipo (stesso giorno dell'anno in cui sono state effettuate le misure, 21 Febbraio per il periodo invernale e 21 Giugno per il periodo estivo), i risultati ottenuti sono da considerare decisamente positivi poiché entrambi i casi studio i valori calcolati risultano essere considerevolmente inferiori rispetto a quelli stimati con la metodologia da UNI 15193.

I risparmi energetici deducibili dal calcolo effettuato con il metodo alternativo sono quindi considerevoli poiché da una media del 15-20% in meno rispetto ai valori precedentemente calcolati con la UNI 15193 si arriva fino al 75% in meno per l'orientamento Sud di uno dei due casi studio.

Ovviamente tali risultati sono ottenuti attraverso alcune approssimazioni il cui impatto dovrebbe essere ulteriormente valutato: la radiazione diretta è introdotta, al pari della diffusa, attraverso un coefficiente che non ne consente l'esatta determinazione in base all'orario mentre la scelta arbitraria di un giorno in Giugno e di uno in Febbraio porta a risultati che sono verosimilmente medi ma che andrebbero verificati attraverso la scelta o l'elaborazione di un giorno medio effettivamente rappresentativo del mese in esame. E' opportuno evidenziare infine che i risultati ottenuti con il metodo semplificato proposto sono da ritenersi prudenziali, seppure incoraggianti, tali risultati, dovrebbero infatti essere avvalorati attraverso un opportuno ampliamento della casistica di studio e con la predisposizione di dettagliate simulazioni con software di livello scientifico atte a restituire un maggior livello di dettaglio nell'analisi degli illuminamenti interni dovuti alla luce naturale.

11 Conclusioni

In ambito terziario, con particolare riferimento a scuole ed uffici, oggetto di approfondimento del presente lavoro, l'energia utilizzata per illuminare correttamente gli ambienti interni, in modo da garantire su ogni piano di lavoro i valori di illuminamento minimi adatti ad un confortevole svolgimento del compito visivo cui tali ambienti sono destinati, costituisce una porzione considerevole rispetto ai consumi energetici di ogni edificio.

La norma indicata a livello europeo per la quantificazione dell'energia spesa per l'illuminazione artificiale degli ambienti è la UNI EN 15193, la quale propone metodi differenti per effettuare la suddetta valutazione. Il presente lavoro approfondisce l'applicazione del metodo di calcolo completo che, a partire dai parametri geometrici del locale e dalle peculiarità degli apparecchi installati, calcola l'incidenza della luce naturale nella riduzione dei consumi energetici, i fattori correttivi legati alla presenza di sistemi di regolazione ed ai profili orari di utilizzo legati alla destinazione d'uso del locale.

Dall'analisi della metodologia proposta dalla norma per la verifica di locali aventi finestre verticali emergono alcune criticità legate alla valutazione del contributo della luce naturale: la norma non considera mai l'orientamento delle facciate e, di fatto, fa una stima dei consumi energetici non considerando mai il contributo dell'illuminazione naturale diretta che risulta, invece, fortemente determinato dall'orientamento della facciata. I valori così ottenuti sono presumibilmente più elevati rispetto ai consumi effettivi che si avrebbero in un locale nel quale sia considerato l'illuminamento indotto dalla luce naturale dovuta alla radiazione totale (diffusa e diretta) e non solamente alla sua componente diffusa.

Per verificare tale ipotesi sono stati predisposti due casi studio che sono stati esaminati innanzitutto secondo la metodologia indicata dalla norma, sia attraverso un foglio di calcolo opportunamente predisposto sia ancora, per verifica, attraverso un software commerciale di progettazione illuminotecnica.

Sulla base di simulazioni e campagne di misure relative agli illuminamenti interni effettuate in due diversi periodi dell'anno (Febbraio e Giugno) su un modello in scala dei due casi studio sono state successivamente effettuate delle verifiche energetiche volte ad individuare, per ognuno dei due periodi considerati, gli orari di accensione giornalieri effettivi degli impianti illuminanti e, conseguentemente, i consumi energetici mensili. Questa prima analisi ha evidenziato come la norma sovrastimi l'energia necessaria per l'illuminazione artificiale, certamente sottovalutando il contributo della luce naturale.

Questo metodo di valutazione, seppure sufficientemente affidabile, non è certamente ripetibile per ogni valutazione energetica data la complessità tecnica ed economica del predisporre adeguate campagne di misura per qualsiasi locale si voglia esaminare. Per questo, si è quindi cercata una via alternativa e semplificata che è stata individuata nell'utilizzo dei TMY, anni tipo di dati meteorologici.

A partire dai dati contenuti nei TMY, attraverso la messa a punto di un fattore di luce diurna che tenesse conto non dell'illuminamento medio del locale, ma di quello riferibile all'area più svantaggiata dal punto di vista dell'illuminazione naturale, e considerando non più l'illuminamento dovuto alla sola componente diffusa della radiazione solare, ma anche quello dovuto alla componente diretta sul piano verticale per l'orientamento in esame, sono stati calcolati gli illuminamenti interni, per i due casi studio, nei giorni tipo di Febbraio e Giugno, per i due orientamenti geografici scelti. Sulla base di tali illuminamenti sono state effettuate nuove verifiche energetiche i cui risultati hanno dimostrato l'affidabilità del metodo proposto nella maggior parte dei casi studiati, con un margine sufficientemente elevato da giustificare approfondimenti successivi del metodo proposto.

Poiché i TMY contengono i dati meteorologici riferibili ad un intero anno, e sono disponibili per numerose località, è possibile immaginare, con le opportune valutazioni, di poter estendere il metodo. L'analisi dei valori orari nei diversi giorni può portare alla messa a punto di un giorno tipo mensile, non più scelto in modo arbitrario, ma che rappresenti con sufficiente affidabilità l'andamento dei valori di radiazione riferibili al mese in esame; ovviamente questo ragionamento può essere nuovamente esteso all'anno tipo in modo da consentire il calcolo energetico annuale e, quindi, la stima del LENI.

12 Riferimenti bibliografici

- [1] A. Köknel Yener, F. Şener, "Lighting energy performance in primary school classroom", Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency", pp. 602-607.
- [2] A. Pellegrino, V.R.M. Lo Verso, "The Energy demand for electric lighting as a consequence of different architectural building features and lighting plant characteristics", Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency", pp. 695-703.
- [3] R. Szczepaniak, M. Wilson, "Investigating Energy Requirements for Lighting: A Critical Approach to EN 15193", Proceedings of Conference "Adapting to Change: New Thinking on Comfort" Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April 2010.
- [4] D. Gazparovsky, E. Erkin, S. Onaygil, "Implementation of EPDB in the field of lighting in accordance with national condition", Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency", pp. 103-111.
- [5] D. Iatauro, P. Signorelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, "Artificial lighting energy consumption in buildings: a comparison between EN 15193 and an alternative method based on the Dresler diagrams", ENEA.
- [6] CIE 16/1970 "Daylight".
- [7] F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti, Linee guida per l'utilizzazione della luce naturale, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/2010/, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Settembre 2010.
- [8] Mazarella L. Dati climatici G. De Giorgio, Proceedings of Giornata di Studio Giovanni De Giorgio, Politecnico di Milano, Milano, 18 November, 1997.
- [9] UNI EN 15193. Prestazione energetica degli edifici. requisiti energetici per illuminazione. Marzo 2008
- [10] EC 97-2005. Guida alla manutenzione dei sistemi di illuminazione per interni. 2005
- [11] DIN 5034-4 (1994-09) Daylight in interiors - Part 4: Simplified method of determining window sizes in dwellings
- [12] CIE 110-1994 Spatial Distribution of Daylight - Luminance Distributions of Various Reference Skies.
- [13] DIALux 4.9, Manuale, 2011 DIAL GmbH.
- [14] A. Cesarano, L. Bellia, A. Fanchiotti, S. Sibilio, "Elementi di illuminazione naturale", Maggio 1996.
- [15] M. Navvab, "Scale model photometry", Istanbul, Proceedings of CIE International Lighting Congress, 2001.

13 Abbreviazioni ed acronimi

Simbolo	UdM	Descrizione
W	kWh/anno	energia totale annua utilizzata per l'illuminazione
A	m ²	area dell'edificio
W _L	kWh	energia necessaria per soddisfare i requisiti di illuminamento dell'edificio
W _P	kWh	energia necessaria per la ricarica delle batterie dei sistemi di illuminazione di emergenza e per la fase di stand-by dei sistemi di controllo
P _N	W	potenza elettrica complessivamente installata per l'illuminazione dell'edificio.
P _{PC}	W	potenza elettrica necessaria per l'alimentazione dei sistemi di controllo presenti.
F _C	adim	coefficiente correttivo che tiene conto della eventuale presenza di sistemi che mantengano l'illuminamento costante nel tempo
F _O	adim	coefficiente correttivo che tiene conto della presenza di persone
F _D	adim	coefficiente correttivo che tiene conto dell'illuminazione naturale dell'ambiente o edificio in esame
t _D	h	tempo di accensione dei sistemi illuminanti nelle ore diurne del periodo considerato.
t _N	h	tempo di accensione dei sistemi illuminanti nelle ore serali e notturne del periodo considerato.
t _Y	h	ore di lavoro presenti in un anno
P _{em}	W	potenza elettrica necessaria al caricamento delle batterie dei dispositivi di illuminazione di emergenza ove presenti
t _{em}	h	tempo necessario per la ricarica delle batterie di alimentazione dei dispositivi di illuminazione di emergenza ove presenti
F _{D,S,n}	adim	coefficiente che tiene conto della presenza di luce naturale nell'ambiente in esame e rappresenta, per il periodo in esame, il contributo dell'illuminazione naturale all'illuminamento totale richiesto nella zona considerata
F _{D,C,n}	adim	coefficiente che tiene conto della presenza di sistemi di integrazione tra luce naturale e artificiale
A _{D,max}	m	massima profondità della zona illuminata da luce naturale
h _{Li}	m	altezza dell'architrave della finestra dal suolo
h _{Ta}	m	altezza del davanzale rispetto al suolo
a _D	m	profondità della sub-zona illuminata da luce naturale
b _D	m	larghezza della sub-zona illuminata da luce naturale
h _R	m	altezza netta dell'ambiente illuminato da luce naturale
I _T	%	(transparency index) Indice di trasparenza
I _{De}	%	(depth index) Indice di profondità
I _O	%	(obstruction index) Indice di ombreggiamento
D	%	Fattore della luce diurna per la zona
D _c	%	Fattore della luce diurna per l'apertura della facciata della struttura
η _A	%	Fattore di luce diurna dell'area più sfavorita del locale
E _{out,df,90}	lx	illuminamento esterno sul piano orizzontale dovuto a radiazione diffusa
E _{out,dt,180,S}	lx	illuminamento esterno dovuto a radiazione diretta sul piano verticale orientato a Sud
E _{out,dt,180,E}	lx	illuminamento esterno dovuto a radiazione diretta sul piano verticale orientato ad Est