



## Ricerca di Sistema elettrico

# Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici

M. Zinzi, A. Mangione, G. Fasano

STUDIO PRELIMINARE PER LA DEFINIZIONE DI UNA METODOLOGIA DI CALCOLO PER LA DETERMINAZIONE DEL FABBISOGNO PER L'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE DEGLI EDIFICI

M. Zinzi, G. Fasano (ENEA)

A. Mangione (Stagista ENEA nell'ambito di Master in Progettazione Ecosostenibile, Dipartimento di Architettura Università degli Studi Roma Tre)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

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

Obiettivo: Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool materials)

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 OBIETTIVI .....	5
3 METODOLOGIA .....	7
4 CALCOLO DEL <b>LENI</b> SECONDO LA NORMA UNI EN 15193.....	8
5 CALCOLO DEL <b>LENI</b> CON DATI DI LUCE NATURALE SATELLITARI.....	10
6 APPLICAZIONI SU UN EDIFICIO DI RIFERIMENTO .....	12
7 RISULTATI .....	20
8 CONCLUSIONI.....	24
9 BIBLIOGRAFIA.....	26
10 SITOGRAFIA.....	27
11 APPENDICE A.....	28

## Sommario

Il contributo dell'illuminazione artificiale, essenzialmente nell'edilizia non residenziale, ricopre una percentuale significativa del consumo elettrico degli edifici, che può arrivare ad oltre il 40% per i grandi edifici commerciali. Il dato trova spiegazione nel fatto che, nonostante la tecnologia dell'illuminazione artificiale abbia avuto negli ultimi anni una notevole evoluzione, lo sfruttamento dell'illuminazione naturale è una strategia sempre meno utilizzata. La norma UNI EN 15193:2008 "Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione" consente di stimare il consumo di energia elettrica per illuminazione via calcolo, tenendo conto del contributo del daylighting. La norma si basa su una serie di dati pre-calcolati che però non tengono conto delle condizioni climatiche della singola località, introducendo un livello di approssimazione che merita analisi approfondite. Il documento presente pone le basi per un metodo alternativo, basato non su dati pre-calcolati ma su misure dei livelli di illuminamento a terra, che consentono di stimare in modo più accurato l'effettivo fabbisogno di illuminazione artificiale, quando l'illuminazione naturale non è in grado di assicurare gli adeguati livelli di comfort per i task visivi. Il metodo proposto dalla norma e il metodo alternativo sono stati testati su un edificio con destinazione uffici e i risultati comparati per valutare le eventuali discrepanze. Le variabili considerate sono: zona climatica (Palermo, Roma, Milano) in rappresentanza delle principali aree geografiche del paese; il livello di illuminamento richiesto sul piano orizzontale (300, 500 e 750 lux, valori di riferimento per uffici in funzione di diversi compiti visivi); diverse posizioni di calcolo del fattore di luce diurna in ambiente (1, 2, 3, 4 metri dalla facciata e valore medio). I risultati evidenziano i limiti dell'attuale norma che introduce ad una considerevole sovrastima del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale. La conseguenza implicita è l'adozione erronea dei limiti di consumo degli edifici, sovrastimati e scollegati da quanto riscontrabile nella realtà, particolarmente critica nel momento in cui saranno introdotte le definizioni di edifici a consumo quasi zero. Altra criticità è legata alla riqualificazione energetica: stime elevate dei consumi di illuminazione potrebbero favorire azioni di retrofit suggerendo risparmi non congruenti con quanto riscontrabile successivamente nella pratica.

## 1 Introduzione

La prima legge in Italia in materia di risparmio energetico è la L. 30 marzo 1976 n. 373 “Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici”. Successivamente è stata emanata la L. 9 gennaio 1991 n. 10 “Norme per l’attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell’energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia”. Proprio quest’ultima è stata per diverso tempo un punto di riferimento nel suo ambito anche a livello europeo. Suoi regolamenti attuativi sono il D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412 e il D.P.R. 21 dicembre 1999 n. 551.

La normativa recente in ambito di risparmio energetico nasce dal “Protocollo di Kyoto” ratificato nel 1997. In Europa viene recepito dalla *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*, la Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002. A livello nazionale questa Direttiva è stata recepita dal D.Lgs. 19 agosto 2005 n. 192, corretto ed integrato dal D.Lgs. 29 dicembre 2006 n. 311, i cui strumenti attuativi sono il D.P.R. 2 aprile 2009 n. 59 ed il D.M. 26 giugno 2009 “Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici” (modificato dal D.M. 22 novembre 2012). Questo decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 2009 introduce un sistema di classificazione degli edifici in base alle loro prestazioni energetiche: quella complessiva dell’edificio è espressa attraverso l’indice di prestazione energetica globale *EPgl*:

$$EPgl = EPi + EPacs + EPe + EPill \text{ [kWh/m}^2\text{anno]} \quad (1)$$

dove

*EPi* [kWh/m<sup>2</sup>anno] è l’indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale;  
*EPacs* [kWh/m<sup>2</sup>anno] è l’indice di prestazione energetica per la produzione dell’acqua calda sanitaria;  
*EPe* [kWh/m<sup>2</sup>anno] è l’indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva;  
*EPill* [kWh/m<sup>2</sup>anno] è l’indice di prestazione energetica per l’illuminazione artificiale.

Ad oggi per la certificazione energetica è richiesta unicamente la valutazione degli indici di prestazione *EP* per i servizi di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria, attraverso le metodologie di calcolo definite nelle norme della serie UNI/TS 11300 parte 1 e 2, pubblicate nel 2008 con una *errata corrige* del 2010 ed attualmente in revisione. Dell’indice *EP* per la climatizzazione estiva va effettuata una valutazione qualitativa delle caratteristiche dell’involucro edilizio.

La Direttiva 2002/91/CE è stata sostituita dalla Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, recepita in Italia dal D.L. 4 giugno 2013 n. 63, convertito con modificazioni dalla L. 3 agosto 2013 n. 90.

In questa legge viene indicato per il metodo di calcolo dei requisiti energetici per l’illuminazione, la norma UNI EN 15193 del 2008 con una *errata corrige* del 2011. L’indice *EP* per l’illuminazione artificiale (il cui calcolo non è ancora obbligatorio) viene indicato nel testo con il nome di LENI (*Lighting Energy Numeric Indicator*).

Diversi studi fin qui svolti hanno evidenziato una sostanziale sovrastima dei fabbisogni energetici per l’illuminazione calcolati con il metodo presente nella norma [1][2].

## 2 Obiettivi

Analizzando i dati sui consumi di energia elettrica in Italia (Figura 1), si evidenzia un incremento dal 2000 al 2012 in tutti i settori ad esclusione di quello industriale dove c’è stata una flessione del 12%. L’incremento più marcato è quello del settore terziario dove si registra un +55%.

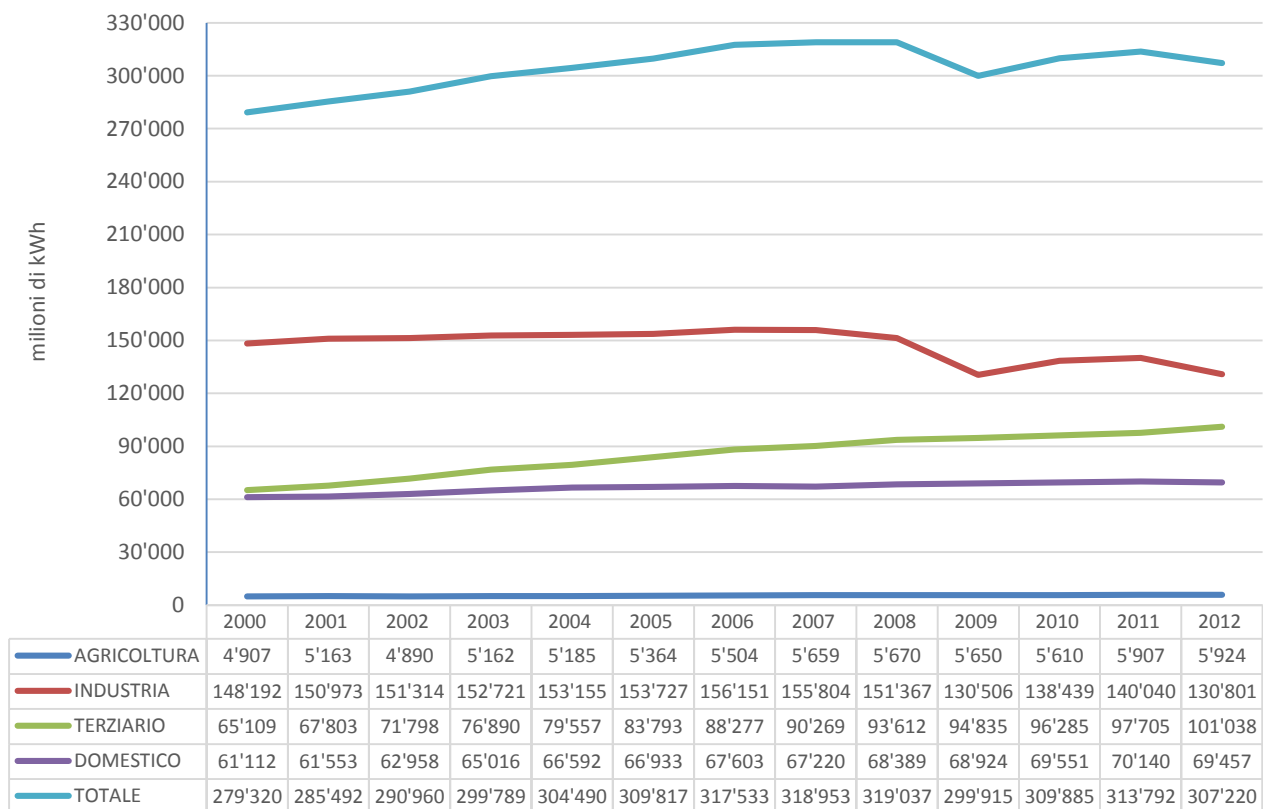


Figura 1. Andamento dei consumi di energia elettrica per settore merceologico in Italia - fonte Terna S.p.A.

Escludendo dai consumi nel terziario quelli imputabili ai trasporti e all'illuminazione pubblica, risulta che nel 2012 il fabbisogno di energia elettrica dei soli edifici è stato pari all'83%, con un peso del 27% sul totale nazionale (Figura 2).

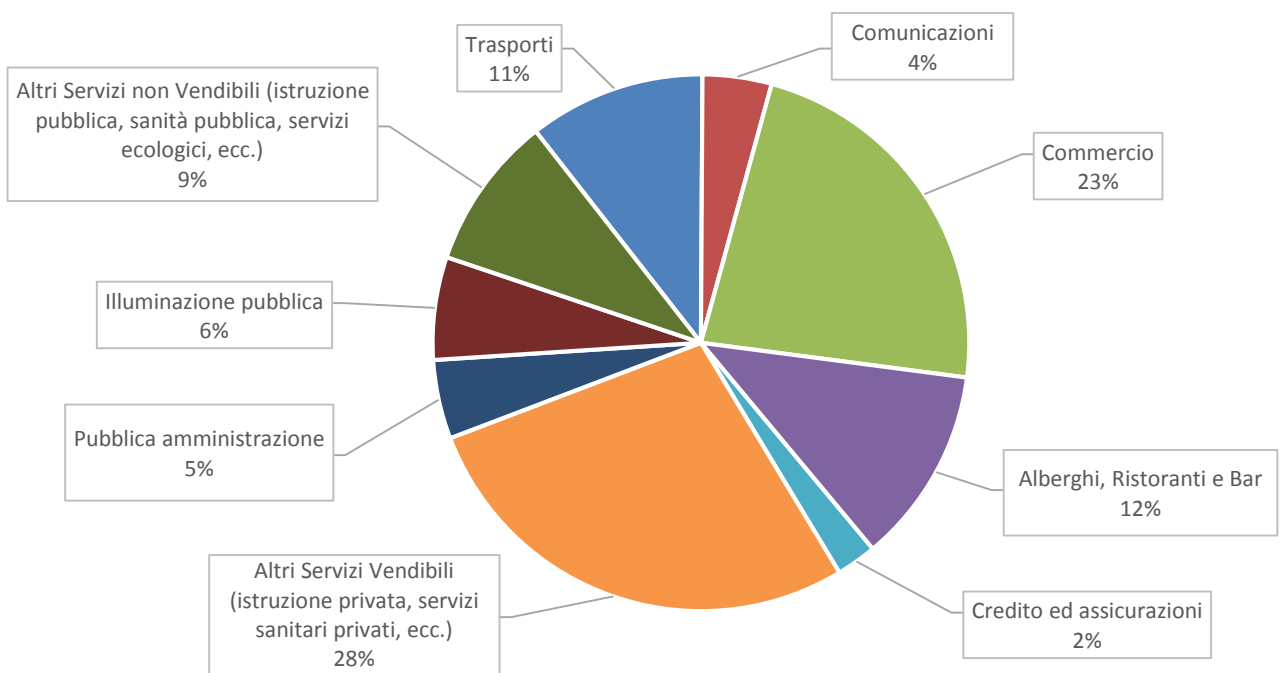
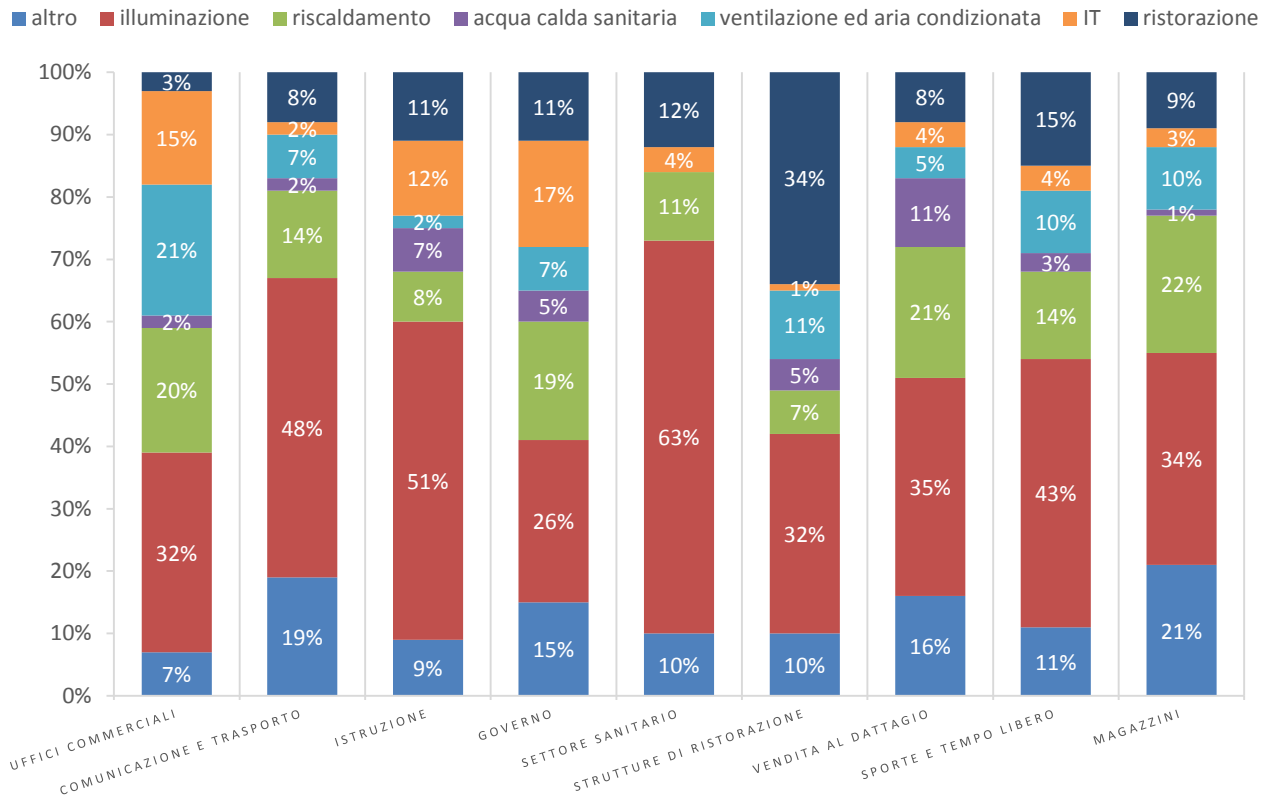


Figura 2. Consumi di energia elettrica per il settore terziario in Italia nel 2012 - fonte Terna S.p.A.

Se nel settore dell'industria l'illuminazione incide per un 4% sul totale dei consumi di energia elettrica (fonte Confindustria 2008), stando ad una ricerca svolta nel 2011 della Navigant Consulting Inc., la percentuale dei

consumi dovuti all'illuminazione varia tra il 26% negli edifici per gli uffici dell'Amministrazione Pubblica ed il 62% del settore sanitario, attestandosi in media al 13% dell'intero fabbisogno di energia elettrica nazionale (Figura 3).



**Figura 3. Distribuzione dei consumi di energia elettrica negli edifici del settore terziario - Report 1Q 2011: Intelligent Lighting Controls for Commercial Building - fonte Navigant Consulting Inc.**

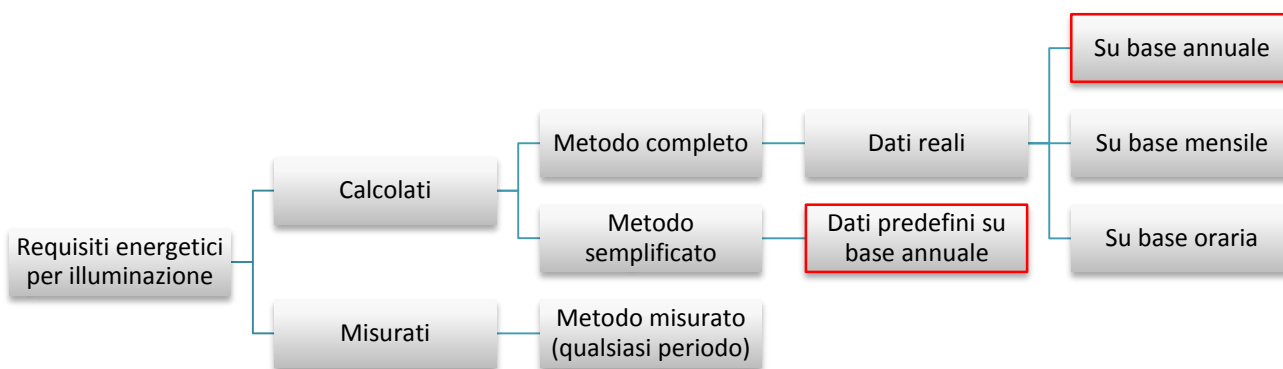
Questo dato indica quanto importante sia l'incidenza dei consumi per l'illuminazione nel settore terziario, quanto necessari siano interventi di efficientamento energetico e di conseguenza quanto sia utile una corretta valutazione di questi interventi.

Nel momento in cui sarà reso obbligatorio nella certificazione energetica il calcolo del dato prestazionale dell'impianto di illuminazione artificiale, una sovrastima del fabbisogno energetico porterebbe ad un inutile incremento dell'eventuale costo di un intervento di efficientamento, intervento che potrebbe in alcuni casi risultare anche non necessario.

L'obiettivo di questa ricerca è quello di sperimentare un metodo alternativo per il calcolo del LENI ed effettuare delle verifiche comparative al fine di valutare gli eventuali scostamenti tra questo nuovo metodo e quello descritto nella norma.

### 3 Metodologia

Per analizzare il LENI ottenuto attraverso il calcolo definito dalla UNI EN 15193, si è studiato approfonditamente il procedimento descritto nella norma realizzando un foglio di calcolo che consentisse di determinarne i valori sia con il metodo semplificato su base annuale, sia con quello completo sempre su base annuale (Figura 4). I risultati così ottenuti sono stati poi paragonati a quelli calcolati con un software commerciale per verificarne un'eventuale incongruenza.



**Figura 4. Diagramma a blocchi che illustra i percorsi alternativi per determinare l'uso dell'energia – fonte UNI EN 15193:2008**

Un ulteriore valore del LENI è stato ottenuto utilizzando i valori dei tempi di accensione dell'impianto di illuminazione calcolati su base nazionale.

Ultimo passaggio è stata la modifica del foglio di calcolo precedentemente compilato per ottenere il LENI inserendo i dati di illuminamento esterno misurati e non più stimati come avviene nella norma.

Il confronto finale è stato fra questi ultimi risultati e quelli provenienti dal calcolo secondo la UNI EN 15193 con tempi di accensione calcolati su base nazionale, questo combinando diverse variabili come i livelli di illuminamento mantenuto  $\bar{E}_m$  o la latitudine a cui potrebbe trovarsi l'edificio preso in esame.

#### 4 Calcolo del **LENI** secondo la norma UNI EN 15193

La norma UNI EN 15193 specifica la metodologia di calcolo del consumo energetico degli impianti di illuminazione in interni di edifici non residenziali di nuova realizzazione, esistenti o in ristrutturazione. L'indicatore numerico LENI può essere ottenuto attraverso il calcolo con un metodo semplificato dove è possibile assegnare alle variabili valori predefiniti indicati nei prospetti presenti nelle appendici della norma, o attraverso il calcolo con un metodo completo che permette una sua determinazione più accurata.

Il valore del LENI si ricava dalla seguente formula

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

dove  $W$  è l'energia totale usata per l'illuminazione in un anno, mentre  $A$  è la superficie a pavimento utile totale dell'edificio.  $W$  si ricava da

$$W = W_L + W_P [kWh/anno] \quad (3)$$

Il termine  $W_L$  rappresenta l'energia utilizzata per l'illuminazione annuale e si ottiene da

$$W_L = \sum\{(P_n \cdot F_C) \cdot [(t_D \cdot F_O \cdot F_D) + (t_N \cdot F_O)]\}/1000 [kWh/anno] \quad (4)$$

dove

$P_n [W]$  è la potenza di illuminazione installata totale nel locale o nella zona;

$F_C$  è il fattore di illuminamento costante;

$t_D [h]$  è il periodo di utilizzo dell'impianto nelle ore diurne in un anno;

$F_O$  è il fattore di dipendenza dall'occupazione;

$F_D$  è il fattore di dipendenza dalla luce diurna;

$t_N [h]$  è il periodo di utilizzo dell'impianto nelle ore notturne in un anno.



Il termine  $W_p$  rappresenta l'energia parassita annuale richiesta per fornire l'energia di caricamento per l'illuminazione di emergenza e l'energia richiesta dai sistemi di controllo in stand-by per i comandi di illuminazione dell'edificio e si ricava da

$$W_p = \sum \{ \{ P_{pc} \cdot [t_y - (t_D + t_N)] \} + (P_{em} \cdot t_e) \} / 1000 \text{ [kWh/anno]} \quad (5)$$

dove

$P_{pc}$ [W]	è la potenza parassita totale installata dei sistemi di controllo in un locale o in una zona;
$t_y$ [h]	è la durata di un anno;
$t_D$ [h]	è il periodo di utilizzo dell'impianto nelle ore diurne in un anno;
$t_N$ [h]	è il periodo di utilizzo dell'impianto nelle ore notturne in un anno;
$P_{em}$ [W]	è la potenza di caricamento di ingresso installata totale degli apparecchi di illuminazione di emergenza in un locale o in una zona;
$t_e$ [h]	è il tempo di caricamento dell'illuminazione di emergenza in un anno.

Nel nostro caso si è scelto di non considerare il termine  $W_p$ . Ricordiamo comunque che la norma indica dati pre-calcolati di massima per l'energia parassita consumata e per i comandi di illuminazione automatici (se utilizzati) (5 kWh/m<sup>2</sup>anno) e per l'energia consumata per l'illuminazione d'emergenza (1 kWh/m<sup>2</sup>anno). Nell'Appendice A sono indicate le procedure di calcolo delle variabili sopra indicate attraverso diagrammi a blocchi. Nell'Appendice A (Figura 1) è descritta la formula (5). Nell'Appendice A (Figura 2) è descritta la formula (4) secondo il metodo semplificato: le tabelle per  $t_D$ ,  $t_N$ ,  $F_O$ , ed  $F_D$  sono estrapolate dall'appendice G della norma.

La potenza totale installata nell'edificio preso in analisi è data da

$$P_n = \sum_i P_i \text{ [W]} \quad (6)$$

dove  $P_i$  è la potenza nominale del singolo apparecchio di illuminazione.

Nel caso in cui  $P_i$  non fosse nota, questa potenza potrà essere stimata come la potenza nominale delle lampade dell'apparecchio, se queste funzionano direttamente con la tensione della rete elettrica; nel caso in cui le lampade fossero collegate alla rete elettrica per mezzo di un regolatore o un trasformatore interno, la potenza nominale delle lampade dovrà essere moltiplicata per 1.2.

Il fattore di illuminamento costante  $F_C$  si calcola con il metodo descritto nell'appendice E della norma

$$F_C = (1 + MF)/2 \quad (7)$$

dove MF è il fattore di manutenzione dello schema, calcolabile con la procedura descritta nel rapporto tecnico CIE 097:2005.

Per il calcolo del LENI con il metodo completo, i valori di  $t_D$  e  $t_N$  possono essere gli stessi della tabella nell'Appendice A (Figura 1) o calcolati su base nazionale. Il fattore di dipendenza dall'occupazione  $F_O$  è sempre uguale ad 1 se l'illuminazione è attivata "centralmente" o se l'area che viene illuminata da un gruppo di apparecchi attivati assieme (manualmente o automaticamente) è maggiore di 30 m<sup>2</sup>, ad eccezione delle sale riunioni. Negli altri casi  $F_O$  è determinato con il metodo descritto nell'appendice D ed è legato alle variabili  $F_{OC}$  ed  $F_A$

$$F_O = 1 - [(1 - F_{OC}) \cdot F_A/2] \quad (8) \quad \text{per } 0 \leq F_A < 0.2$$

$$F_O = F_{OC} + 0.2 - F_A \quad (9) \quad \text{per } 0.2 \leq F_A < 0.9$$

$$F_O = [7 - (10 \cdot F_{OC})] \cdot (F_A - 1) \quad (10) \quad \text{per } 0.9 \leq F_A < 1$$

dove

$F_{OC}$  è il termine che indica l'efficacia del sistema di controllo nella gestione del fattore di dipendenza dall'occupazione. I valori sono riportati nel Prospetto D.1 della UNI EN 15193;

$F_A$  è il fattore di assenze e indica la proporzione del tempo nel quale lo spazio non è occupato. I valori sono riportati nel Prospetto D.2 della UNI EN 15193.

La procedura di calcolo con il metodo completo del valore di  $F_D$  descritta nel diagramma a blocchi nell'Appendice A (Figura 3), presenta delle differenze a seconda che l'ambiente preso in considerazione sia illuminato attraverso aperture sulle facciate o attraverso lucernari. Varierà il metodo di calcolo del termine  $F_{D,S}$  - Appendice A (Figura 3) o Appendice A (Figura 4) - in entrambe i casi legato alla classificazione del fattore di luce diurna:  $D$  per le facciate verticali - Appendice A (Figura 5) - o  $\bar{D}_j$  nel caso di lucernari - Appendice A (Figura 6) -. In quest'ultimo caso è necessario effettuare un ulteriore passaggio calcolando il fattore di utilizzo dei lucernari  $\eta_R$  come descritto nell'Appendice A (Figura 7).

Per il calcolo del LENI con metodo descritto nella norma è stato utilizzato sia il software commerciale gratuito DIALux 4.12 sia un foglio di calcolo appositamente compilato.

## 5 Calcolo del **LENI** con dati di luce naturale satellitari

Il metodo alternativo con il quale si propone di calcolare il LENI differisce da quello completo descritto nella norma per una maggiore precisione nella valutazione del contributo dovuto all'illuminazione naturale. Sono stati utilizzati per questo scopo i dati di illuminamento orizzontale acquisiti tra il 1996 ed il 2000 dai satelliti geostazionari Meteosat, disponibili sul database europeo gratuito consultabile sul sito [satel-light.com](http://satel-light.com) (Figura 5). I dati sono orari su una media mensile.

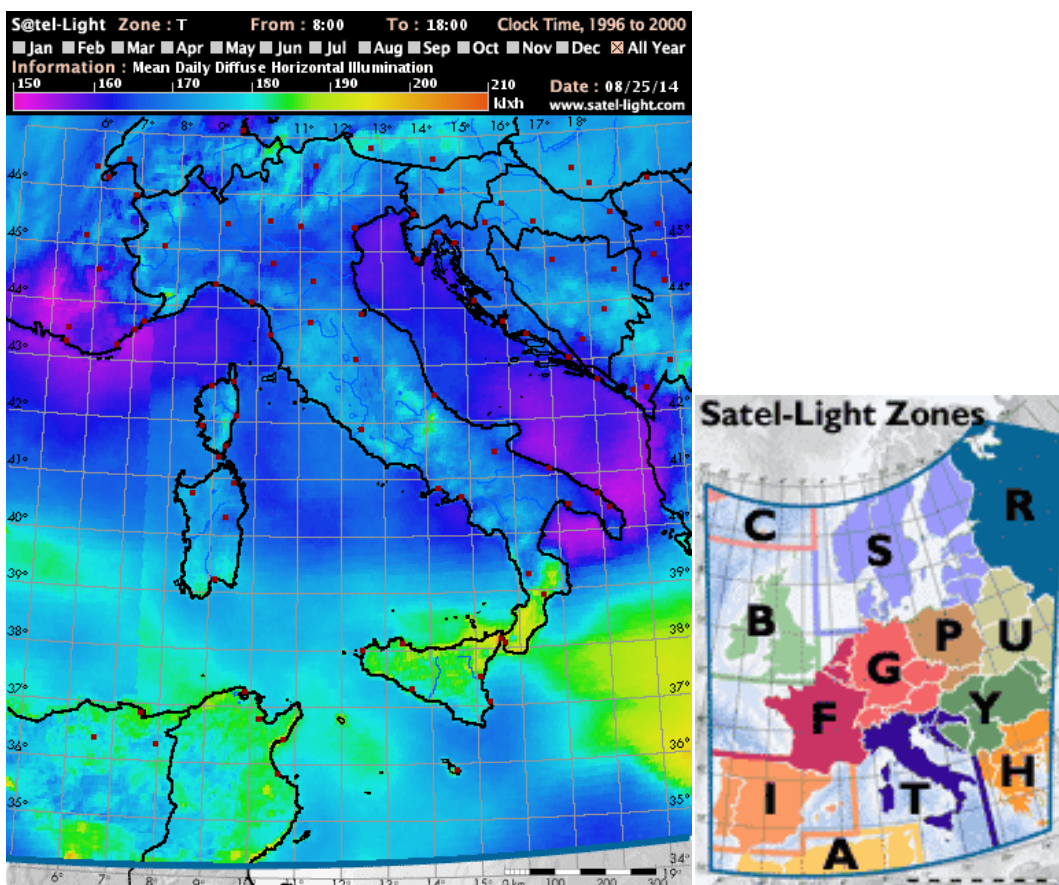


Figura 5. Valori medi annuali di illuminamento orizzontale dovuti alla sola componente diffusa della luce naturale per la zona T – fonte [satel-light.com](http://satel-light.com)

La formula (2) presente nella norma è stata modificata nel termine  $W_L$  calcolato con la formula (4): si è eliminato il fattore di dipendenza dalla luce diurna  $F_D$  e ridefinito il periodo di utilizzo dell'impianto di illuminazione sostituendo i due termini  $t_D$  e  $t_N$  con  $t_{sat}$ . Il metodo di calcolo dei termini  $P_n$ ,  $F_C$  ed  $F_O$  rimane

lo stesso della norma, descritto rispettivamente nella formula (6) per  $P_n$ , formula (7) per  $F_C$  e formule (8), (9) o (10) per  $F_O$ .

La nuova formula per il calcolo di  $W_L$  è

$$W_L = \sum(P_n \cdot F_C \cdot t_{sat} \cdot F_O) / 1000 \text{ [kWh/anno]} \quad (11)$$

dove  $t_{sat}$  è il numero delle ore di accensione dell'impianto calcolate analizzando i dati prelevati dal database di satel-light.com.

Per calcolare  $t_{sat}$  bisogna conteggiare il numero di ore in un anno in cui l'impianto di illuminazione artificiale dovrà essere in funzione per garantire i livelli di illuminamento mantenuto  $\bar{E}_m$  nell'ambiente considerato, prescritti dalla norma UNI EN 12464-1. Ogniquale volta i livelli di illuminamento esterno garantiranno da soli il raggiungimento dei livelli di illuminamento mantenuto interni, l'impianto si riterrà spento.

È possibile effettuare questa verifica a partire dal fattore di luce diurna  $FLD$ , una grandezza sintetica adimensionale che indica il rapporto tra illuminamento di una superficie posta all'interno di un ambiente comunicante con l'esterno tramite un'apertura ed una superficie posta all'esterno, nello stesso istante e in condizioni di illuminamento diffuso. Il fattore di luce diurna può essere dunque calcolato con la formula seguente:

$$FLD = \frac{E_i}{E_e} \quad (12)$$

dove

$E_i$  è il livello di illuminamento calcolato in un punto su un piano orizzontale all'interno dell'ambiente, dovuto alla luce naturale diffusa dalla sola volta celeste;

$E_e$  è il livello di illuminamento calcolato simultaneamente ad  $E_i$  in un punto su un piano orizzontale all'esterno, dovuto alla luce diffusa della sola volta celeste ed in assenza di ostruzioni.

È possibile anche calcolare valori medi del fattore di luce diurna ( $FLD_m$ ) quando  $E_i$  è non più il valore puntuale ma quello medio di una superficie presa in esame all'interno dell'ambiente considerato (può essere la totalità della superficie o parte di essa, sulla quale si ipotizza sia concentrata l'attività lavorativa).

Esistono differenti metodi per la determinazione del  $FLD$  (Figura 6), in generale essi prevedono il calcolo secondo le varie componenti della formula seguente:

$$FLD = SC + ERC + IRC \quad (13)$$

dove

$SC$  è la componente dovuta alla luce naturale diffusa che raggiunge direttamente il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato;

$ERC$  è la componente dovuta alla luce naturale diffusa riflessa dalle superfici esterne che raggiunge il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato;

$IRC$  è la componente dovuta alle riflessioni multiple della luce naturale diffusa sulle superfici interne che raggiunge il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato.

Si suggerisce di adoperare un software di calcolo illuminotecnico per ottenere valori accurati di  $FLD$  soprattutto in ambienti con caratteristiche geometriche complesse, con differenti coefficienti di riflessione delle superfici interne e di trasmittanza delle superfici vetrate verso l'esterno.

Noti il livello di illuminamento interno da raggiungere per il compito visivo svolto  $E_i$  (corrispondente al valore di  $\bar{E}_m$  tratto dalla UNI EN 12464-1) ed il  $FLD$  (o  $FLD_m$ ) dell'ambiente preso in esame, è possibile ottenere  $E_e$  che in questo caso indica il livello di illuminamento esterno che garantisce il raggiungimento di quello interno  $E_i$  prescritto, per un determinato  $FLD$

$$E_e = \frac{E_i}{FLD} \quad (14)$$

Prelevati dal database di satel-light.com i valori di illuminamento sul piano orizzontale in esterno  $E_{Sat}$  in una determinata località e per una specifica fascia oraria, si procede a confrontarli con i valori di  $E_e$  calcolati con la formula (14): nelle ore in cui si verifica la condizione  $E_{Sat} \geq E_e$ , si considera l'impianto di illuminazione

spento. Viceversa, quando il valore  $E_{Sat} < E_e$ , la sola luce naturale non potrà garantire i livelli di illuminamento interno  $E_i$  e bisognerà quindi considerare l’impianto di illuminazione acceso: la somma delle ore di accensione in un anno calcolata con questo metodo rappresenta il valore di  $t_{sat}$  nella formula (11).

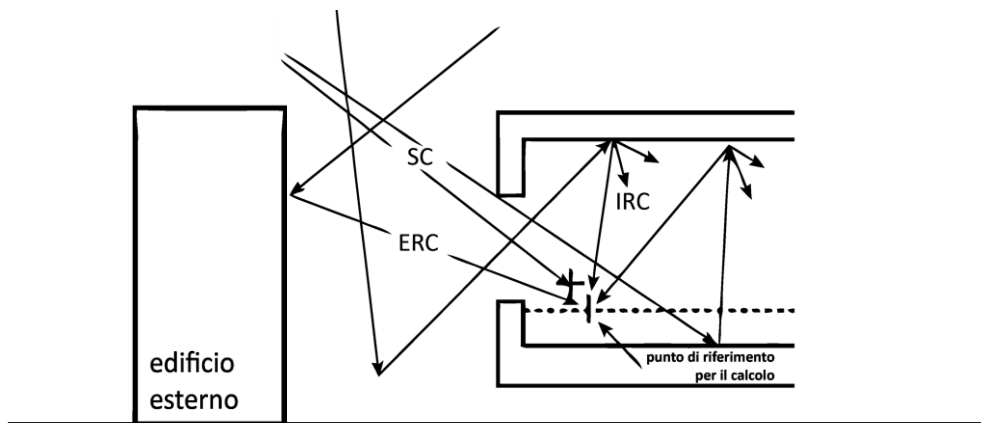


Figura 6. Componenti del FLD

Per il calcolo del LENI con questo metodo è stato utilizzato il foglio di calcolo precedentemente compilato per il metodo secondo la norma. Il file è stato modificato per poter inserire i dati provenienti dal database di satel-light.com. Il *FLD* ed il *FLDm* sono stati calcolati con il software commerciale gratuito DIALux 4.12. La media dei giorni lavorativi mensili in un anno è stata calcolata mediante i dati presenti nel sito internet giorni-lavorativi.com.



Figura 7. Edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell’ENEA – fonte Google Maps

## 6 Applicazioni su un edificio di riferimento

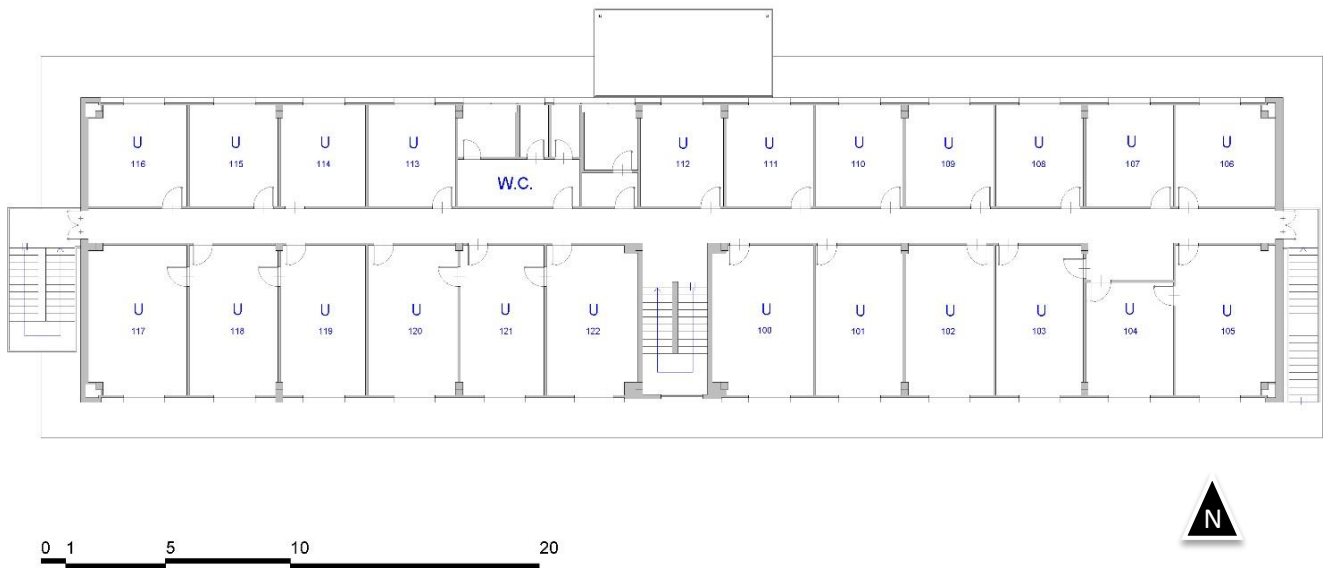
La sperimentazione dei diversi metodi di calcolo del LENI è stata condotta sull’edificio F51 (Figura 7) del Centro Ricerche Casaccia dell’ENEA a Santa Maria di Galeria (Roma) che oggi ospita gli uffici dell’Unità Tecnica per l’Efficienza Energetica.

L’esposizione dell’edificio (Figura 8) è nord/sud e non presenta significative ostruzioni esterne da considerare nel calcolo. Ha una pianta di forma rettangolare di 48 x 12 metri ed è composto da 2 piani con un’altezza interna di 2.7 metri. Un corridoio attraversa longitudinalmente l’intero fabbricato su tutti e due i piani, dividendo gli uffici con affaccio a nord da quelli con affaccio a sud. Tutti gli uffici a nord hanno

approssimativamente le stesse dimensioni di 4 x 3.6 metri. Stessa cosa per quelli sul lato sud, tutti di 6 x 3.25 metri. Ad ogni piano c'è un ambiente WC di 4.9 x 4 metri.

Tutti gli uffici hanno una finestra a nastro alta 1.4 metri della stessa larghezza della parete su cui si trovano; il davanzale è ad un'altezza di 0.9 metri dal pavimento. I serramenti sono in alluminio provvisti di vetri doppi. Non sono presenti lucernari.

Il pavimento degli uffici è in moquette verde, le pareti sono tinteggiate in bianco, i soffitti sono in pannelli di cartongesso 60x60 cm (Figura 9). Il pavimento del corridoio è in linoleum beige ed il controsoffitto è realizzato in doghe metalliche bianche. Le pareti dei bagni sono rivestite di piastrelle bianche, i pavimenti di piastrelle grigie.



**Figura 8. Planimetria dell'edificio F51**



**Figura 9. Rendering dell'ufficio tipo con esposizione sud (sinistra) e nord (destra) realizzati con DIALux 4.12**

I corpi illuminanti negli uffici sono delle plafoniere con 2 lampade fluorescenti lineari T8 da 36W con diffusore in metacrilato prismaticizzato (Figura 10): in quelli a nord sono installate 2 plafoniere, in quelli a sud 3. Nei corridoi sono installate 11 plafoniere ad incasso con una lampada fluorescente lineare T8 da 36W. Nei bagni sono presenti 5 plafoniere con una lampada fluorescente lineare da 24W.

I comandi di accensione e spegnimento sono per tutti gli ambienti manuali e non prevedono la possibilità di regolazione del flusso luminoso.

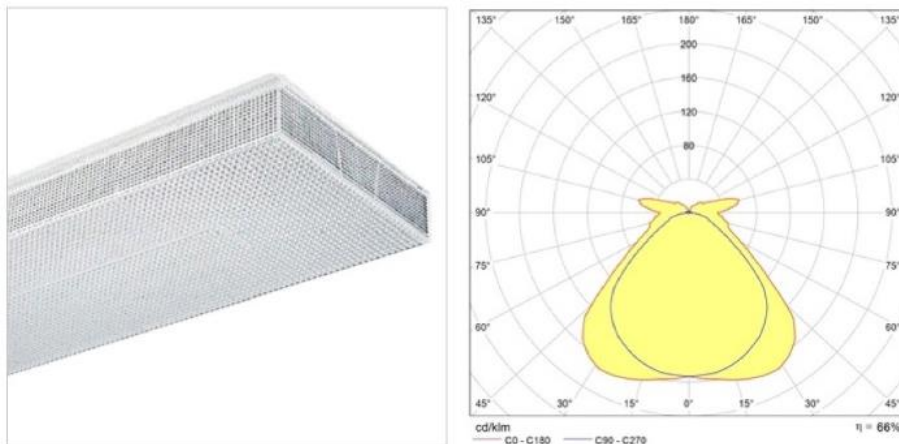


Figura 10. Corpo illuminante installato negli uffici dell'edificio F51

Si è scelto di calcolare i valori del LENI sull'edificio F51 posizionandolo idealmente a tre latitudini differenti - Milano (9.20°), Roma (12.50°), Palermo (13.40°) - per poterne osservare le variazioni in base alla posizione geografica.

Per prima cosa sono stati eseguiti i calcoli con il metodo descritto nella norma avvalendosi di un foglio di calcolo appositamente compilato. I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti attraverso il software DIALux 4.12 ricostruendo gli ambienti dell'edificio F51: l'ufficio con affaccio a nord, quello con affaccio a sud, il corridoio e l'ambiente WC. Sono stati impostati valori di riflettanza delle pareti e dei soffitti al 60% e dei pavimenti di ogni ambiente al 20%. Il piano di lavoro negli uffici è stato impostato alla quota delle scrivanie a 0.75 metri e nel corridoio e negli ambienti WC a quota 0. I dati di progetto impostati per i serramenti sono

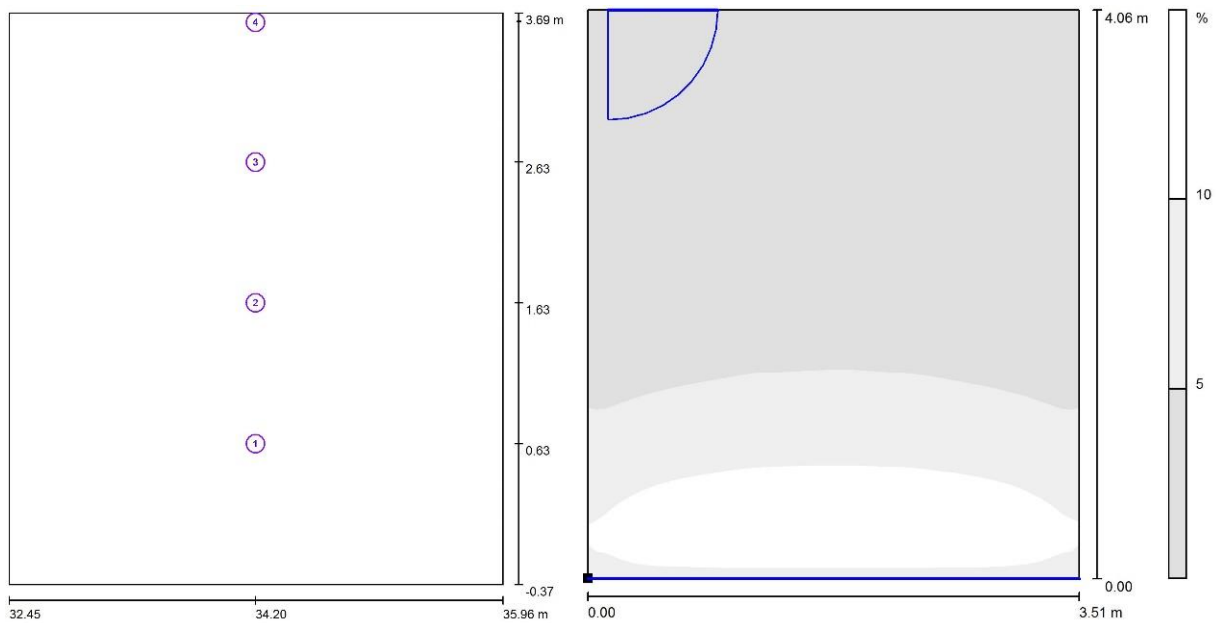
- $\tau_{D65}$  (trasmissanza emisferica della superficie vetrata) = 0.82
- $k_1$  (fattore che tiene conto del telaio del sistema di finestratura) = 0.80
- $k_2$  (fattore che tiene conto dello sporco sulla vetratura) = 0.80
- $k_3$  (fattore che tiene conto dell'incidenza non perpendicolare della luce sulla facciata) = 0.85

Il confronto tra i risultati ottenuti con il foglio di calcolo e quelli ottenuti con il software ha dimostrato l'equivalenza dei due metodi di calcolo.

Si è ripetuto il calcolo del LENI con il metodo completo utilizzando però valori di  $t_D$  e  $t_N$  ridefiniti utilizzando gli orari di alba e tramonto presenti sul sito internet [sunearthtools.com](http://sunearthtools.com), incrociandoli con i dati nazionali sui giorni lavorativi presenti sul sito internet [giorni-lavorativi.com](http://giorni-lavorativi.com).

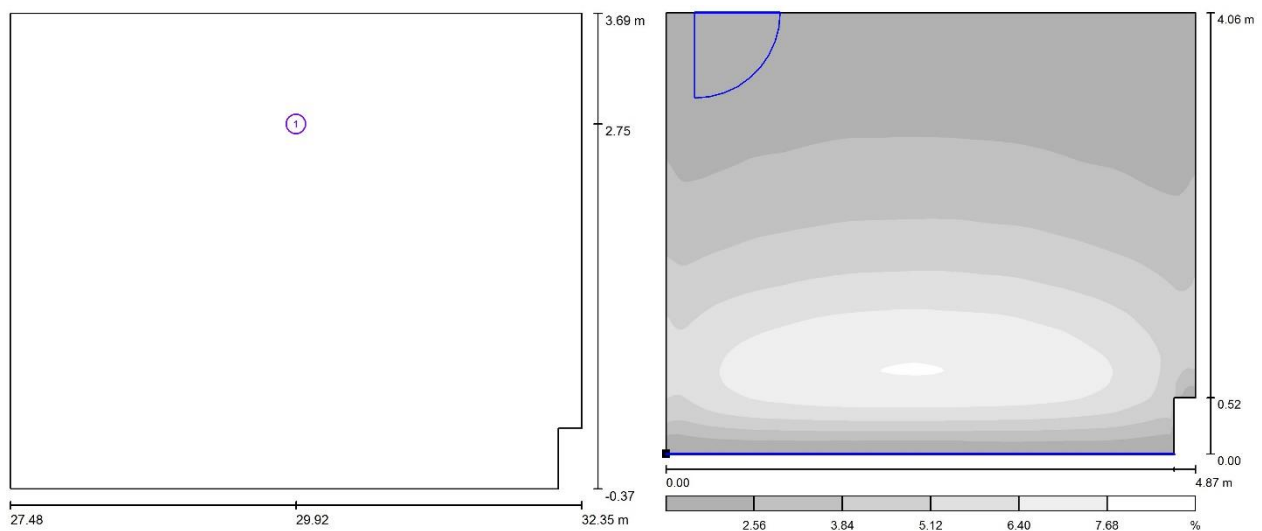
Per i valori del LENI con il metodo alternativo proposto, si è proceduto al calcolo del termine  $t_{sat}$  nella formula (11) determinando innanzitutto il fattore di luce diurna  $FLD$  tramite il software DIALux .

Negli uffici è stato misurato il fattore di luce diurna medio  $FLD_m$  e quello puntuale ad 1, 2, 3 e 4 metri di distanza dalla finestra (Figura 11), (Figura 12). Nel corridoio (Figura 14) e negli ambienti WC (Figura 13) è stato misurato il  $FLD_m$  e quello puntuale dove era minore l'incidenza della luce naturale.



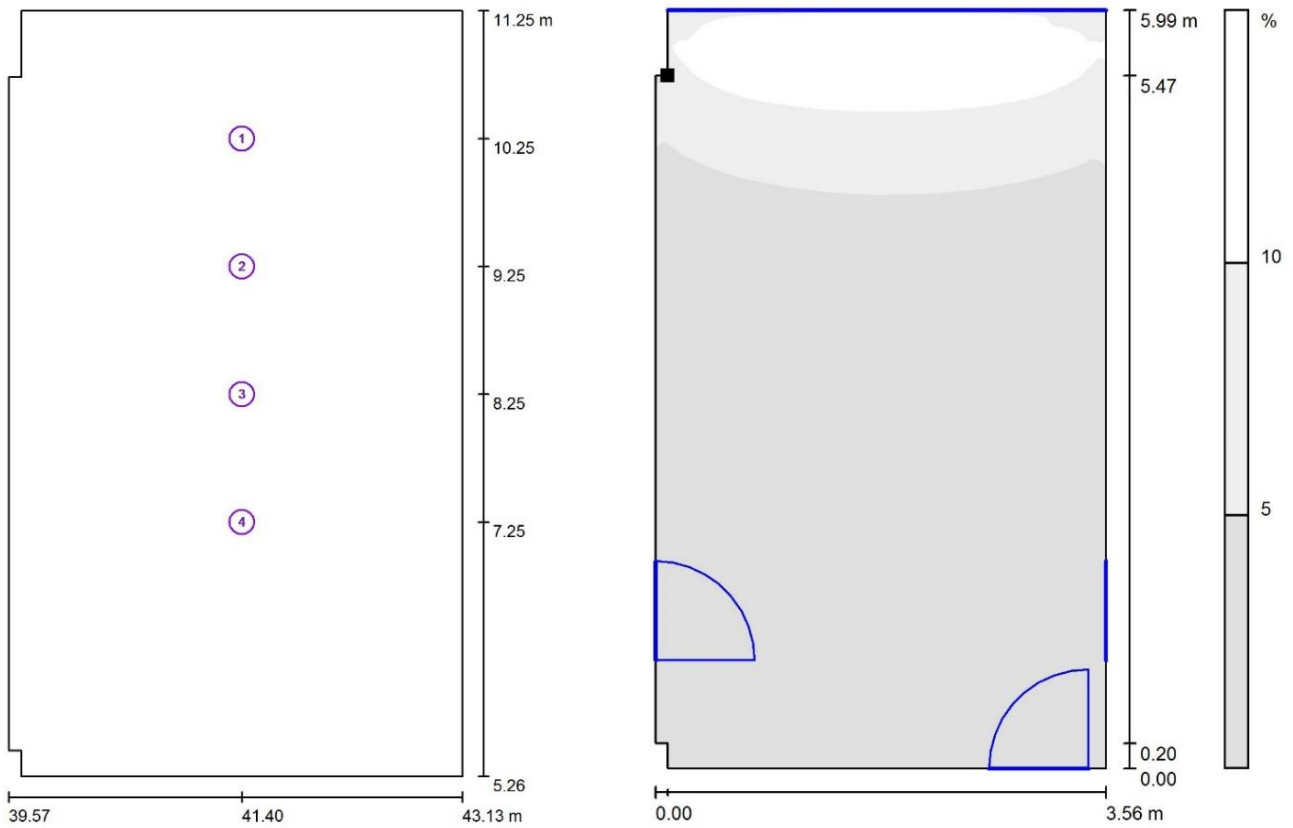
ufficio esposto a nord		
punto	distanza dalla finestra [m]	FLD
1	1	8.2
2	2	3.2
3	3	1.7
4	4	1.5
FLDm		4.7

Figura 11. FLD puntuale e medio negli uffici esposti a nord dell'edificio F51 calcolati con il software DIALux



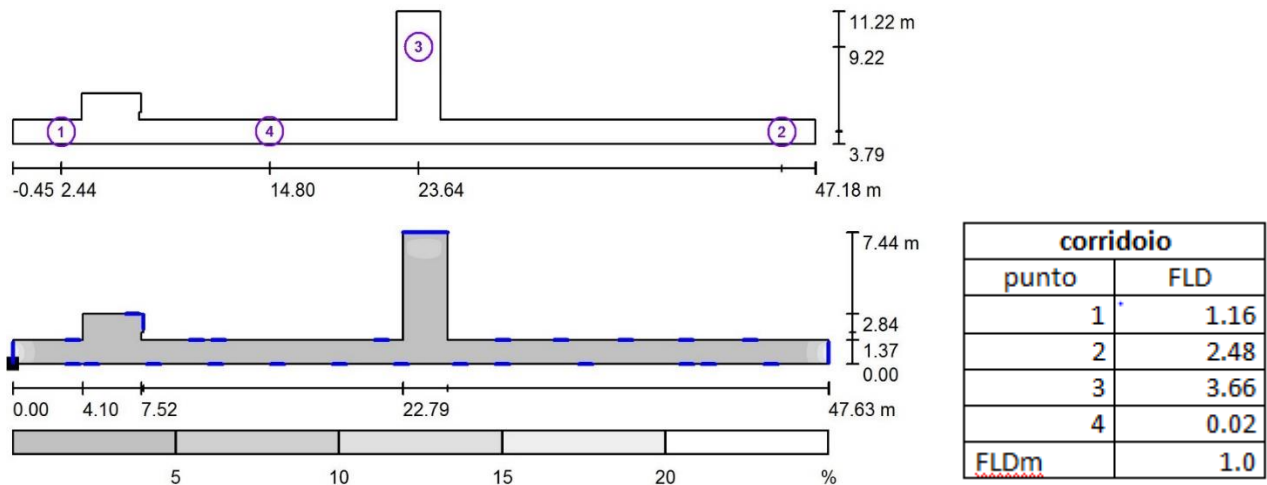
WC	
punto	FLD
1	2.4
FLDm	3.9

Figura 12. FLD puntuale e medio nell'ambiente WC dell'edificio F51 calcolati con il software DIALux



ufficio esposto a sud		
punto	distanza dalla finestra [m]	FLD
1	1	8.0
2	2	3.0
3	3	1.4
4	4	0.8
FLDm		3.2

Figura 13. FLD puntuale e medio negli uffici esposti a sud dell'edificio F51 calcolati con il software DIALux



corridoio	
punto	FLD
1	1.16
2	2.48
3	3.66
4	0.02
FLDm	1.0

Figura 14. FLD puntuale e medio nel corridoio dell'edificio F51 calcolati con il software DIALux



Definito il *FLD*, sono stati scelti i livelli di illuminamento mantenuto  $\bar{E}_m$  da inserire nella formula (14). La norma UNI EN 15193 permette di calcolare il LENI per 3 livelli differenti: 300 lux, 500 lux e 750 lux. Si è scelto di utilizzare tutti e tre questi valori in quanto in un ufficio, stando alle prescrizioni della UNI EN 12464-1, è possibile vengano svolte mansioni che richiedono questi livelli: 300 lux per zone di archiviazione e copiatura; 500 lux per zone di scrittura, elaborazione dati e postazioni CAD; 750 lux per zone in cui si realizzano disegni tecnici. Per gli ambiente WC la UNI EN 12464-1 indica un livello di illuminamento mantenuto di 200 lux, per il corridoio di 100 lux. I risultati di  $E_e$  ottenuti con la formula (14) sono elencati nella (Tabella 1).

	$\bar{E}_m$ (lux)	ufficio nord		ufficio sud			$\bar{E}_m$ (lux)	WC			$\bar{E}_m$ (lux)	corridoio	
		$E_e$ (klux)	$E_e$ (klux)	$E_e$ (klux)	$E_e$ (klux)			$E_e$ (klux)	$E_e$ (klux)			$E_e$ (klux)	
FLD 1	300		3.7		3.7	FLD 1	200		8.5	100			8.6
	500		6.1		6.2			FLD 2				4	
	750		9.2		9.4	FLD 3		2.7					
FLD 2	300		9.5		10.0	FLD 4		500.0					
	500		15.9		16.7	FLDm		9.9					
	750		23.8		25.1								
FLD 3	300		18.2		21.0								
	500		30.3		35.0								
	750		45.5		52.4								
FLD 4	300		20.7		38.5								
	500		34.5		64.1								
	750		51.7		96.2								
FLDm	300		6.3		9.3								
	500		10.5		15.5								
	750		15.8		23.2								

Tabella 1. Valori di  $E_e$  per i diversi ambienti, al variare di  $\bar{E}_m$  e di *FLD* (puntuale e medio)

S@tel-Light		Site : Milano, Italy											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
8-9	2.9	6.6	11.4	11.2	16.6	17.3	16.4	13.3	9.4	5.4	5.7	2.8	9.9
9-10	7.8	11.7	15.8	16.5	22.0	22.7	21.3	19.0	15.2	10.9	9.9	7.3	15.0
10-11	10.7	15.4	18.7	20.2	25.7	26.4	24.4	22.6	19.5	14.8	12.0	10.2	18.4
11-12	12.7	17.3	20.4	22.6	29.8	28.9	27.2	24.8	21.2	16.8	13.3	11.8	20.6
12-13	13.2	17.6	20.9	24.4	31.8	30.4	28.4	26.2	22.8	18.7	13.6	12.4	21.7
13-14	13.0	17.3	19.8	25.1	31.9	29.9	28.4	26.6	22.8	19.2	12.8	11.7	21.6
14-15	11.3	15.8	18.2	23.7	31.5	30.0	27.1	25.5	22.3	18.0	10.6	9.7	20.3
15-16	7.9	12.3	15.8	21.8	28.6	28.2	25.5	23.8	20.2	15.4	7.2	5.9	17.7
16-17	3.5	7.9	12.1	19.1	24.2	24.5	23.6	20.8	16.9	11.7	2.3	1.2	14.0

Tabella 2. Milano - Livelli di illuminamento diffuso esterni

S@tel-Light		Site : Roma, Italy											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
8-9	5.9	8.8	13.2	13.0	16.1	16.9	15.4	14.5	11.3	8.0	8.7	6.0	11.5
9-10	10.6	13.1	17.8	18.8	21.0	20.9	19.1	19.5	16.2	13.9	12.9	10.2	16.2
10-11	13.7	16.0	20.7	22.8	24.3	22.7	21.9	22.6	20.0	18.6	15.7	13.0	19.4
11-12	15.3	17.4	22.2	25.7	26.7	24.0	22.8	25.1	23.0	21.4	17.5	14.9	21.4
12-13	15.3	18.2	23.9	27.7	28.8	25.0	23.1	26.9	24.7	23.1	18.2	14.9	22.5
13-14	14.7	17.6	23.6	28.5	27.6	24.9	23.9	27.1	24.7	22.6	16.0	13.5	22.1
14-15	12.5	16.0	21.2	27.7	26.2	25.3	22.8	26.2	24.8	21.0	12.7	10.9	20.6
15-16	8.9	12.7	17.6	24.9	23.4	24.2	22.0	24.2	22.7	17.9	8.1	6.8	17.8
16-17	3.7	8.0	12.5	20.2	20.6	22.1	20.0	21.0	18.5	12.6	2.4	1.5	13.6

Tabella 3. Roma - Livelli di illuminamento diffuso esterni

Sono stati acquisiti i dati di illuminamento in esterno dal database di satel-light.com ( $E_{Sat}$ ) per tutte e tre le località considerate (Tabella 2), (Tabella 3), (Tabella 4), nella stessa fascia oraria indicata nella UNI EN 15193 (dalle 8 alle 17). Il database è molto ricco di informazioni ma si è scelto di considerare i valori di illuminamento orizzontale dovuti alla sola componente di luce naturale diffusa. Questa scelta è stata fatta sia perché i valori di  $FLD$  sono storicamente calcolati considerando condizione di cielo coperto secondo il modello CIE (*standard overcast sky*), sia perché la componente diretta della luce naturale è soggetta a grande variabilità ed allo stesso tempo, le condizioni più gravose per una verifica dell'illuminazione naturale sono quelle in cui non si ha illuminazione diretta dal sole.

<b>S@tel-Light</b>		<b>Site : Palermo, Italy</b>											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
<b>8-9</b>	7.7	10.4	15.1	14.4	17.5	18.0	16.4	14.3	12.8	9.4	10.8	7.9	12.9
<b>9-10</b>	13.0	15.6	20.1	20.9	23.1	22.1	20.2	18.3	19.1	15.1	15.9	12.7	18.0
<b>10-11</b>	16.3	19.2	23.9	25.2	26.5	25.2	22.6	20.1	24.1	19.4	18.5	15.5	21.4
<b>11-12</b>	18.6	21.4	25.8	27.8	28.1	26.3	23.6	21.3	26.6	21.8	19.7	17.2	23.2
<b>12-13</b>	19.1	21.8	25.6	29.4	28.4	27.3	23.8	22.5	28.0	23.0	19.7	17.3	23.8
<b>13-14</b>	18.2	21.4	24.5	29.4	27.9	26.3	25.0	22.9	28.6	23.3	17.9	15.6	23.4
<b>14-15</b>	15.1	18.7	22.1	27.5	27.4	26.2	24.6	22.8	26.5	20.6	14.2	12.5	21.5
<b>15-16</b>	10.6	14.0	17.9	24.6	26.1	25.5	23.4	21.8	23.5	17.3	9.2	7.8	18.5
<b>16-17</b>	4.5	8.6	12.6	20.5	22.5	22.7	21.1	19.5	18.8	12.7	3.0	2.1	14.1

Tabella 4. Palermo - Livelli di illuminamento diffuso esterni

Il confronto tra  $E_{Sat}$  ed  $E_e$  permette di verificare quante ore al giorno mediamente in ogni mese l'impianto di illuminazione dovrà essere acceso per garantire i livelli di illuminamento mantenuto prescritti. Moltiplicando questo valore per la media dei giorni lavorativi di ogni mese e sommando i risultati, si ottiene il valore di  $t_{sat}$  annuale da inserire nella formula (11) (Tabella 5), (Tabella 6), (Tabella 7).

ora	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
8-9	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
9-10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15-16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
16-17	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ore/giorno	4	2	0	0	0	0	0	0	1	1	4	6
ore/mese	88	40	0	0	0	0	0	0	21	23	80	120
<b><math>t_{sat}</math> (ore totali)</b>											<b>372</b>	

Tabella 5.  $t_{sat}$  per un livello di illuminamento interno di 500 lux ed un  $FLD_m$  di 4.7 – ufficio a nord nell'edificio F51 a Milano (in giallo le ore di accensione dell'impianto di illuminazione)

ora	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
8-9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
16-17	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ore/giorno	3	2	0	0	0	0	0	0	0	1	3	4
ore/mese	66	40	0	0	0	0	0	0	0	23	60	80

$t_{sat}$  (ore totali) 269

Tabella 6.  $t_{sat}$  per un livello di illuminamento interno di 500 lux ed un  $FLD_m$  di 4.7 – ufficio a nord nell'edificio F51 a Roma (in giallo le ore di accensione dell'impianto di illuminazione)

E' possibile infine calcolare  $W_L$  con la formula (11) per inserirlo nella formula (3) ed ottenere i valori del LENI alle diverse latitudini, per diversi valori di illuminamento mantenuto  $\bar{E}_m$ , in ambienti con diversi fattori di luce diurna  $FLD$ .

ora	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
8-9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
9-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
16-17	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ore/giorno	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
ore/mese	44	40	0	0	0	0	0	0	0	23	40	60

$t_{sat}$  (ore totali) 207

Tabella 7.  $t_{sat}$  per un livello di illuminamento interno di 500 lux ed un  $FLD_m$  di 4.7 – ufficio a nord nell'edificio F51 a Palermo (in giallo le ore di accensione dell'impianto di illuminazione)

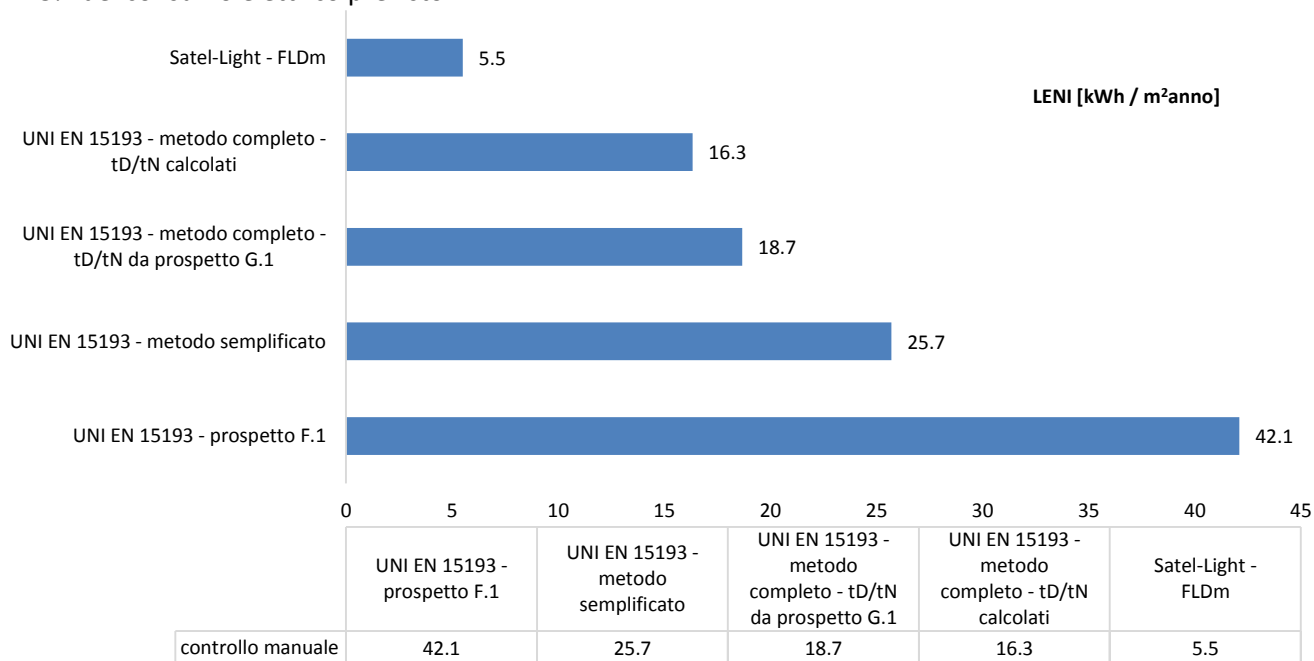
## 7 Risultati

La prima verifica che è stata fatta riguarda il calcolo del *LENI* con quattro diversi metodi in un'unica località (Roma) e per un livello di illuminamento mantenuto di 500 lux (Figura 15). Il grafico a barre presenta la grande variabilità dei valori del *LENI*, calcolato utilizzando le varie metodologie previste dalla norma e con il metodo alternativo proposto.

Nel Prospetto F.1 della UNI EN 15193 sono riportati i valori predefiniti di riferimento del *LENI* per diverse tipologie di edifici: per il nostro caso viene indicato un valore di  $42.1 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (ufficio con classe di qualità “\*”, senza controllo dell’illuminamento costante e con comandi manuali). Si tratta di valori standard tabellati e pre-calcolati che non derivano dai metodi di calcolo della norma. Anche questo valore è stato inserito nel grafico per una comparazione più completa.

È interessante confrontare i dati ottenuti con il metodo dettagliato ed orari di funzionamento standard, con i due approcci semplificati. Il metodo semplificato registra un valore del *LENI* di  $7 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  in più rispetto al metodo dettagliato con un incremento di circa il 39%; tale incremento sale a oltre il 100% se si considera il dato da tabella pre-calcolato, con un aumento del *LENI* di oltre  $23 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ . Da notare che il valore del *LENI* calcolato con il metodo semplificato non prende in considerazione la geometria degli ambienti (a parte la loro superficie di calpestio) e la posizione geografica dell’edificio (non è previsto nelle tabelle da cui si estrapola il valore di  $F_D$ ), inoltre l’incidenza dell’illuminazione naturale è considerata in modo molto approssimativo.

È interessante anche notare la differenza tra il *LENI* conseguibile utilizzando le ore di disponibilità di luce naturale secondo il Prospetto G1 nella norma, ed il *LENI* ottenuto inserendo valori di  $t_N$  e di  $t_D$  calcolati su base nazionale: il primo metodo fornisce valori superiori di  $2.4 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  rispetto al secondo, ossia circa il 15% del consumo elettrico previsto.



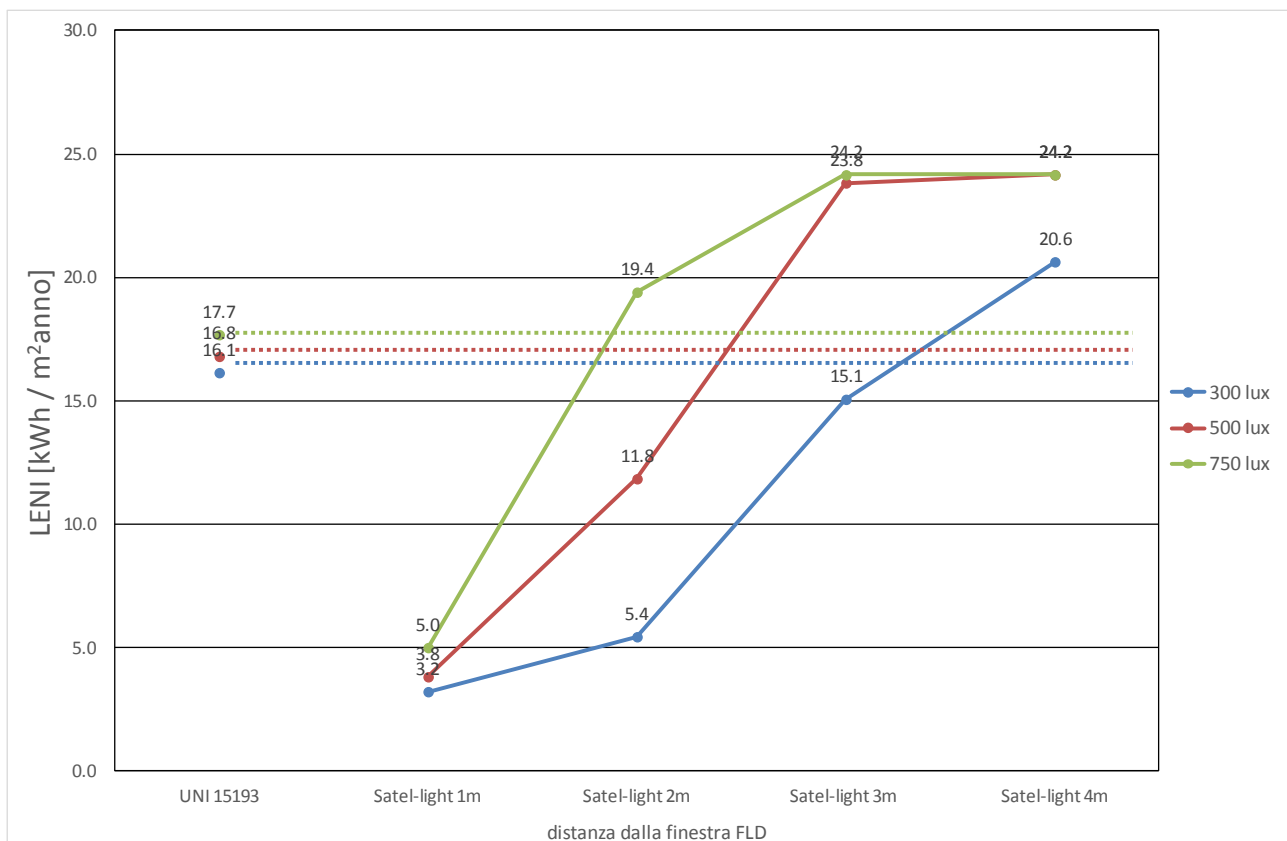
**Figura 15. Confronto tra il metodo proposto e quelli descritti nella norma - LENI dell’edificio F51 alla latitudine di Roma, calcolato per un livello di illuminamento mantenuto di 500 lux.**

Confrontando infine i dati ottenuti utilizzando il metodo alternativo con quelli ottenuti utilizzando il metodo completo previsto dalla norma con gli orari di utilizzo calcolati, vediamo come il primo fornisca un valore del *LENI* pari a circa un terzo del secondo, con previsione di consumi notevolmente minori per il caso in esame. Se da un lato i risultati evidenziano dei limiti di calcolo intrinseci alla norma soprattutto per quanto attiene la valutazione corretta della disponibilità di luce naturale, dall’altro è necessario ricordare che il metodo alternativo, nonostante l’inserimento di molti più parametri rispetto al metodo semplificato, mantiene diverse approssimazioni. I valori di penetrazione della luce naturale, ad esempio, sono calcolati solamente

per 3 livelli interni di illuminamento mantenuto: 300 lux, 500 lux e 750 lux, con sovrastima dei consumi nelle zone di passaggio e di servizio. Ad esempi nel caso studiato, sono presenti locali come il corridoio o gli ambienti WC per cui la norma UNI EN 12464-1 indica livelli di illuminamento mantenuto rispettivamente di 100 lux e 200 lux. Calcolando il *LENI* per un valore di illuminamento mantenuto di 300 lux, negli ambienti sopra indicati avremo degli scostamenti dai dati reali.

Di seguito si presentano risultati confrontando gli ultimi metodi applicati a tutti i casi presi in esame (diverse latitudini e diversi livelli di illuminamento mantenuto interni).

Nelle tre località considerate, i valori del *LENI* calcolati a seconda della distanza del punto di misura del *FLD* dalla finestra (Figura 16), (Figura 17), (Figura 18), hanno un andamento pressoché analogo: per livelli di illuminamento mantenuto di 300 lux, ad una distanza di 1, 2 e 3 metri, il *LENI* calcolato con i dati satellitari risulta inferiore a quello calcolato con il metodo completo da norma con una differenza che oscilla tra  $13.5 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (1 metro dalla finestra a Palermo) ed  $1 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (3 metri dalla finestra a Milano). Ad una distanza di 4 metri dalla finestra, il valore del *LENI* calcolato con i dati satellitari è invece superiore a quello della norma in tutte e tre le località raggiungendo anche un incremento di  $4.5 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  a Milano.



**Figura 16. Calcolo del *LENI* per l'edificio F51 situato idealmente a Milano**

Con un illuminamento mantenuto di 500 lux, i valori del *LENI* con il metodo di calcolo alternativo sono maggiori di quelli col metodo di calcolo completo da norma già a 3 metri in tutte le località prese in esame. Considerando un  $\bar{E}_m$  di 750 lux, i valori del *LENI* con il metodo di calcolo alternativo sono maggiori già a 2 metri nelle tre città considerate.

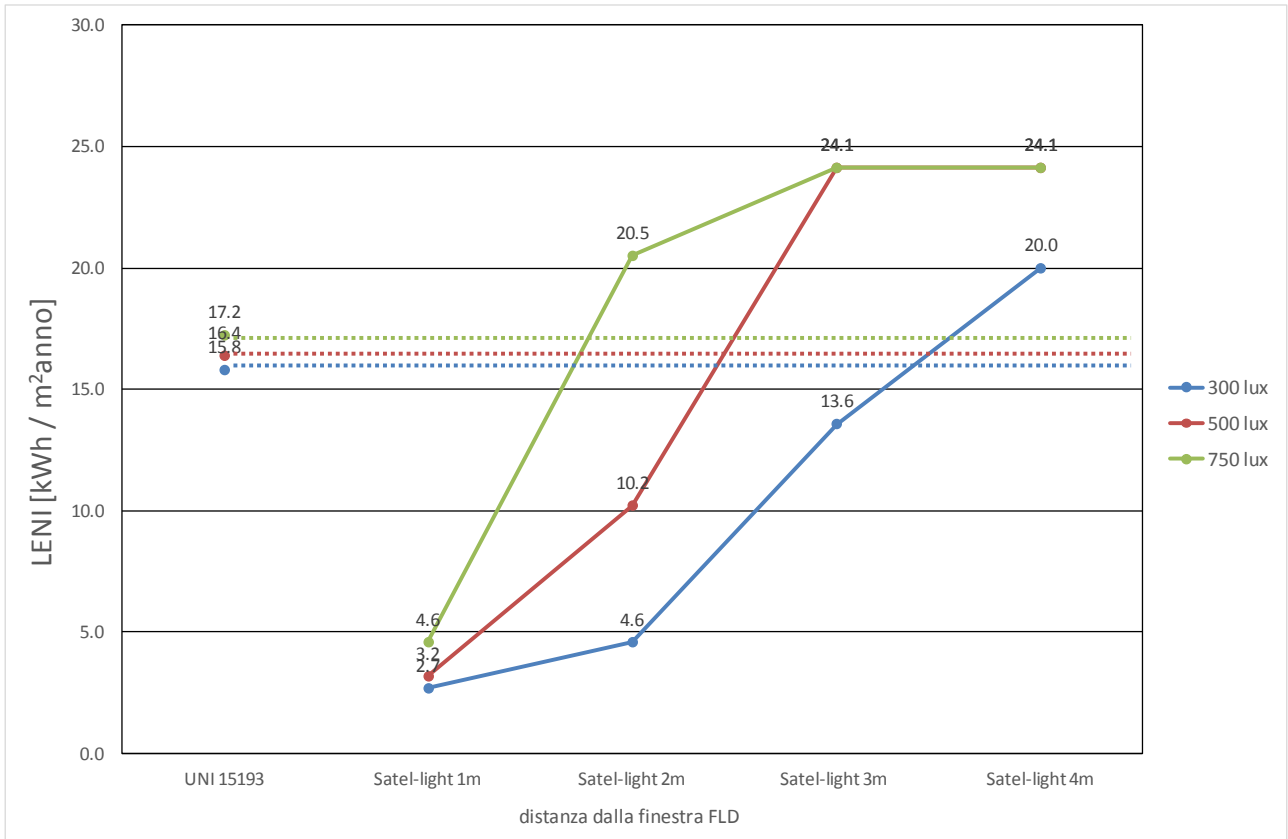


Figura 17. Calcolo del LENI per l'edificio F51 situato idealmente a Roma

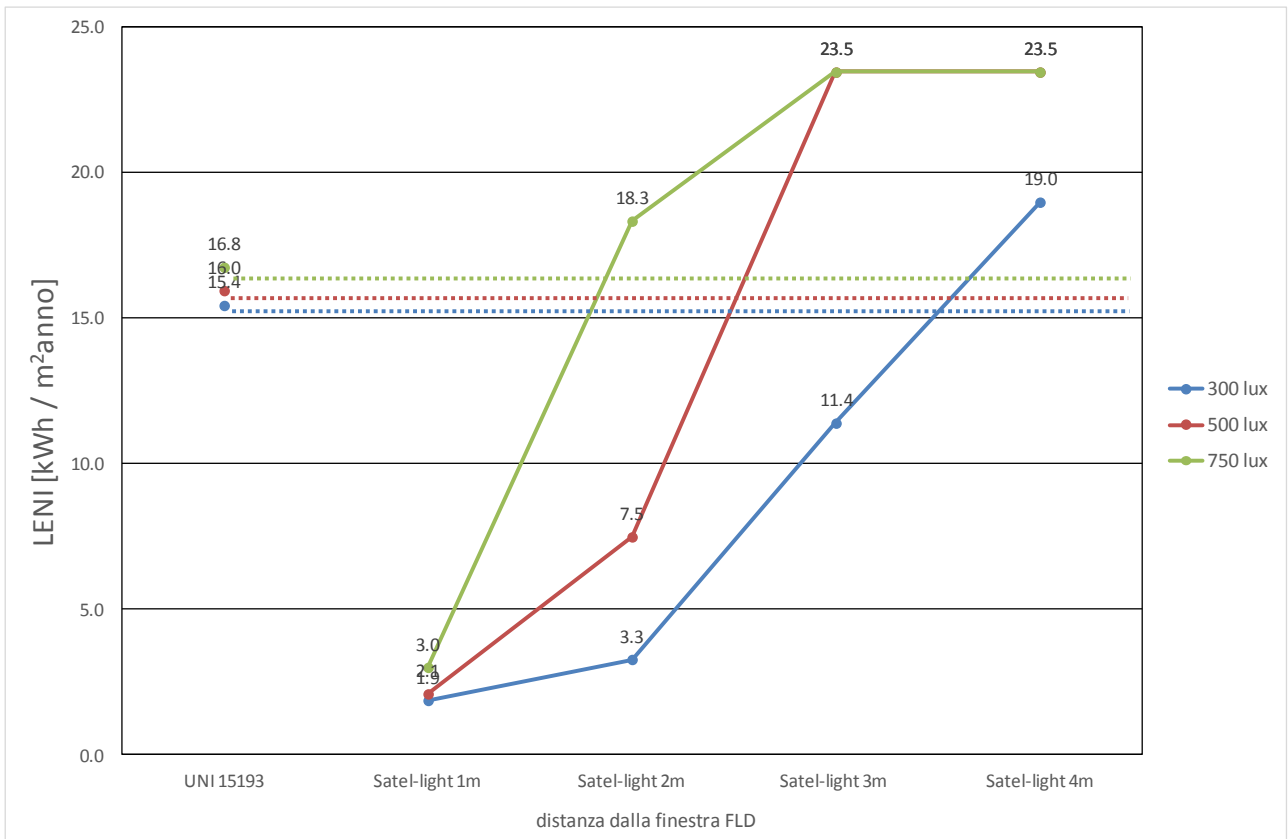
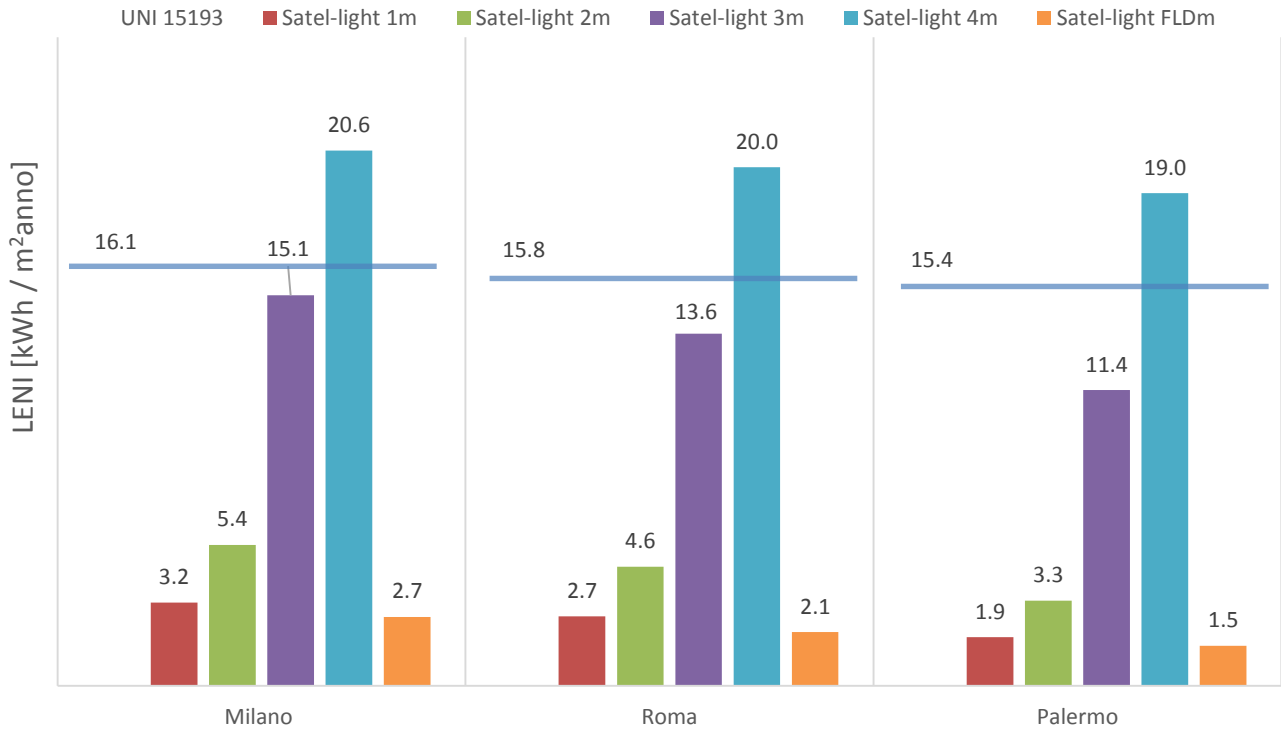
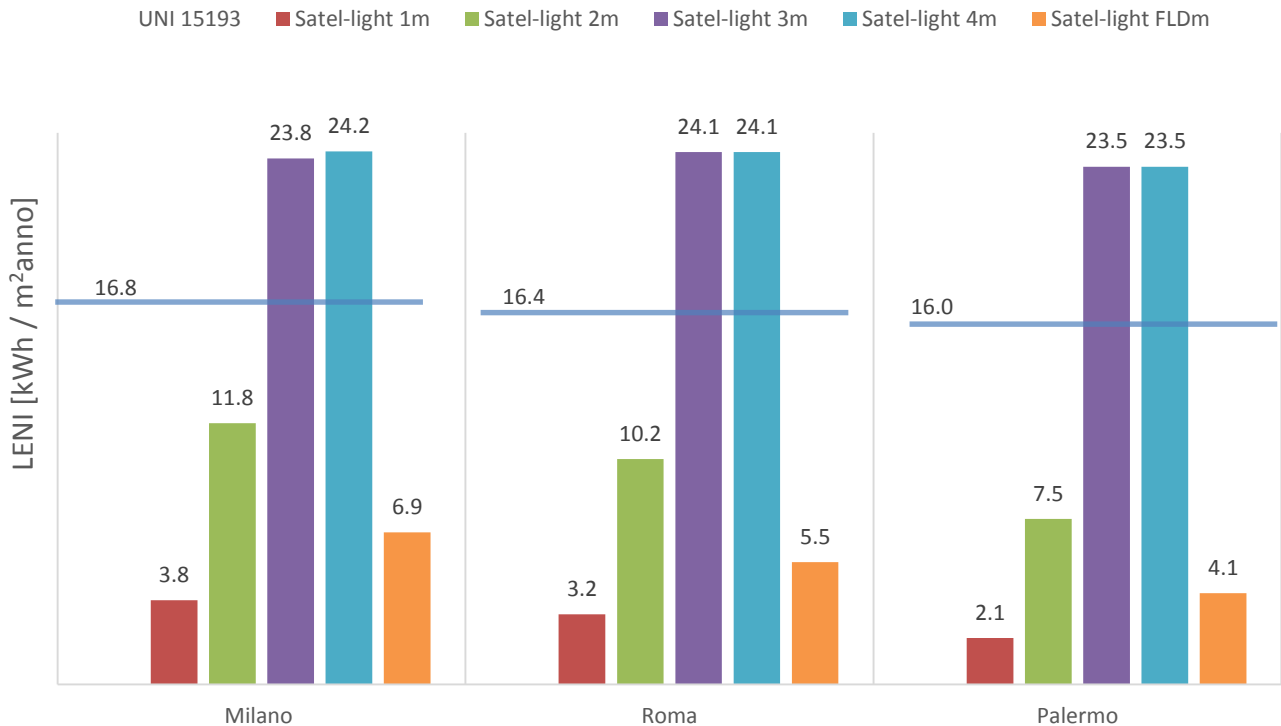


Figura 18. Calcolo del LENI per l'edificio F51 situato idealmente a Palermo

La precedente analisi ha evidenziato la necessità di individuare con attenzione la zona in cui effettuare la misurazione del *FLD*. Per questo motivo si è scelto di inserire nel calcolo col metodo alternativo anche il fattore di luce diurna medio *FLDm*.



**Figura 19. Valore del LENI per l'edificio F51 per livelli di illuminamento mantenuto di 300 lux - confronto dei risultati con i diversi metodi**



**Figura 20. Calcolo del LENI per l'edificio F51 per livelli di illuminamento mantenuto di 500 lux - confronto dei risultati con i diversi metodi**

Confrontando i risultati per le tre diverse località (Figura 19), (Figura 20), (Figura 21), si può verificare che le differenze del valore del *LENI* quando il metodo di calcolo è quello completo da norma, vanno da  $0.3 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (tra Milano e Roma con livelli di illuminamento mantenuto di 300 lux) a  $0.9 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (tra Milano e Palermo con livelli di illuminamento mantenuto di 750 lux). Quando però utilizziamo il metodo di calcolo basato sui dati satellitari, le differenze diventano maggiori: considerando i valori ottenuti scegliendo il fattore di luce diurna medio *FLDm*, abbiamo uno scostamento minimo di  $0.5 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (tra Milano e Roma con livelli di illuminamento mantenuto di 750 lux) ed uno massimo di  $2.8 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (tra Milano e Palermo con livelli di illuminamento di 500 lux). La differenza raggiunge i  $4.3 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$  (tra Milano e Palermo con livelli di illuminamento di 500 lux) quando il *FLD* è calcolato a 2 metri di distanza dalla finestra.

Questo confronto attesta non solo quanto il nuovo metodo proposto per il calcolo del *LENI* sia più accurato rispetto a quello della norma, ma dimostra, grazie all'utilizzo di dati rilevati dai satelliti, di tener conto delle differenti condizioni di luce naturale legate non solo alla latitudine ma ai diversi contesti geografici caratterizzati da svariati fattori ambientali.

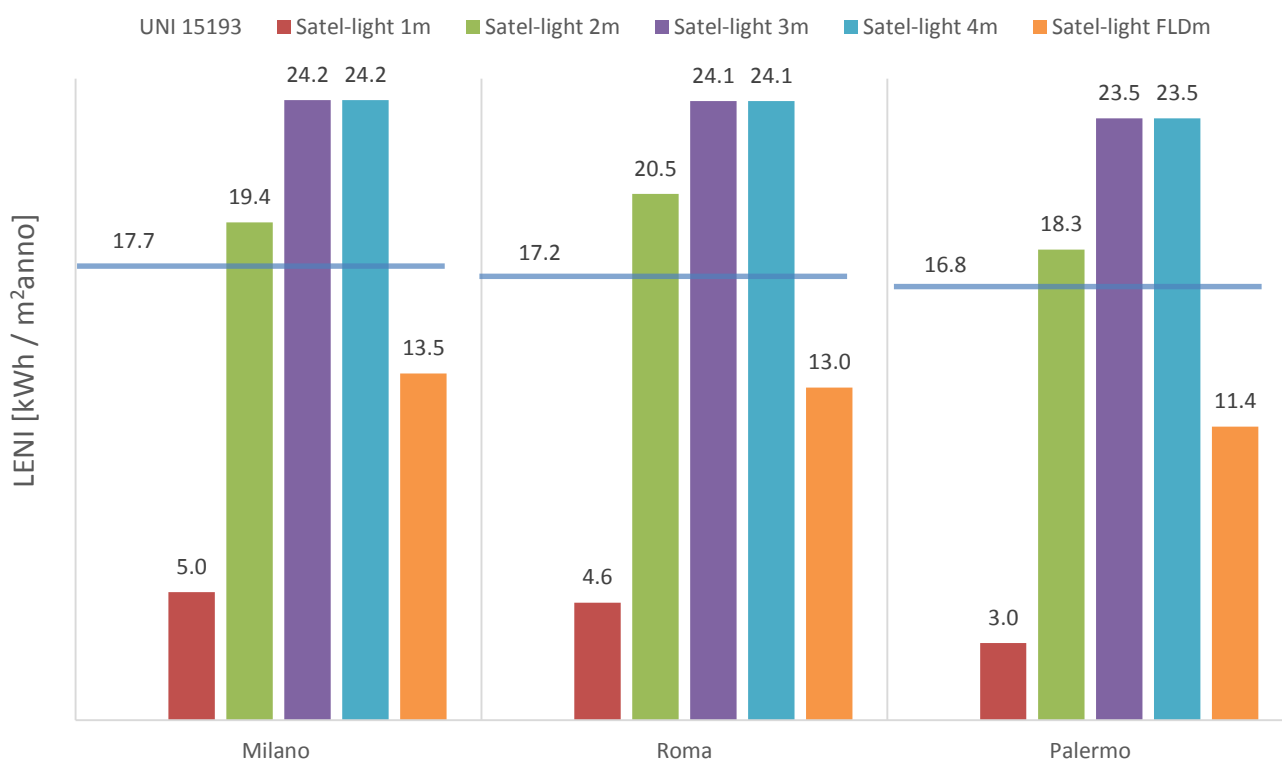


Figura 21. Calcolo del *LENI* per l'edificio F51 per livelli di illuminamento mantenuto di 750 lux - confronto dei risultati con i diversi metodi

## 8 Conclusioni

Le differenze riscontrate tra i valori del *LENI* ricavati con i diversi metodi di calcolo rispecchiano i risultati emersi nei precedenti studi che segnalavano una sovrastima del fabbisogno energetico per l'illuminazione degli edifici. Si noti che la sovrastima del fabbisogno è legata inevitabilmente alla sovrastima dei risparmi conseguibili in azioni di retrofit energetico. Questo aspetto è particolarmente critico laddove le misure energetiche siano focalizzate sul recupero dell'esistente, piuttosto che sulle nuove costruzioni, con conseguenze negative sulle potenzialità di risparmio di energia primaria e sui ricavi economici indotti dall'adozione di tali misure.



Il nuovo metodo proposto intende stimare il fabbisogno per l'illuminazione artificiale per gli edifici, valutando con maggiore accuratezza il contributo dell'illuminazione naturale al fabbisogno complessivo, già a partire dai dati climatici che concorrono alla definizione del clima luminoso locale. Appare tuttavia necessario dotarsi di banche dati che raccolgano misure storiche di illuminamento (possibilmente nelle componenti diretta e diffusa) alla stregua di quanto accade per la radiazione solare.

In una seconda fase sarà necessario approfondire le potenzialità dei metodi di controllo automatico sul fabbisogno degli edifici per l'ottimizzazione e dell'integrazione della luce naturale con quella artificiale, nonché la capacità della norma di riferimento nel tenere conto del contributo di tali sistemi. Dati forniti dalla Daintree Networks Inc. (Tabella 8) indicano come applicando tecnologie di *building automation* è possibile ottenere risparmi in termini di costi energetici fino al 70%.

<b>Common Lighting Controls Strategies</b>	
<b>Dimming:</b> Enable fixtures to dim, for use in other strategies below	Variable
<b>Occupancy Sensing:</b> Adjust lights based on occupancy detection	Up to 40%
<b>Scheduling:</b> Dim and turn off lights according to a pre-set schedule	Up to 40%
<b>Advanced Lighting Controls Strategies</b>	
<b>Daylight Harvesting:</b> Adjust electric light levels to take natural light into account, using photosensors	Up to 20%
<b>Task Tuning:</b> Reduce maximum light levels based on requirements for each space	Up to 20%
<b>Demand Response:</b> Reduce light levels at peak times based on automated signals from electric utilities	Variable
<b>Personal Control:</b> Enable individuals to set light levels to suit personal preferences	Up to 10%
<b>Energy Management:</b> Software for ongoing improvement in controls settings and strategies	Variable
<b>Combined Lighting Energy Cost Savings</b>	<b>Up to 70% of Lighting Energy Costs</b>

<b>Additional Lighting-Related Strategies</b>	
<b>Automated Maintenance:</b> Monitor lamp & ballast life to reduce ongoing maintenance costs	Up to 10% of total lighting costs
<b>BMS Integration:</b> Integrate lighting with a BMS for simplified building management	Variable
<b>Additional Strategies Beyond Lighting</b>	
<b>Plug Load Control:</b> Manage and schedule additional plugged-in devices through the controls network	Up to 20% of plug load energy costs
<b>Environmental Monitoring:</b> Measure and manage environmental data through the controls network	Variable
<b>Wireless Thermostats:</b> Control wireless thermostat usage through the controls network	Variable
<b>Other Independent Controls:</b> Add & control other uncontrolled load through the controls network	Variable

**Tabella 8. Fonte White Paper: Taking Control: 14 Energy-Saving Control Strategies for Commercial Lighting and Beyond - Daintree Networks, Inc.**

Adottare sistemi di automazione all'interno degli edifici permette di interagire in maniera mirata con la luce naturale: nonostante i livelli di illuminamento esterni utilizzati nel metodo alternativo siano misurati, essi

fanno comunque riferimento ad un dato orario medio mensile. L'illuminamento è un dato istantaneo e la variabilità delle condizioni atmosferiche rende un valore medio comunque aleatorio. La presenza di un fotosensore collegato all'impianto di illuminazione permetterebbe, ad esempio, la lettura del dato istantaneo di incidenza della luce naturale per poter adattare in tempo reale le condizioni di illuminazione artificiale.

Il nuovo metodo proposto è stato testato provando a spostare di un'ora in avanti l'orario di ingresso nell'ufficio (9.00-18.00), constatando come in alcuni casi i valori del LENI aumentassero.

Questo dimostra come l'utilizzo degli edifici da parte degli utenti finali meriti un opportuno approfondimento svolto dai progettisti per l'elaborazione di adeguate strategie che favoriscano un uso più consapevole degli spazi della vita quotidiana.

## 9 Bibliografia

- [1] IATAURO D., SIGNORETTI P., TERRINONI L., ZINZI M. *Artificial lighting energy consumption in buildings: a comparison between EN 15193 and an alternative method based on the Dresler diagrams*. Centro La Casaccia ENEA Roma, 2008.
- [2] GUGLIERMETTI F., LAUDANI F., BISEGNA F. *Definizione di criteri di diagnosi per una correzione delle stime di consumi energetici dovuti all'illuminazione*, Roma: Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/2013, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, 2013.
- [3] BELLIA L., CANTALUPO F., FRAGLIASSO F., PEDACE A., Atti del convegno "Il risparmio energetico nell'illuminazione degli interni" all'EnergyMed, Napoli, 2014.
- [4] REA M. S. *The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application, 9<sup>th</sup> edition*. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- [5] BIANCHI F., CARRATÙ R. *Manualetto di Fisica Tecnica applicate all'Architettura – L'illuminazione diurna e metodi di calcolo*. Roma, Aracne, 2003.
- [6] UNI EN 15193:2008. *Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione*. Marzo 2008.
- [7] UNI EN 12464-1:2011. *Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni*. Luglio 2011.
- [8] EC 97-2005. *Guida alla manutenzione dei sistemi di illuminazione per interni*. 2005.
- [9] *Manuale DIALux 4.12*. DIAL GmbH, 2011.

## 10 Sitografia

[10] [www.giorni-lavorativi.com](http://www.giorni-lavorativi.com)

[11] [www.satel-light.com](http://www.satel-light.com)

[12] [www.sunearthtools.com/it/solar/sunrise-sunset-calendar.php](http://www.sunearthtools.com/it/solar/sunrise-sunset-calendar.php)

# 11 Appendice A

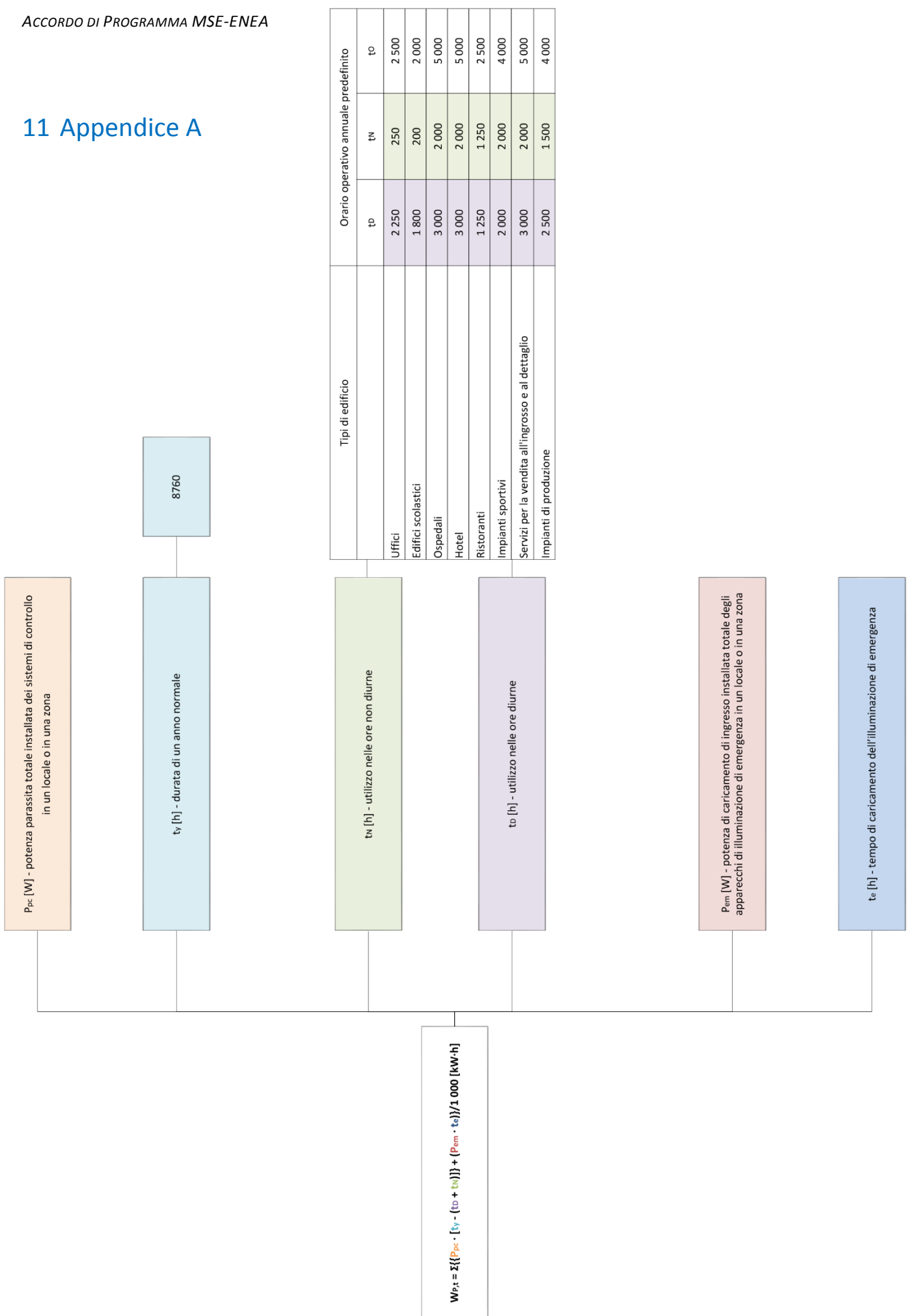


Figura 1. ( $W_{p,t}$ ) Consumo di energia parassita per gli apparecchi di illuminazione [kWh]

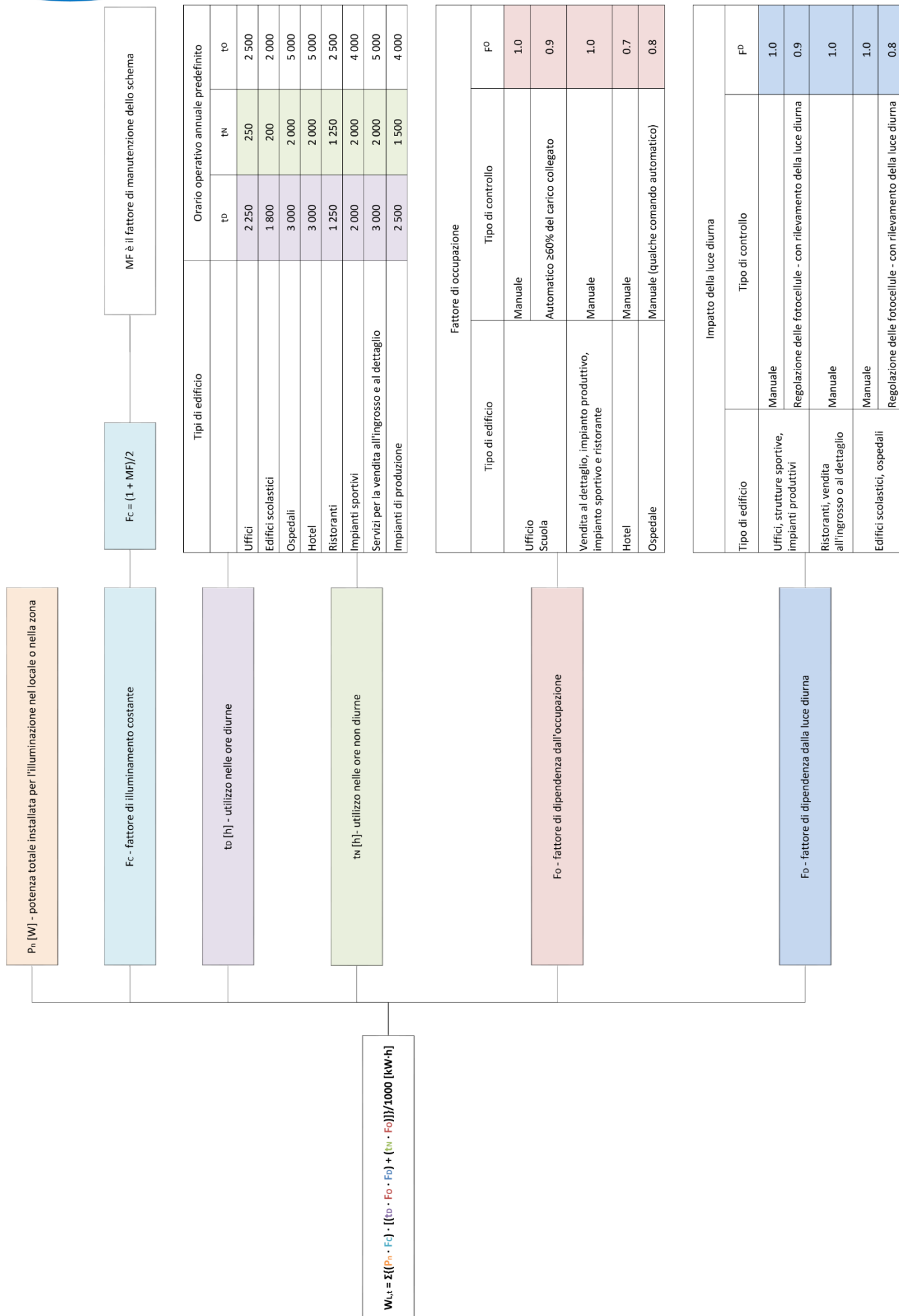
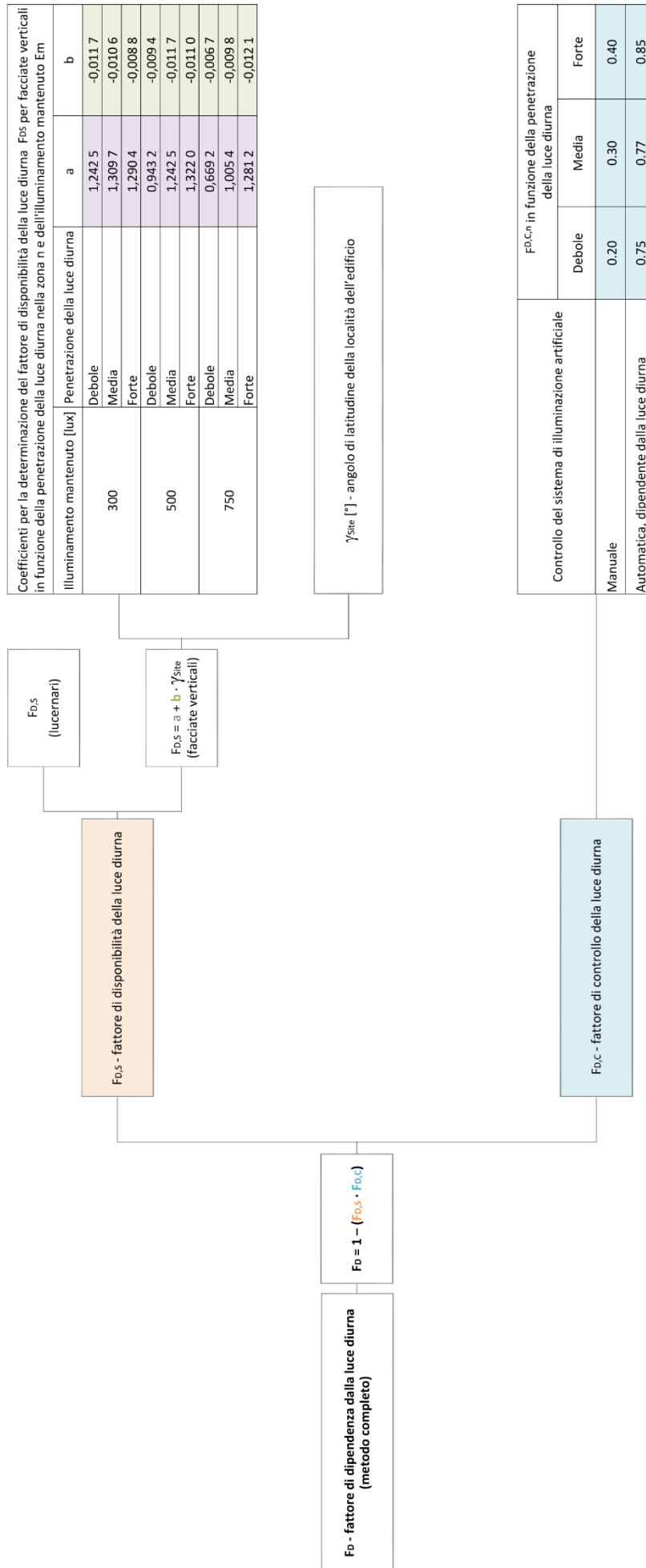


Figura 2. ( $W_{L,t}$ ) Consumo energetico utilizzato per l'illuminazione [kWh]



**Figura 3. (F<sub>D</sub>) Fattore di dipendenza dalla luce diurna, metodo completo - fattore di disponibilità della luce diurna (F<sub>D,S</sub>) per facciate verticali**

Classificazione della disponibilità della luce diurna		Fattore di disponibilità della luce diurna a Francoforte (latitudine 50°)											
		Illuminamento mantenuto (lux)											
		Em = 300			Em = 500			Em = 750					
Orientamento	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	
Orizzontale	Angoli di inclinazione (°)												
	0	0,88	0,95	0,97	0,78	0,89	0,94	0,66	0,82	0,94	0,66	0,82	0,9
	30	0,85	0,94	0,96	0,73	0,87	0,93	0,62	0,79	0,88	0,62	0,79	0,88
Sud	45	0,81	0,91	0,95	0,68	0,83	0,91	0,57	0,74	0,84	0,57	0,74	0,84
	60	0,75	0,88	0,93	0,61	0,77	0,86	0,51	0,67	0,78	0,51	0,67	0,78
	90	0,56	0,72	0,83	0,44	0,59	0,7	0,35	0,49	0,6	0,35	0,49	0,6
Est/Ovest	30	0,84	0,93	0,96	0,71	0,86	0,93	0,58	0,77	0,87	0,58	0,77	0,87
	45	0,78	0,91	0,95	0,63	0,81	0,9	0,5	0,7	0,82	0,5	0,7	0,82
	60	0,7	0,87	0,93	0,53	0,74	0,85	0,41	0,6	0,75	0,41	0,6	0,75
Nord	90	0,46	0,67	0,81	0,33	0,5	0,65	0,24	0,38	0,51	0,24	0,38	0,51
	30	0,82	0,93	0,95	0,69	0,85	0,92	0,55	0,75	0,86	0,55	0,75	0,86
	45	0,76	0,9	0,95	0,59	0,8	0,89	0,45	0,67	0,81	0,45	0,67	0,81
60	0,66	0,85	0,92	0,45	0,71	0,83	0,31	0,54	0,72	0,31	0,54	0,72	
90	0,38	0,63	0,78	0,23	0,41	0,6	0,15	0,28	0,42	0,15	0,28	0,42	

Classificazione della disponibilità della luce diurna		Fattore di disponibilità della luce diurna a Londra (latitudine 51°)											
		Illuminamento mantenuto (lux)											
		Em = 300			Em = 500			Em = 750					
Orientamento	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	
Orizzontale	Angoli di inclinazione (°)												
	0	0,85	0,91	0,94	0,76	0,86	0,91	0,66	0,80	0,91	0,66	0,80	0,86
	30	0,84	0,91	0,93	0,75	0,85	0,90	0,66	0,79	0,86	0,66	0,79	0,86
Sud	45	0,83	0,90	0,93	0,73	0,84	0,89	0,64	0,77	0,84	0,64	0,77	0,84
	60	0,80	0,88	0,92	0,70	0,82	0,88	0,61	0,74	0,82	0,61	0,74	0,82
	90	0,74	0,84	0,89	0,62	0,76	0,83	0,52	0,67	0,76	0,52	0,67	0,76
Est/Ovest	30	0,83	0,90	0,93	0,72	0,84	0,90	0,62	0,77	0,85	0,62	0,77	0,85
	45	0,80	0,89	0,93	0,68	0,82	0,88	0,57	0,73	0,83	0,57	0,73	0,83
	60	0,77	0,88	0,92	0,63	0,79	0,87	0,51	0,69	0,80	0,51	0,69	0,80
Nord	90	0,68	0,83	0,89	0,52	0,71	0,81	0,40	0,59	0,72	0,40	0,59	0,72
	30	0,81	0,90	0,93	0,70	0,83	0,89	0,59	0,75	0,84	0,59	0,75	0,84
	45	0,78	0,89	0,93	0,65	0,80	0,88	0,52	0,70	0,81	0,52	0,70	0,81
60	0,74	0,87	0,92	0,57	0,77	0,86	0,43	0,64	0,78	0,43	0,64	0,78	
90	0,64	0,81	0,88	0,45	0,67	0,80	0,31	0,52	0,68	0,31	0,52	0,68	

Classificazione della disponibilità della luce diurna		Fattore di disponibilità della luce diurna a Stoccolma (latitudine 59,65°)											
		Illuminamento mantenuto (lux)											
		Em = 300			Em = 500			Em = 750					
Orientamento	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	
Orizzontale	Angoli di inclinazione (°)												
	0	0,75	0,82	0,86	0,66	0,76	0,81	0,56	0,69	0,76	0,56	0,69	0,76
	30	0,75	0,82	0,86	0,67	0,76	0,81	0,58	0,70	0,77	0,58	0,70	0,77
Sud	45	0,74	0,81	0,85	0,65	0,75	0,80	0,56	0,69	0,75	0,56	0,69	0,75
	60	0,72	0,80	0,84	0,63	0,73	0,79	0,54	0,67	0,74	0,54	0,67	0,74
	90	0,66	0,76	0,81	0,56	0,68	0,75	0,47	0,60	0,69	0,47	0,60	0,69
Est/Ovest	30	0,72	0,81	0,85	0,62	0,74	0,80	0,51	0,66	0,74	0,51	0,66	0,74
	45	0,70	0,80	0,84	0,58	0,71	0,79	0,47	0,63	0,72	0,47	0,63	0,72
	60	0,66	0,78	0,83	0,53	0,68	0,77	0,42	0,58	0,69	0,42	0,58	0,69
Nord	90	0,58	0,72	0,79	0,43	0,60	0,71	0,32	0,49	0,61	0,32	0,49	0,61
	30	0,71	0,80	0,85	0,60	0,72	0,79	0,49	0,64	0,73	0,49	0,64	0,73
	45	0,67	0,78	0,84	0,54	0,69	0,77	0,40	0,59	0,70	0,40	0,59	0,70
60	0,63	0,76	0,82	0,45	0,66	0,75	0,32	0,53	0,66	0,32	0,53	0,66	
90	0,53	0,70	0,78	0,34	0,56	0,68	0,23	0,41	0,57	0,23	0,41	0,57	

Classificazione della disponibilità della luce diurna		Fattore di disponibilità della luce diurna ad Atene (latitudine 38°)											
		Illuminamento mantenuto (lux)											
		Em = 300			Em = 500			Em = 750					
Orientamento	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	
Orizzontale	Angoli di inclinazione (°)												
	0	0,97	0,99	1,00	0,93	0,97	0,99	0,86	0,94	0,97	0,86	0,94	0,97
	30	0,96	0,98	0,99	0,91	0,97	0,98	0,84	0,93	0,97	0,84	0,93	0,97
Sud	45	0,94	0,98	0,99	0,88	0,96	0,98	0,80	0,93	0,96	0,80	0,93	0,96
	60	0,92	0,98	0,98	0,83	0,95	0,97	0,75	0,91	0,94	0,75	0,91	0,94
	90	0,81	0,96	0,97	0,68	0,92	0,93	0,85	0,85	0,86	0,85	0,86	
Est/Ovest	30	0,94	0,98	0,99	0,88	0,95	0,98	0,79	0,91	0,96	0,79	0,91	0,96
	45	0,90	0,98	0,99	0,80	0,94	0,97	0,69	0,87	0,93	0,69	0,87	0,93
	60	0,84	0,97	0,98	0,70	0,91	0,95	0,59	0,82	0,88	0,59	0,82	0,88
Nord	90	0,66	0,94	0,95	0,49	0,85	0,87	0,39	0,72	0,73	0,39	0,72	0,73
	30	0,93	0,98	0,99	0,84	0,94	0,97	0,74	0,89	0,94	0,74	0,89	0,94
	45	0,87	0,97	0,99	0,75	0,92	0,96	0,62	0,84	0,90	0,62	0,84	0,90
60	0,78	0,96	0,98	0,61	0,88	0,92	0,45	0,77	0,83	0,45	0,77	0,83	
90	0,50	0,92	0,93	0,27	0,79	0,81	0,18	0,60	0,62	0,18	0,60	0,62	

Classificazione della disponibilità della luce diurna		Fattore di disponibilità della luce diurna a Lione (latitudine 46°)											
		Illuminamento mantenuto (lux)											
		Em = 300			Em = 500			Em = 750					
Orientamento	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	
Orizzontale	Angoli di inclinazione (°)												
	0	0,90	0,95	0,96	0,82	0,91	0,94	0,73	0,86	0,91	0,73	0,86	0,91
	30	0,89	0,94	0,96	0,81	0,90	0,94	0,72	0,85	0,90	0,72	0,85	0,90
Sud	45	0,88	0,94	0,96	0,79	0,89	0,93	0,70	0,83	0,89	0,70	0,83	0,89
	60	0,86	0,93	0,95	0,76	0,87	0,92	0,66	0,80	0,88	0,66	0,80	0,88
	90	0,80	0,89	0,93	0,68	0,82	0,89	0,57	0,73	0,82	0,57	0,73	0,82
Est/Ovest	30	0,89	0,94	0,96	0,80	0,90	0,94	0,69	0,84	0,90	0,69	0,84	0,90
	45	0,87	0,93	0,96	0,76	0,88	0,93	0,64	0,80	0,89	0,64	0,80	0,89
	60	0,84	0,92	0,95	0,70	0,85	0,92	0,57	0,76	0,86	0,57	0,76	0,86
Nord	90	0,76	0,89	0,93	0,59	0,78	0,88	0,45	0,66	0,79	0,45	0,66	0,79
	30	0,88	0,94	0,96	0,78	0,89	0,94	0,66	0,82	0,90	0,66	0,82	0,90
	45	0,85	0,93	0,96	0,72	0,87	0,93	0,58	0,78	0,88	0,58	0,78	0,88
60	0,81	0,92	0,95	0,65	0,84	0,91	0,49	0,72	0,84	0,49	0,72	0,84	
90	0,71	0,88	0,93	0,49	0,75	0,86	0,33	0,58	0,76	0,33	0,58	0,76	

Classificazione della disponibilità della luce diurna		Fattore di disponibilità della luce diurna a Bratislava (latitudine 48°)											
		Illuminamento mantenuto (lux)											
		Em = 300			Em = 500			Em = 750					
Orientamento	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	Debole	Media	Forte	
Orizzontale	Angoli di inclinazione (°)												
	0	0,87	0,92	0,94	0,79	0,88	0,92	0,70	0,82	0,88	0,70	0,82	0,88
	30	0,86	0,92	0,94	0,78	0,87	0,91	0,70	0,81	0,88	0,70	0,81	0,88
Sud	45	0,85	0,91	0,94	0,76	0,86	0,91	0,67	0,80	0,86	0,67	0,80	0,86
	60	0,83	0,90	0,93	0,74	0,84	0,89	0,64	0,77	0,84	0,64	0,77	0,84
	90	0,77	0,86	0,91	0,66	0,78	0,85	0,56	0,70	0,79	0,56	0,70	0,79
Est/Ovest	30	0,85	0,92	0,94	0,75	0,86	0,91	0,65	0,79	0,87	0,65	0,79	0,87
	45	0,82	0,91	0,94	0,71	0,84	0,90	0,59	0,76	0,85	0,59	0,76	0,85
	60	0,79	0,89	0,93	0,66	0,81	0,89	0,54	0,71	0,82	0,54	0,71	0,82
Nord	90	0,71	0,85	0,90	0,55	0,73	0,83	0,42	0,61	0,74	0,42	0,61	0,74
	30	0,84	0,92	0,94	0,73	0,85	0,91	0,61	0,77	0,86	0,61	0,77	0,86
	45	0,81	0,91	0,94	0,67	0,83	0						

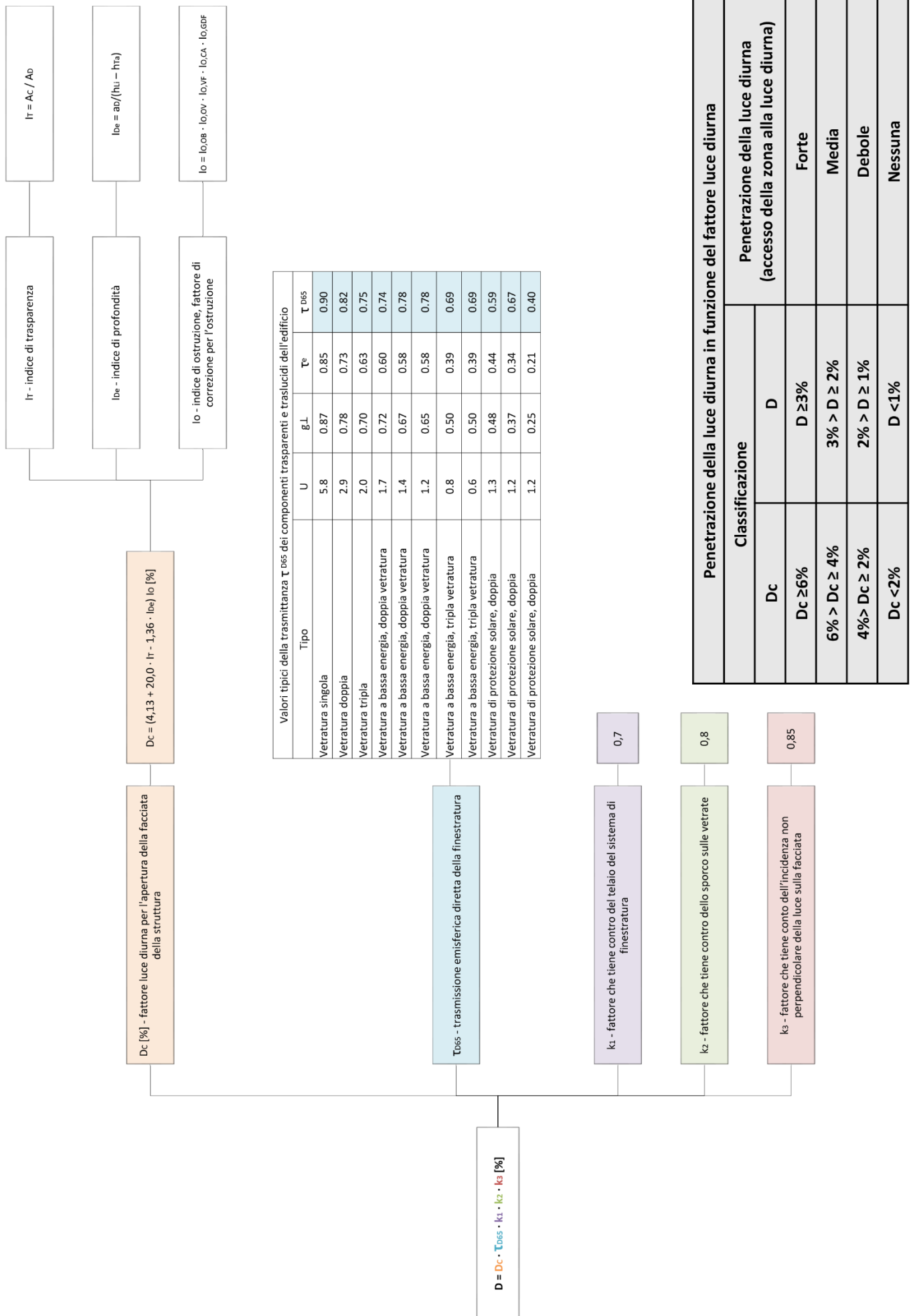
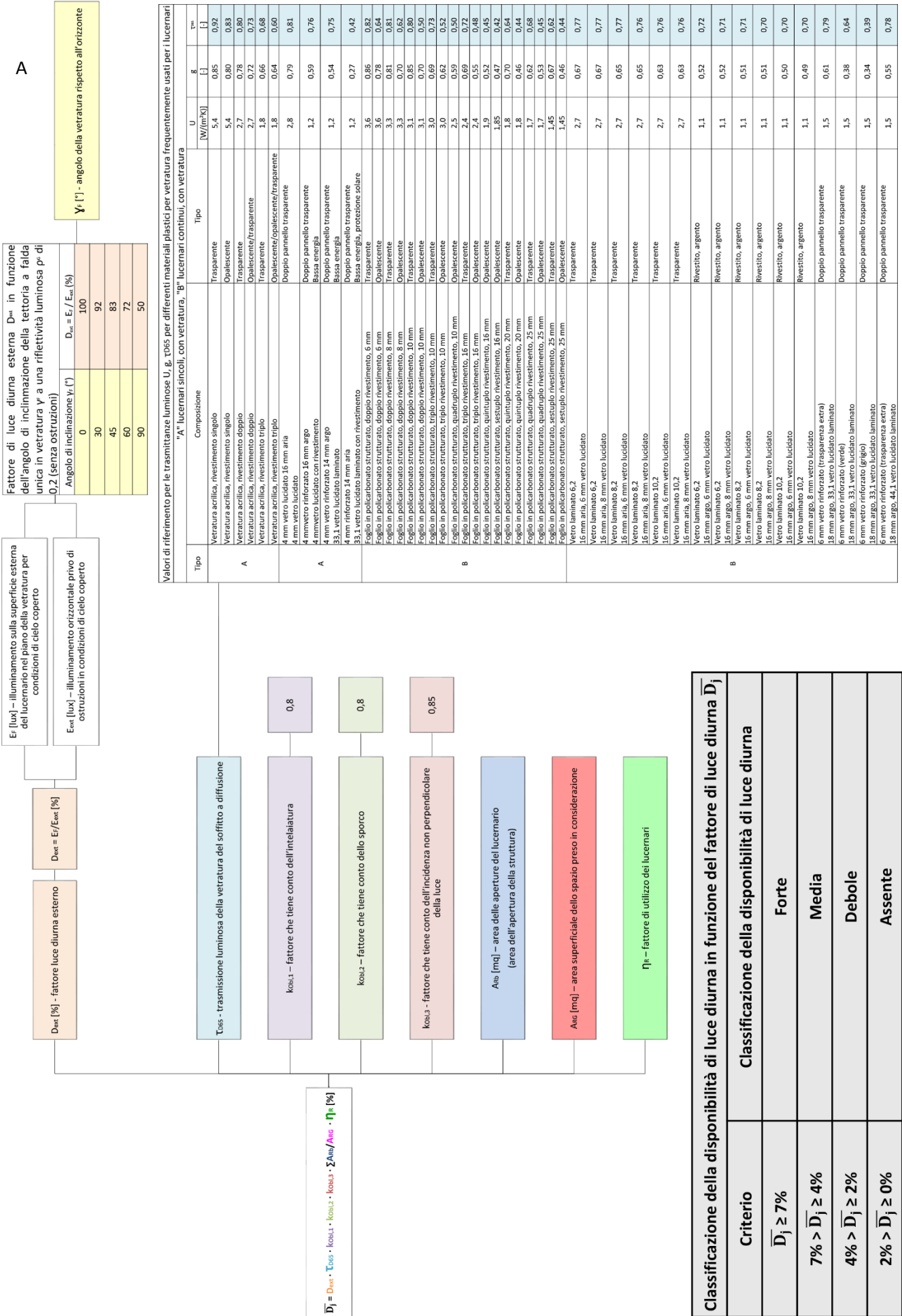


Figura 5. (D) Fattore di luce diurna per la zona – facciate verticali [%]

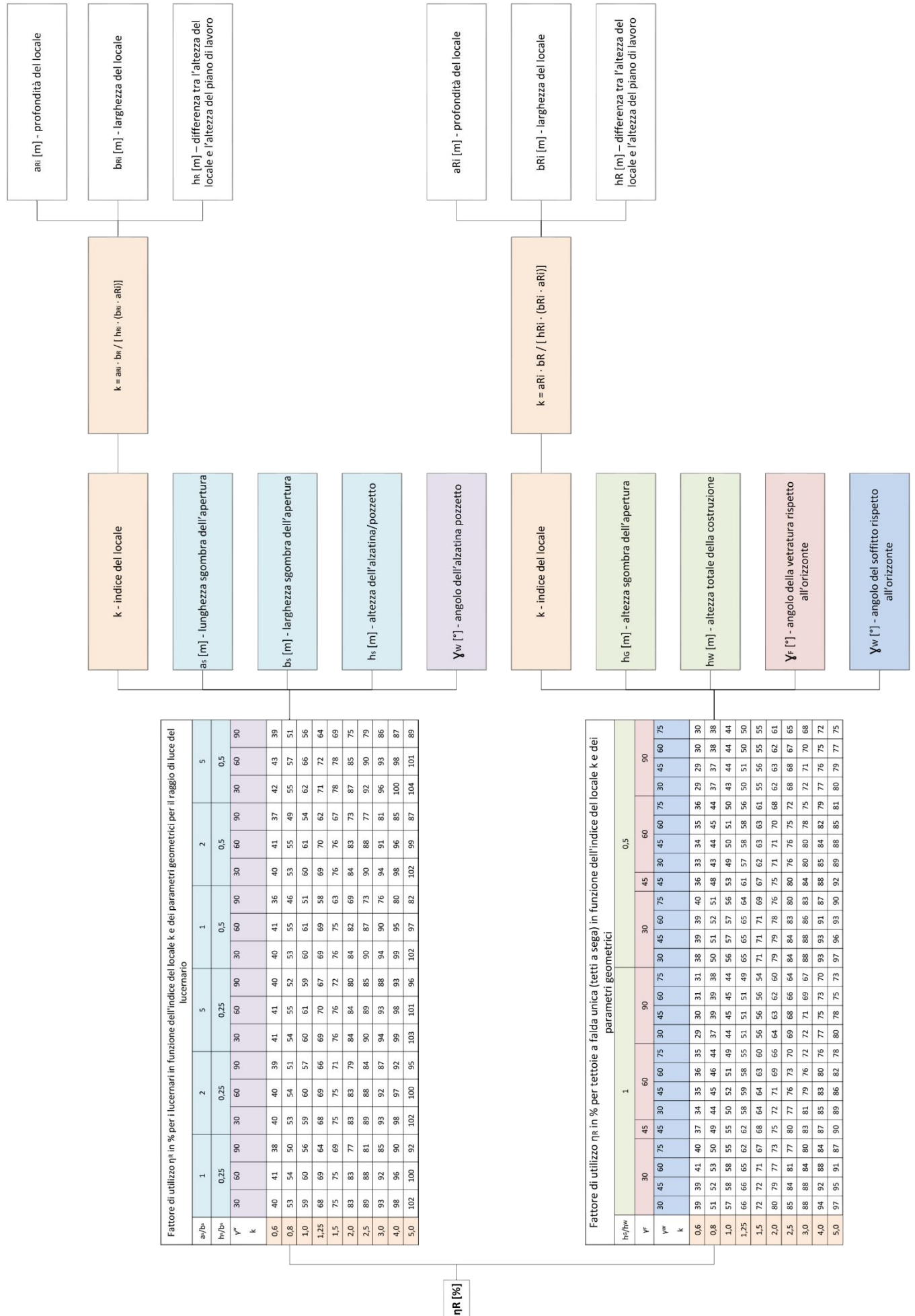




Valori di riferimento per le trasmittanze luminose  $U_g$ ,  $\tau_{b05}$  per differenti materiali plastici per vetratura frequentemente usati per i lucernari "A", lucernari singoli, con vetratura, "B", lucernari continui, con vetratura

Tipo	Composizione	Tipo	U [W/(m²K)]	$\tau_{b05}$ [-]
A	Vetratura acrilica, rivestimento singolo	Trasparente	5,4	0,85
	Vetratura acrilica, rivestimento singolo	Opalescente	5,4	0,80
	Vetratura acrilica, rivestimento doppio	Trasparente	2,7	0,78
	Vetratura acrilica, rivestimento doppio	Opalescente/trasparente	2,7	0,72
	Vetratura acrilica, rivestimento triplo	Trasparente	1,8	0,66
	Vetratura acrilica, rivestimento triplo	Opalescente/opalescente/trasparente	1,8	0,64
	4 mm vetro lucidato	Doppio pannello trasparente	2,8	0,79
	4 mm vetro rinforzato 16 mm argo	Doppio pannello trasparente	1,2	0,59
	4 mm vetro rinforzato 14 mm argo	Doppio pannello trasparente	1,2	0,54
	33,1 vetro lucidato laminato	Bassa energia	1,2	0,75
B	4 mm rinforzato 14 mm aria	Doppio pannello trasparente	1,2	0,27
	33,1 vetro lucidato laminato con rivestimento	Bassa energia, protezione solare	3,6	0,86
	Foglio in policarbonato strutturato, doppio rivestimento, 6 mm	Trasparente	3,6	0,78
	Foglio in policarbonato strutturato, doppio rivestimento, 8 mm	Opalescente	3,3	0,81
	Foglio in policarbonato strutturato, doppio rivestimento, 8 mm	Trasparente	3,3	0,70
	Foglio in policarbonato strutturato, doppio rivestimento, 10 mm	Opalescente	3,1	0,85
	Foglio in policarbonato strutturato, doppio rivestimento, 10 mm	Trasparente	3,1	0,70
	Foglio in policarbonato strutturato, triplo rivestimento, 10 mm	Opalescente	3,0	0,89
	Foglio in policarbonato strutturato, triplo rivestimento, 10 mm	Opalescente	3,0	0,62
	Foglio in policarbonato strutturato, quadruplo rivestimento, 10 mm	Trasparente	2,4	0,59
	Foglio in policarbonato strutturato, triplo rivestimento, 16 mm	Opalescente	2,4	0,69
	Foglio in policarbonato strutturato, triplo rivestimento, 16 mm	Opalescente	1,9	0,52
	Foglio in policarbonato strutturato, quinquoplo rivestimento, 16 mm	Opalescente	1,85	0,47
	Foglio in policarbonato strutturato, quinquoplo rivestimento, 20 mm	Trasparente	1,8	0,70
	Foglio in policarbonato strutturato, quinquoplo rivestimento, 20 mm	Opalescente	1,7	0,62
	Foglio in policarbonato strutturato, quadruplo rivestimento, 25 mm	Trasparente	1,7	0,53
	Foglio in policarbonato strutturato, quadruplo rivestimento, 25 mm	Opalescente	1,45	0,67
	Foglio in policarbonato strutturato, sestuplo rivestimento, 25 mm	Opalescente	1,45	0,46
	Vetro laminato 6,2	Trasparente	2,7	0,67
	16 mm aria, 6 mm vetro lucidato	Trasparente	2,7	0,67
16 mm aria, 8 mm vetro lucidato	Trasparente	2,7	0,65	
Vetro laminato 8,2	Trasparente	2,7	0,65	
Vetro laminato 8,2	Trasparente	2,7	0,63	
Vetro laminato 10,2	Trasparente	2,7	0,63	
Vetro laminato 10,2	Trasparente	2,7	0,63	
Vetro laminato 10,2	Trasparente	2,7	0,63	
Vetro laminato 6,2	Rivestito, argento	1,1	0,52	
16 mm argo, 5 mm vetro lucidato	Rivestito, argento	1,1	0,52	
Vetro laminato 6,2	Rivestito, argento	1,1	0,51	
16 mm argo, 5 mm vetro lucidato	Rivestito, argento	1,1	0,51	
Vetro laminato 6,2	Rivestito, argento	1,1	0,51	
16 mm argo, 5 mm vetro lucidato	Rivestito, argento	1,1	0,51	
Vetro laminato 10,2	Rivestito, argento	1,1	0,50	
16 mm argo, 5 mm vetro lucidato	Rivestito, argento	1,1	0,50	
Vetro laminato 10,2	Rivestito, argento	1,1	0,49	
16 mm argo, 8 mm vetro lucidato	Rivestito, argento	1,1	0,49	
6 mm vetro rinforzato (trasparenza extra)	Doppio pannello trasparente	1,5	0,61	
18 mm argo, 33,1 vetro lucidato laminato	Doppio pannello trasparente	1,5	0,38	
18 mm argo, 33,1 vetro lucidato laminato	Doppio pannello trasparente	1,5	0,38	
6 mm vetro rinforzato (grigio)	Doppio pannello trasparente	1,5	0,34	
18 mm argo, 33,1 vetro lucidato laminato	Doppio pannello trasparente	1,5	0,34	
6 mm vetro rinforzato (trasparenza extra)	Doppio pannello trasparente	1,5	0,55	
18 mm argo, 44,1 vetro lucidato laminato	Doppio pannello trasparente	1,5	0,78	

Figura 6. ( $\bar{D}_j$ ) Classificazione della disponibilità di luce diurna in funzione del fattore della luce diurna - lucernari



Fattore di utilizzo  $\eta_R$  in % per i lucernari in funzione dell'indice del locale  $k$  e dei parametri geometrici per il raggio di luce del lucernario

$a/b$	1				2				5				1				2				5								
	0,25	30	60	90	30	60	90	30	60	90	0,25	30	60	90	0,25	30	60	90	0,5	60	90	30	60	90	0,5	60	90	30	60
$\chi_w$	0,6	40	41	38	40	40	39	41	41	40	40	41	41	40	41	36	40	41	37	42	43	39							
$k$	0,8	53	54	50	53	54	51	54	55	52	53	55	46	53	55	49	55	49	55	57	51	51							
	1,0	59	60	56	59	60	57	60	61	59	60	61	51	60	61	54	62	66	56	66	56	64							
	1,25	68	69	64	68	69	66	69	70	67	69	69	58	69	70	62	71	72	64	78	69	69							
	1,5	75	75	69	75	71	76	76	75	76	75	63	76	76	76	67	78	78	78	87	75	75							
	2,0	83	83	77	83	83	79	84	84	80	84	82	69	84	83	73	87	85	75	99	79	79							
	2,5	89	88	81	89	88	84	90	89	85	90	87	73	90	88	77	92	90	90	100	87	87							
	3,0	93	92	85	93	92	87	94	93	88	94	90	76	94	91	81	96	93	93	100	98	87							
	4,0	98	96	90	98	97	92	99	98	93	99	95	80	98	96	85	100	98	87	100	100	87							
	5,0	102	100	92	102	100	95	103	101	96	102	97	82	102	99	87	104	101	89	100	101	89							

Fattore di utilizzo  $\eta_R$  in % per tetti a falda unica (tetti a sega) in funzione dell'indice del locale  $k$  e dei parametri geometrici

$h_o/h_w$	1				1				0,5																			
	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75																
$\chi_w$	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75																
$\chi_f$	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75																
$k$	0,6	39	39	41	40	37	34	35	36	35	29	30	31	31	38	39	39	40	36	33	34	35	36	29	29	30	30	
	0,8	51	52	53	50	49	44	45	46	44	37	39	38	50	51	52	51	48	43	44	45	44	45	44	37	37	38	38
	1,0	57	58	58	55	50	52	51	49	44	45	44	45	45	44	45	44	45	43	43	44	44	44	44	44	44	44	44
	1,25	66	66	65	62	58	59	58	55	51	51	49	65	65	64	61	57	58	56	50	51	50	50	50	50	50	50	50
	1,5	72	72	71	67	68	64	64	63	60	56	56	54	71	71	69	67	62	63	61	55	56	55	55	55	55	55	55
	2,0	80	79	77	73	75	72	71	69	66	64	63	62	60	79	79	78	76	75	71	71	70	68	62	63	62	61	61
	2,5	85	84	81	77	80	77	76	73	70	69	68	66	64	84	84	83	80	80	76	76	75	72	68	68	67	65	65
	3,0	88	88	84	80	83	81	79	76	72	72	71	69	67	88	88	86	83	84	80	80	78	75	72	71	70	68	68
	4,0	94	92	88	84	87	85	83	80	76	77	75	73	70	93	93	91	87	88	85	84	82	79	77	76	75	72	72
	5,0	97	95	91	87	90	89	86	82	78	80	78	75	73	97	96	93	90	92	89	88	85	81	80	79	77	75	75

Figura 7. ( $\eta_R$ ) Fattore di utilizzo dei lucernari [%]