Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione degli edifici: confronto tra il software LENICALC v.2 e software di simulazione dinamica climate-based

A. Pellegrino, V. R. M. Lo Verso, A. Paragamyan, C. Aghemo

POLITECNICO
DI TORINO

Report RdS/PAR2017/056

CALCOLO DEL FABBISOGNO ENERGETICO PER L'ILLUMINAZIONE DEGLI EDIFICI: CONFRONTO TRA IL SOFTWARE LENICALC V.2 E SOFTWARE DI SIMULAZIONE DINAMICA CLIMATE-BASED

A. Pellegrino, V. R. M. Lo Verso, A. Paragamyan, C. Aghemo (Politecnico di Torino, Dipartimento Energia)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2017
Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici
Progetto: D.6 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano
Obiettivo: c. Controllo e valutazione delle infrastrutture pubbliche energivore
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione degli edifici: confronto tra il software LENICALC v.2 e software di simulazione dinamica climate-based"*
Responsabile scientifico ENEA: Laura Blaso.
Responsabile scientifico del Politecnico di Torino: prof.ssa Anna Pellegrino

Indice

SOMMARIO 4

1 INTRODUZIONE 5

2 STRUMENTI PER IL CALCOLO DEL FABBISOGNO ENERGETICO PER L'ILLUMINAZIONE NEGLI EDIFICI 5

2.1 LENICALC V2.0 6
2.2 DIVA FOR RHINO 7

3 METODOLOGIA PER IL CONFRONTO TRA I SOFTWARE E LA DETERMINAZIONE DEI VALORI DI FABBISOGNO ENERGETICO DI RIFERIMENTO 8

3.1 CARATTERISTICHE E VARIABILI PER L'AMBIENTE UFFICIO 9
3.2 CARATTERISTICHE E VARIABILI PER L'EDIFICIO SCOLASTICO 11

4 RISULTATI RELATIVI AL CONFRONTO TRA I SOFTWARE 16

4.1 RISULTATI RELATIVI ALLA STIMA DELLA DISPONIBILITÀ DI LUCE NATURALE 18
4.1.1 LENICALC v2.0 18
4.1.2 DIVA-for-Rhino 23
4.1.3 Confronto LENICALC v2.0 ó DIVA-for-Rhino 27
4.2 RISULTATI RELATIVI ALLA STIMA DEL FABBISOGNO ENERGETICO PER L'ILLUMINAZIONE 34
4.2.1 LENICALC v2.0 34
4.2.2 DIVA-for Rhino 37
4.2.3 Confronto LENICALC v2.0 ó DIVA-for-Rhino 39

5 RISULTATI RELATIVI ALLA DETERMINAZIONE DI VALORI DI FABBISOGNO ENERGETICO DI RIFERIMENTO (VALORI BENCHMARK) 44

6 CONCLUSIONI 49

7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 51

Sommario

Il presente lavoro ha due obiettivi: il primo è quello di confrontare i risultati relativi alla stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione degli edifici ottenuti attraverso due software di calcolo, LENICALC V2.0 e DIVA-for-Rhino; il secondo è quello di individuare dei valori di riferimento per i consumi dell'illuminazione negli edifici scolastici attraverso LENICALC 2.0.
Per entrambe le fasi, lo studio è stato condotto a partire da un'analisi parametrica su singoli ambienti e su interi edifici pubblici. Tra le tipologie di edifici pubblici sono stati considerati gli edifici scolastici. Le caratteristiche dell'edificio utilizzato per le analisi sono state definite in modo che potesse essere rappresentativo di una scuola superiore "tipo" italiana.
Lo studio, nella sua prima parte, descrive i diversi approcci dei due strumenti di calcolo. LENICALC riproduce il metodo di calcolo semplificato definito dalla normativa tecnica UNI EN 15193-1:2017; DIVA-for-Rhino, plug-in del software di modellazione 3D RHINO, consente di effettuare simulazioni dinamiche di luce naturale a partire da dati climatici orari specifici della località oggetto di studio e quindi di calcolare il consumo di energia elettrica per l'illuminazione.
L'analisi è stata inizialmente focalizzata sulla stima dell'illuminazione naturale, propedeutica al calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione, mediante i due diversi approcci di calcolo, e quindi sul calcolo dell'indice di prestazione energetico dell'illuminazione (LENI). Dal confronto dei risultati ottenuti con i due software emergono differenze di segno opposto nel calcolo della luce naturale e del fabbisogno energetico: il software LENICALC v2.0 sottostima la disponibilità di luce naturale negli ambienti rispetto a DIVA-for-Ryno ma, nonostante ciò, i valori di LENI ottenuti con LENICALC risultano inferiori a quelli ottenuti con DIVA.
Nella seconda parte, lo studio ha portato alla proposta di valori benchmark per il consumo di energia elettrica per l'illuminazione negli edifici scolastici italiani (scuole superiori). In questa fase, rispetto alla precedente, sono state variate diverse caratteristiche (posizione geografica, contesto dell'edificio, orientamenti, tipo di impianti di illuminazione e eventuali sistemi di controllo) per ampliare i casi oggetto dell'analisi. A partire dalle diverse configurazioni di variabili sono stati individuati e analizzati i consumi di 48 configurazioni di edifici. Oltre alla definizione di valori di riferimento per i consumi dell'edificio scolastico in tre diversi scenari impiantistici, sono stati analizzati i contributi energetici delle diverse tipologie di locali presenti all'interno dell'edificio.

1 Introduzione

L'attività di ricerca sviluppata nell'ambito del PAR 2017 è consistita nel mettere a confronto le procedure di calcolo e i risultati ottenuti con l'applicazione di due software in grado di stimare il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione degli edifici. Dei due strumenti di calcolo il primo, LENICALC V2.0, riproduce il metodo di calcolo analitico semplificato definito nella normativa tecnica UNI EN 15193-1:2017, mentre il secondo, DIVA-for-Rhino, è un plugin del software di modellazione 3D RHINO, inizialmente sviluppato presso la Graduate School of Design dell'Harward University, in costante implementazione e attualmente distribuito da Solemna LLC. DIVA consente di svolgere simulazioni dinamiche e valutazioni delle prestazioni ambientali di edifici. Per quanto attiene l'ambito illuminotecnico, DIVA consente il calcolo dell'illuminazione naturale a partire da dati climatici orari specifici della località oggetto di progetto ed il calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale in funzione di specifiche logiche di controllo degli impianti.
Il confronto tra i due strumenti di calcolo è stato implementato mediante uno studio parametrico su singoli ambienti e su edifici pubblici di riferimento. In particolare, tra gli edifici pubblici si è scelto come caso studio quello degli edifici scolastici, che, nella realtà italiana, rappresenta una tipologia edilizia con elevate potenzialità di risparmio energetico, non solo per quanto attiene il riscaldamento degli edifici, ma anche in rapporto ai consumi per l'illuminazione. Le scuole esistenti sul territorio nazionale sono infatti in larga misura edifici datati (anteriori al 1980) [1,2] e presentano in molti casi impianti di illuminazione artificiale o sistemi di controllo degli impianti obsoleti.
L'attività descritta nel presente rapporto si inquadra in un programma pluriennale finalizzato allo studio del metodo semplificato per il calcolo del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione degli edifici, proposto dalla recente normativa europea UNI EN 15193-1:2017 [3]. Lo studio, articolato in diverse fasi, ha previsto l'analisi critica del metodo di calcolo semplificato proposto nella normativa tecnica [4], la verifica e validazione del software di calcolo LENICALC messo a punto da ENEA per l'applicazione del metodo di calcolo della normativa [5], e il confronto dei risultati ottenuti mediante questo metodo con quelli ottenibili utilizzando un software di simulazione dinamica (presente report).
Lo studio descritto nel presente rapporto ha la finalità di fornire, a coloro che approcciano il calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione negli edifici, informazioni sulle caratteristiche degli strumenti di calcolo disponibili e sugli scostamenti che si possono avere nella stima della disponibilità di luce naturale o del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione in rapporto allo strumento utilizzato.
Lo studio sugli edifici scolastici mediante il software LENICALC V2.0 è stato inoltre orientato ad individuare dei valori benchmark di riferimento per i consumi dell'illuminazione degli edifici scolastici esistenti, sia in presenza di impianti tradizionali che nel caso di soluzioni che adottano nuove tecnologie (apparecchi a LED e sistemi di controllo automatici).

2 Strumenti per il calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione negli edifici

Il calcolo del fabbisogno energetico annuo per l'illuminazione artificiale presuppone la disponibilità di dati che esprimono varie caratteristiche dell'edificio: le caratteristiche dell'impianto di illuminazione e del sistema di controllo, le condizioni di illuminazione naturale degli ambienti, le caratteristiche di funzionalità dell'edificio (tipologia di edificio, requisito di illuminazione e profilo d'uso).
In particolare, per stimare l'energia richiesta per l'illuminazione di un edificio è necessario definire la potenza elettrica assorbita nel tempo dagli impianti e il tempo effettivo di utilizzo degli stessi. Sia la potenza elettrica che il tempo di utilizzo dipendono a loro volta dalla tipologia di edificio, dal suo profilo d'uso, dalla disponibilità di luce naturale in rapporto al requisito illuminotecnico, dalle caratteristiche e dall'efficienza del sistema di controllo.
Gli strumenti a disposizioni del progettista per determinare la potenza degli impianti e il tempo di utilizzo possono essere diversi. Il progetto degli impianti di illuminazione, svolto con metodi analitici (es. metodo del flusso totale [6]) o con specifici software di calcolo (es. Dialux [7], Relux [8], Litestar [9], etc.), fornisce la

potenza assorbita dagli impianti, sia in condizioni di impianto attivo che in condizioni di stand-by. Viceversa per stimare il tempo effettivo di utilizzo degli impianti è necessario tener conto dei fattori che possono, nell'arco temporale di utilizzo dell'edifico, determinare l'accensione, lo spegnimento o la regolazione del flusso luminoso degli apparecchi di illuminazione. E' necessario cioè computare la disponibilità di luce naturale, in quanto risorsa integrativa o alternativa alla luce artificiale, considerare i profili di occupazione degli ambienti e stimare il comportamento dei sistemi di controllo degli impianti, siano essi manuali o automatici, con regolazione in rapporto all'occupazione o alla presenza di luce naturale. Anche in questo caso gli strumenti a disposizione del progettista possono essere diversi e caratterizzati da differenti livelli di accuratezza: strumenti di calcolo semplificati, come quello definito nella norma UNI EN 15193-1:2017, o software di simulazione dinamica, in grado di determinare la dinamica temporale delle condizioni di illuminazione naturale degli ambienti dell'edificio e di calcolare l'energia per l'illuminazione artificiale in funzione della disponibilità di luce naturale rispetto al requisito, dei diversi profili di occupazione e delle tipologie di sistemi di controllo. Tra questi ultimi rientrano software di simulazione dinamica delle prestazioni degli edifici quali EnergyPlus [10], DIVA [11], o Radiance [12].
Nell'ambito di questo studio sono stati messi a confronto due strumenti di calcolo appartenenti alle categorie sopraindicate: il software LENICALC V2.0, sviluppato da ENEA e DIVA-for-Rhino.
Entrambi i software utilizzati nella ricerca considerano l'insiemi dei fattori necessari a calcolare il fabbisogno di energia per l'illuminazione, ma con diverso grado di dettaglio e accuratezza, in particolare per quanto riguarda il calcolo delle condizioni di illuminazione naturale degli ambienti interni all'edificio.

2.1 LENICALC V2.0

Il software LENICALC V2.0 si basa, come descritto in precedenti pubblicazioni [13-16], su un metodo di calcolo analitico e tabellare, che implica variazioni discrete dei parametri che influenzano la stima del fabbisogno energetico per l'illuminazione e il conseguente indice di valutazione (LENI).
La procedura di calcolo, definita nella norma UNI EN 15193-1:2017 presuppone la suddivisione dell'edificio in zone con caratteristiche impiantistiche e funzionali diverse e distinte tra zone che ricevono luce naturale (A_D) e che non ricevono luce naturale (A_{ND}). Definita la potenza installata per gli impianti di ciascuna zona, il metodo prevede la stima della disponibilità annua di luce naturale mediante la determinazione dei parametri 'fattore di luce diurna' (D) e 'fattore di disponibilità di luce naturale' (F_{DS}) e quindi l'indicazione, in base alla tipologia edilizia e al tipo di ambiente, della potenziale assenza/presenza degli utenti nelle diverse zone (F_A). Infine, in funzione dei sistemi di controllo adottati (il metodo fornisce i dati per un insieme di soluzioni di controllo rispetto all'occupazione o alla luce diurna), vengono determinati, sulla base di dati tabellari, dei fattori correttivi (fattore di illuminamento costante F_C, fattore di dipendenza dalla luce diurna F_D e fattore di occupazione F_O) per il calcolo del tempo effettivo di utilizzo degli impianti e quindi dell'energia totale per l'illuminazione $W_{L,t}$ [3]. L'energia totale viene calcolata su base annua o mensile tenendo conto del numero di ore di utilizzo in condizioni di presenza di luce naturale (t_D) o di assenza di luce naturale (t_N).
All'energia totale per l'illuminazione si somma poi quella dovuta alla condizione di stand-by degli impianti ($W_{P,t}$).
La sommatoria delle energie per l'illuminazione e per lo stand-by di tutte le zone considerate (W) viene poi rapportata alla sommatoria delle aree di pavimento per determinare l'indice di prestazione LENI (Indicatore numerico dell'energia per l'illuminazione dell'edificio espresso in kWh/m^2 anno). La Figura 1 mostra il work flow delle principali fasi di impostazione di un progetto su LENICALC.

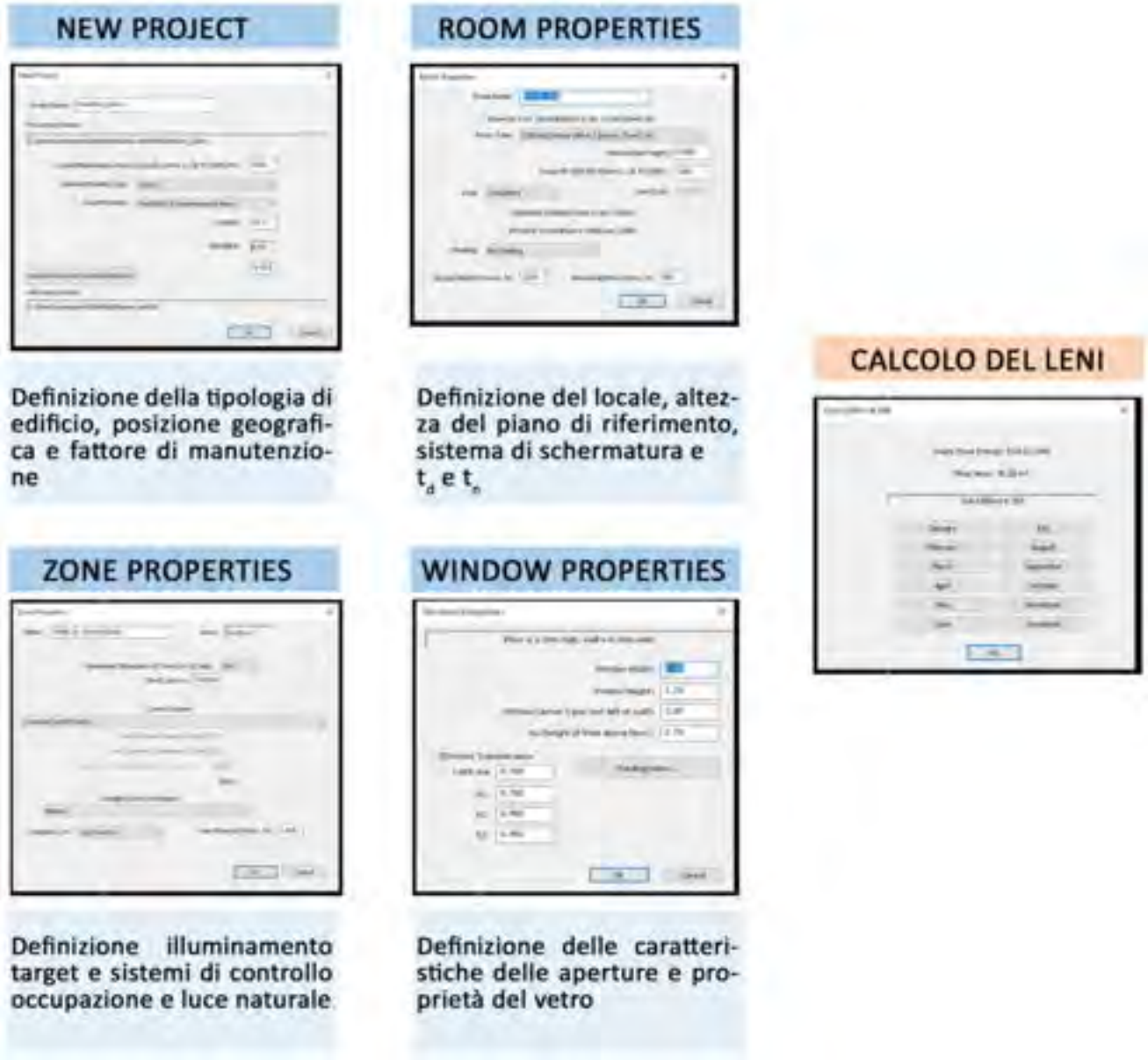


Figura 1 – Work flow delle principali fasi di impostazione e caratterizzazione di un progetto sul software LENICALC

2.2 DIVA for Rhino

DIVA for Rhino è un plug-in appositamente concepito per il software di modellazione 3D Rhino e consente la simulazione dinamica della luce naturale utilizzando Radiance come algoritmo di calcolo delle quantità fotometriche. Consente analisi istantanee o il calcolo dell'illuminamento su base annua. Il calcolo delle quantità fotometriche avviene attraverso un approccio combinato che si basa su due concetti:

- il metodo dei daylight coefficients, per discretizzare la volta celeste e collegare ogni punto della volta stessa ad un punto della griglia di calcolo interna all'ambiente;
- il modello "all-weather sky" di Perez per la generazione delle condizioni di cielo durante il corso dell'anno.

Attraverso questo approccio combinato, il software calcola l'illuminamento nel corso di un anno, con una risoluzione temporale corrispondente ad un time-step di un'ora, coerentemente con quanto normalmente fatto nei calcoli di consumo di energia per la climatizzazione, invernale ed estiva, di un ambiente.

Come input vengono utilizzati i dati climatici specifici della località di progetto (inserimento del file climatico caratteristico della località) e il modello 3D degli ambienti in esame, avendo cura di assegnare ad ogni superficie un materiale compatibile con Radiance, e specificandone le proprietà ottiche quali la riflessione

luminosa (componenti opachi) e la trasmissione luminosa (componenti trasparenti). E' possibile considerare la presenza di schermature solari, sia fisse che mobili; in quest'ultimo caso il software consente di utilizzare una schermatura teorica con una logica di controllo predefinita oppure è possibile definire condizioni differenti di schermatura attuabili in base a valori soglia di illuminamento impostabili dall'utente. Vengono inoltre inputate le griglie di calcolo, i valori di illuminamento target e il profilo di occupazione degli ambienti. I dati di illuminamento calcolati in ogni punto della griglia vengono quindi elaborati per determinare un insieme di metriche descrittive delle condizioni annuali di illuminazione naturale degli ambienti. Le metriche fornite come output dal software sono:

- Daylight Factor (DF) – percentuale di luce diurna interna in rapporto alla luce diurna che si ha in esterno su un piano orizzontale illuminato dall'intera volta celeste in assenza di radiazione solare diretta
- Daylight Autonomy (DA) – corrispondente alla percentuale di tempo, rispetto al totale delle ore di utilizzo dell'ambiente, in cui l'illuminamento dovuto alla luce naturale risulta essere maggiore o uguale al valore target;
- Continuous Daylight Autonomy (DA_{con}) – corrispondente al contributo percentuale fornito dalla luce naturale rispetto al fabbisogno complessivo di luce annua dell'ambiente;
- Maximum Daylight Autonomy (DA_{max}) – corrispondente alla percentuale di tempo, rispetto al totale delle ore di utilizzo dell'ambiente, in cui l'illuminamento dovuto alla luce naturale risulta essere maggiore o uguale a dieci volte il valore target
- Usefull Daylight Illuminance (UDI) – corrispondente alla percentuale di tempo, rispetto al totale delle ore di utilizzo dell'ambiente, in cui l'illuminamento dovuto alla luce naturale risulta essere inferiore a 100 lux, compreso tra 100 lux e 2000 lux, superiore a 2000 lux;
- Spatial Daylight Autonomy (sDA) – corrispondente alla percentuale di piano utile in cui l'illuminamento prodotto dalla luce naturale risulta essere superiore a 300 lux per una percentuale di tempo superiore al 50% del totale delle ore di utilizzo dell'ambiente
- Annual Sunlight Exposure (ASE) – corrispondente alla percentuale di piano utile in cui l'illuminamento dovuto alla sola luce solare diretta (calcolato con tutti i sistemi di schermatura non attivati) risulta essere superiore a 1000 lux per almeno 250 ore nel corso dell'anno.

Oltre al calcolo della luce naturale il software consente di calcolare il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione (W), avendo precedentemente imputato la potenza elettrica installata, la potenza di stand-by ed avendo selezionato il tipo di sistema di controllo degli impianti di illuminazione nell'ambito di un elenco preimpostato. Non viene invece considerato l'apporto al consumo energetico dovuto alla ricarica degli impianti di illuminazione di emergenza.
L'energia così calcolata, rapportata all'area corrispondente consente di determinare il LENI dell'ambiente o dell'edificio a seconda dell'estensione della simulazione effettuata.

3 Metodologia per il confronto tra i software e la determinazione dei valori di fabbisogno energetico di riferimento

Come specificato nell'introduzione, lo studio descritto in questo rapporto si pone due distinti obiettivi:

- confrontare uno strumento di calcolo semplificato e uno di simulazione dinamica del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione degli edifici (rispettivamente LENICALC v2.0 e DIVA-for-Rhino) e analizzare criticamente i risultati ottenuti;
- determinare, mediante l'uso del software LENICALC v2.0, valori di riferimento dell'indicatore LENI per edifici scolastici italiani.

Il confronto tra i software è stato condotto sui risultati relativi a due distinte fasi del processo di calcolo del LENI:

- la fase intermedia corrispondente al calcolo delle condizioni di illuminazione naturale dell'ambiente
- la fase finale corrispondente alla determinazione del fabbisogno di energia per l'illuminazione .

Il **confronto dei risultati relativi alla stima della luce naturale** risulta particolarmente importante poiché l'accuratezza nel calcolo della luce naturale è il principale elemento di distinzione tra l'approccio del metodo semplificato e quello di simulazione dinamica. Per questa fase di analisi è stato necessario definire quali metriche mettere a confronto in quanto non tutti i parametri calcolati da DIVA sono presenti nella procedura di calcolo del metodo semplificato e viceversa. In base alla definizione delle metriche di luce naturale fornita dai due strumenti di calcolo e in accordo con le indicazioni presenti in documenti di letteratura [17-19] si è ritenuto corretto mettere a confronto il fattore di luce diurna (DF) fornito tra gli output di DIVA con il fattore di luce diurna (D) calcolato da LENICALC (i due parametri hanno la stessa definizione pur avendo metodo di calcolo differente), e la Continuous Daylight Autonomy (DA_{con}) calcolata da DIVA con il fattore di disponibilità di luce diurna ($F_{D,S}$) calcolata da LENICALC. Questi ultimi due parametri, infatti, stimano entrambi, in valore percentuale, la disponibilità di luce naturale rispetto al fabbisogno annuo di luce determinato in base al requisito di illuminamento target.
Una differenza fondamentale tra i due strumenti, nel calcolo della luce naturale, consiste nella modalità con cui viene considerata l'area che riceve luce naturale in una stanza. Il metodo semplificato si basa sulla distinzione, all'interno di uno stesso ambiente, tra zona che riceve luce naturale (A_D) e zona che non riceve luce naturale (A_{ND}), mentre il software di simulazione dinamica DIVA calcola l'illuminazione naturale in tutta la stanza (sull'intera griglia di punti definita dall'utente e generalmente corrispondente all'intero piano piano orizzontale salvo eventualmente una fascia di bordo in corrispondenza delle pareti). Per consentire il confronto tra i due software, il valor medio di DF e di DA_{con} ottenuti da DIVA, e relativi all'intero ambiente, sono stati confrontati con un valore modificato di D e F_{DS} (D' e $F'_{D,S}$) ottenuto applicando le seguenti formule:

$$D' = \frac{D*A_D}{A_D+A_{ND}}\ [\%] \qquad F'_{D,S} = \frac{F_{D,S}*A_D}{A_D+A_{ND}}\ [\%]$$

L'analisi relativa al calcolo della luce naturale è stata effettuata mediante uno studio parametrico condotto inizialmente su di un singolo ambiente ad uso ufficio, facendo variare le caratteristiche architettoniche influenti sulla disponibilità di luce naturale, e successivamente considerando gli ambienti di un intero edificio scolastico, facendo variare aspetti quali la localizzazione geografica dell'edificio e le caratteristiche impiantistiche e di controllo della luce.

Per determinare i valori di riferimento dell'indicatore LENI per l'edilizia scolastica italiana è stato utilizzato esclusivamente il software LENICALC v2.0. L'edificio è lo stesso considerato in precedenza, ma sono state ampliate le casistiche, facendo ulteriormente variare la localizzazione dell'edificio nel contesto urbano e le tipologie di controllo degli impianti di illuminazione.
Nella Figura 2 si riporta una rappresentazione schematica dell'architettura dello studio condotto, mentre nei paragrafi seguenti vengono descritte le caratteristiche degli ambienti oggetto dello studio parametrico e le variabili considerate.

3.1 Caratteristiche e variabili per l'ambiente ufficio

L'ambiente utilizzato nello studio è una stanza di dimensioni 6 m x 6 m, di altezza 3 m. Le finestre sono verticali, collocate su di un'unica parete ed hanno un vetro chiaro con fattore di trasmissione luminosa di 0.70. Il fattore di riflessione delle superfici interne utilizzato nella simulazione dinamica è: 0.5 per le pareti; 0.7 per il soffitto e 0.3 per il pavimento.
Il requisito di illuminamento per l'ambiente è stato assunto pari a 500 lux e il profilo di occupazione considerato è da lunedì a venerdì, dalle 8:00 alle 17:00, coerentemente con il profilo d'uso utilizzato per definire la disponibilità di luce naturale nella norma UNI EN 15193-1:2017 [3].
Per questo ambiente sono stati modificati parametricamente una serie di variabili, in modo da ottenere un numero di casi significativo nell'ottica di effettuare il confronto delle metriche relative alla luce naturale tra i due diversi approcci di calcolo (LENICALC e DIVA). I parametri modificati sono: la latitudine del luogo e le corrispondenti condizioni climatiche, le dimensioni delle aperture (Figura 3), l'angolo di ostruzione della volta

celeste (prodotta da un edificio frontale) e l'orientamento delle aperture, La combinazione parametrica delle variabili ha dato origine ad un database di 108 casi. Nella Tabella 1 sono sintetizzate le variabili considerate. Nella Figura 4 sono inoltre indicate le aree A_D e A_{ND} individuate per il calcolo con LENICALC v2.0.

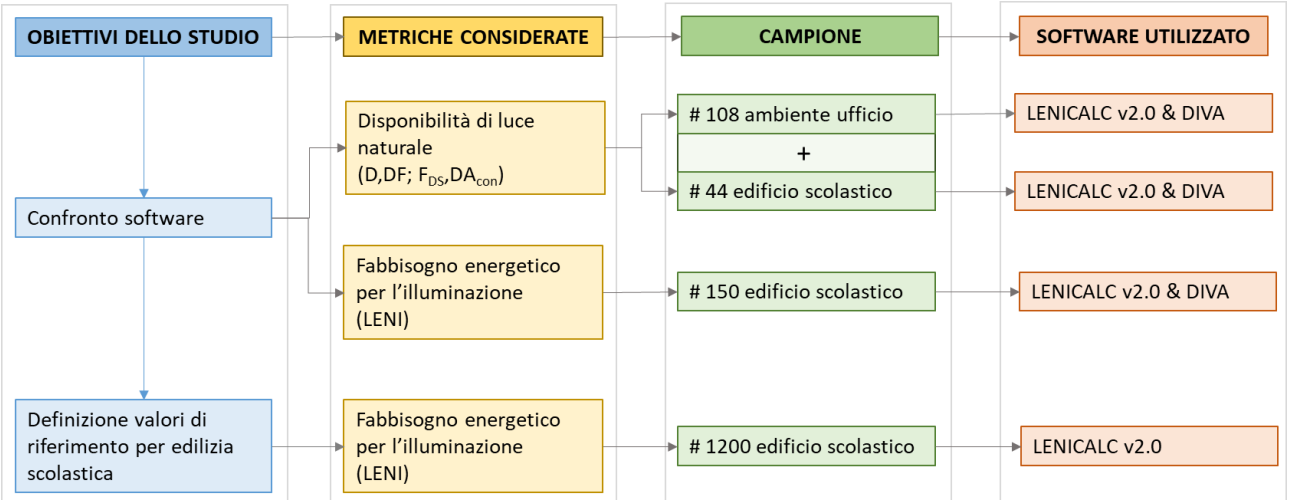


Figura 2 – Organizzazione dello studio condotto e descrizione della procedura di analisi.

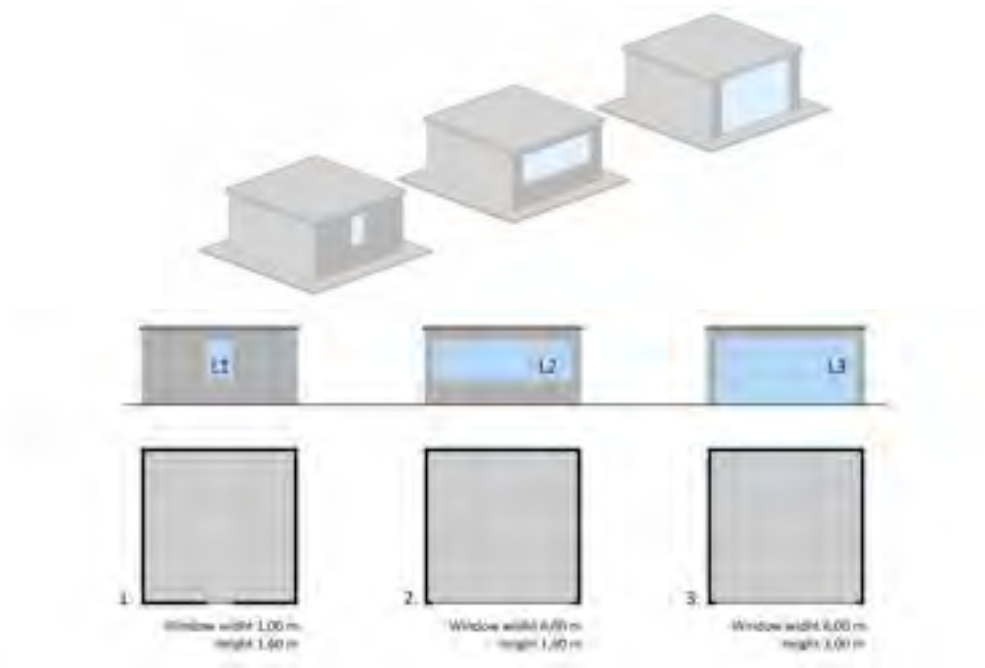


Figura 3 Ó Vista isometrica, pianta e sezione dell'ambiente considerato con indicate le dimensioni delle aperture considerate



Figura 4 Ó Indicazione in pianta delle superfici A_D (in arancio) e A_{ND} (in azzurro) relative al calcolo con LENICALC v2.0

Tabella 1. Variabili considerate nello studio parametrico relativo all'ambiente ufficio, parametri corrispondenti e valori assunti

Variabile	Parametro	Valore
Località	Latitudine	52.3° (Londra) 45.1° (Torino) 38.1° (Palermo)
Clima	File climatico .epw	Files specifici per Torino, Palermo e Londra
	Esposizione luminosa H_{dir}/H_{glob} (calcolata a partire dai dati del file climatico)	0.37 (Londra) 0.43 (Torino) 0.55 (Palermo)
Aperture verticali	Dimensione della carcassa	1,7 m^2 (WWR* = 0.09) 10.2 m^2 (WWR = 0.57) 18 m^2 (WWR = 1)
Schermature solari		Assente Tenda per controllo abbagliamento
Ostruzione della volta celeste	Angolo di ostruzione sul baricentro della finestra	0° 45°
Orientamento delle aperture	Punti cardinali	Sud Ovest Nord
*WWR= rapporto tra l'area della finestra e l'area della parete contente la finestra		

3.2 Caratteristiche e variabili per l'edificio scolastico

L'edificio scolastico utilizzato come caso studio è stato definito in una precedente fase di ricerca [4] ed ha caratteristiche scelte perché possa essere rappresentativo di una scuola superiore "tipo" nel contesto nazionale.

Si tratta di un edificio a stecca di 3 piani fuori terra, con pianta a doppia manica, sviluppata attorno ad un corridoio centrale, con due blocchi con servizi e scale e ascensori in posizione simmetrica, dimensionato per ospitare 500 studenti, divisi in 20 classi (25 studenti per classe). Le dimensioni del piano tipo sono 79 m x 17 m, pari a 1343 m^2 e altezza interna di ciascuno piano di 3 m. Lo spessore dei muri esterni è di 40 cm e gli infissi sono incassati di 20 cm rispetto alla facciata esterna. Gli infissi hanno vetro chiaro con fattore di trasmissione luminosa pari a 0.75 ed è stata considerata la presenza in tutti gli ambienti di una tenda per la protezione dall'abbagliamento.

Al piano terra sono presenti laboratori didattici e uffici per il personale amministrativo e docente, mentre il primo e il secondo piano, identici in planimetria, ospitano aule e laboratori didattici. Il profilo di utilizzo dell'edificio assunto per il calcolo in DIVA è dal lunedì al venerdì dalle 7:00 alle 15:00. Questo profilo orario è stato scelto per ottenere la massima corrispondenza tra numero di ore di luce naturale e numero di ore in assenza di luce naturale tra LENICALC e DIVA.

In Figura 5 sono riportate vista isometrica e piante del piano terra e del piano tipo con indicate le destinazioni d'uso dei locali e le posizioni degli apparecchi di illuminazione. La Figura 6 indica invece, per ciascun ambiente, la distinzione, relativa al software LENICALC v2.0, tra aree che ricevono luce naturale A_D e aree che non ricevono luce naturale A_{ND}.

Nella Tabella 2 sono riportati i dati di dettaglio relativi agli ambienti dell'edificio scolastico tipo.

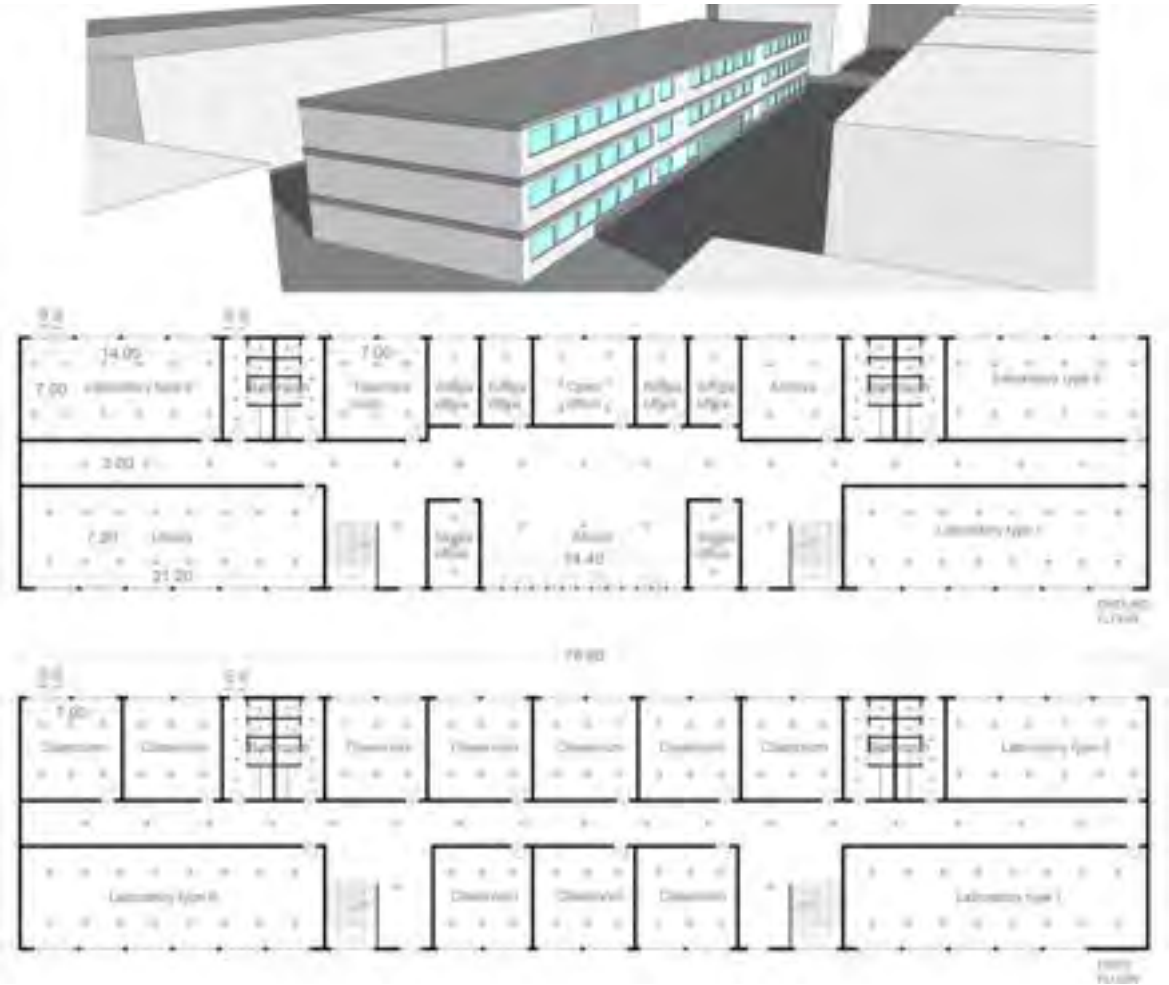


Figura 5 ó Planimetrie del piano terra e del piano tipo e vista isometrica dellìedificio scolastico di riferimento, con destinazioni dìuso dei locali e disposizione degli apparecchi di illuminazione.

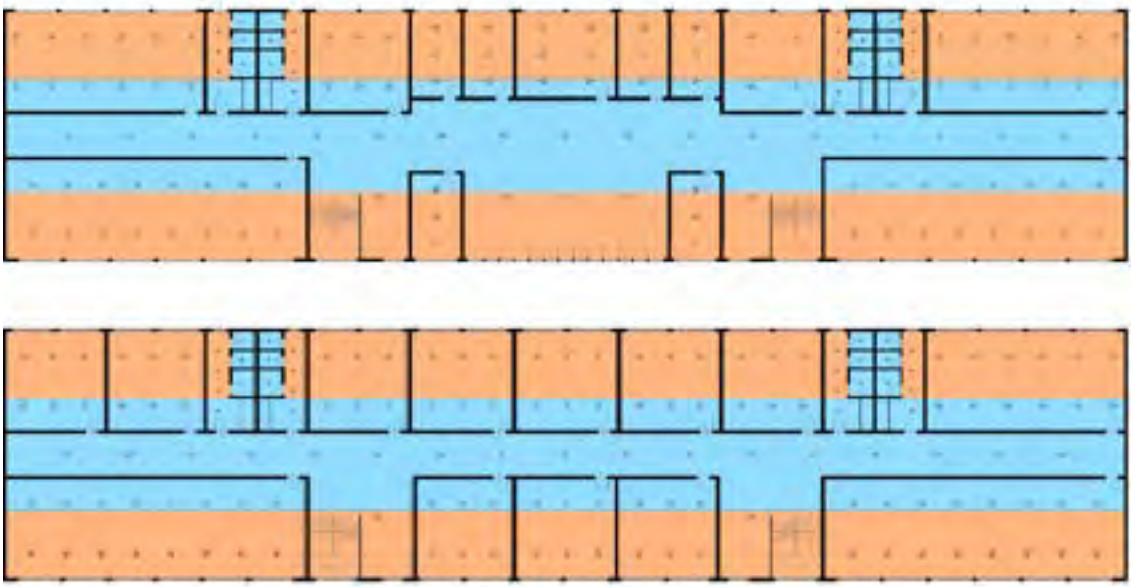


Figura 6 ó Planimetria del piano terra e del piano tipo con indicazione, per ciascun locale, delle aree A_D (arancio) e A_{ND} (azzurro) e posizionamento degli apparecchi.

Tabella 2. Caratteristiche architettoniche degli ambienti e delle finestre dellìedificio scolastico tipo

Piano 1° FT	Ambiente				Finestre					
Ambiente	L_{room} [m]	P_{room} [m]	S_{room} [m]	Area [%]	#	L_w [m]	H_w [m]	$S_{w,tot}$ [m^2]	WWR [-]	WFR [-]
Laboratorio tipo I	21	7	147	11,2	2	3	1,6	9,6	0,15	0,07
Laboratorio tipo II(x2)	14	7	196	15,0	2	3	1,6	9,6	0,23	0,10
Uffici singoli (x6)	3.5	6	126	19,6	1	3	1,6	4,8	0,46	0,23
Uffici open-space (x2)	7	6	42	3,2	2	3	1,6	9,6	0,46	0,23
Sala docenti	7	7	49	3,7	2	3	1,6	9,6	0,46	0,20
Archivio	7	7	49	3,7	2	3	1,6	9,6	0,46	0,20
Biblioteca	21	7	147	11,2	2	3	1,6	9,6	0,15	0,07
Atrio	14	6	84	6,4	13	1	2,7	35,1	0,50	0,25
Bagni (x2)	7	7	98	7,5	2	3	1,6	9,6	0,46	0,20
Scale	7	7	98	7,5	1,5	3	1,6	4,8	0,23	0,10
Corridoio	77	3	231	17,6	0	-	-	-	-	-
Piano 2° e 3° FT	**Ambiente**				**Finestre**					
Ambiente	L_{room} [m]	P_{room} [m]	S_{room} [m]	Area [%]	#	L_w [m]	H_w [m]	$S_{w,tot}$ [m]	WWR [-]	WFR [-]
Aule (x10)	7	7	490	37,4	2	3	1,6	9,6	0,46	0,20
Laboratorio tipo I	21	7	147	15,0	6	3	1,6	28,8	0,46	0,20
Laboratorio tipo II(x2)	14	7	196	19,6	4	3	1,6	19,2	0,46	0,20
Bagni (x2)	7	7	98	7,5	1	1	1,6	1,6	0,08	0,03
Scale	7	7	98	7,5	1,5	3	1,6	7,2	0,34	0,15
Corridoio	77	3	231	17,6	0	-	-	-	-	-

Legenda: L_{room} = larghezza dell'ambiente; P_{room} = profondità dell'ambiente; S_{room} = superficie dell'ambiente; %area = superficie dell'ambiente espresso come percentuale rispetto alla superficie totale del piano tipo; L_w = larghezza della finestra; H_w = altezza della finstra; $S_{w,tot}$ = superficie finestrata totale dell'ambiente; WWR, Window-to-Wall Ratio = area finestrata totale/area del muro contente le finestre; WFR, Window-to-Floor Ratio = area finestrata totale/area di pavimento dell'ambiente.

Gli impianti di illuminazione prevedono apparecchi a plafone distribuiti secondo una griglia regolare in tutti gli ambienti. Questi sono dimensionati in modo da garantire i requisiti richiesti dalla norma UNI EN 12464-1:2011 [20] (aule, laboratori di tipo I e uffici: E_{med} = 500 lux; laboratori di tipo II e sala docenti: E_{med} = 300 lux; spazi di distribuzione e archivio: E_{med} = 100 lux; bagni: E_{med} = 200 lux). Gli apparecchi e le loro caratteristiche sono stati scelti secondo un approccio di retrofit realistico rispetto ad un intervento di rinnovamento dell'impianto di illuminazione di una scuola. In particolare, sono stati utilizzati apparecchi a plafone e la modalità di distribuzione della luce è diretta. Al fine di garantire un livello di confort visivo soddisfacente gli apparecchi sono stati posizionati e dimensionati in modo da raggiungere un livello di uniformità di illuminamento sui piani di lavoro di almeno 0,5 (Figura 7).
La potenza per l'illuminazione di emergenza non viene indicata nelle schede tecniche degli apparecchi utilizzati nel contesto scolastico. Per questo motivo, nel calcolo del valori di riferimento, è stato sommato il valore di 1,00 kWh/m^2anno ai LENI calcolati, in conformità con l'indicazione della norma 15193-1:2017, appendice B [3].

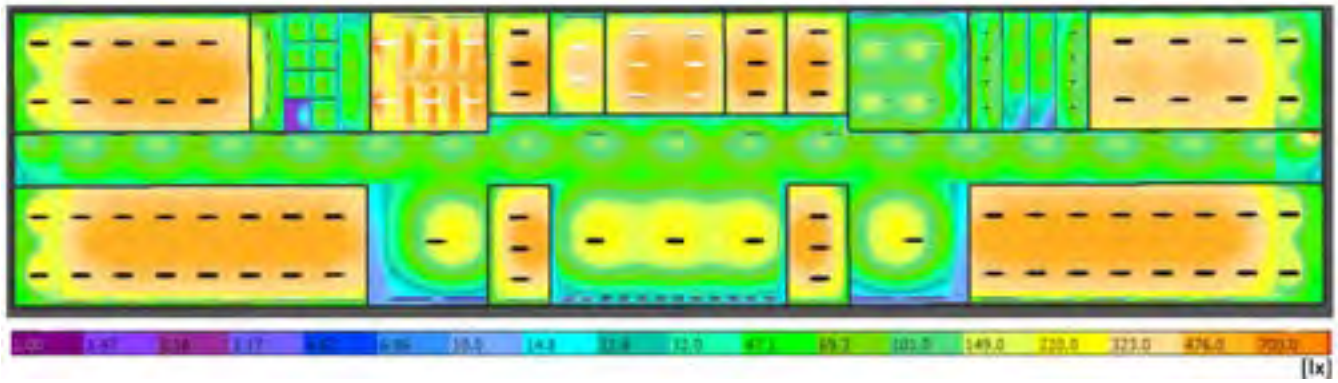
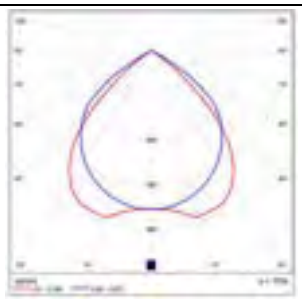
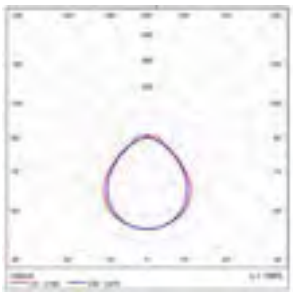


Figura 7 – Planimetria in falsi colori dei valori di illuminamento del piano terra dell'edificio scolastico.

Nell'ambito dello studio, sia per il confronto tra LENICAL v2.0 e DIVA, sia per la determinazione dei valori di riferimento di LENI per l'edilizia scolastica, sono state fatte variare alcune caratteristiche dell'edificio. In particolare per il confronto tra i software si è considerato l'edificio collocato in diverse località (Torino e Palermo), in contesti urbani a media densità e con l'edificio orientato lungo l'asse nord-sud. Inoltre, per quanto riguarda le caratteristiche degli impianti di illuminazione, sono stati considerati diversi scenari, corrispondenti a tipologie impiantistiche tradizionali e di nuova generazione e con differenti soluzioni di controllo. La combinazione parametrica delle variabili considerate ha dato origine ad un database, per il confronto delle metriche di luce naturale di 44 casi (22 ambienti con aperture verso l'esterno, per due località) e per il LENI di 150 casi (25 ambienti, per 2 località, per 3 scenari impiantistici).
Per la determinazione dei valori di riferimento di LENI le caratteristiche dell'edificio e del contesto sono state ulteriormente modificate. In questa fase della ricerca l'edificio scolastico è stato collocato in diverse località (Torino e Palermo), sono state considerate diverse densità urbane (bassa, media, elevata) e differenti orientamenti dell'edificio (orientamento nord-sud e est-ovest). Gli scenari di illuminazione artificiale sono stati maggiormente differenziati, con l'introduzione di ulteriori sistemi di controllo. La Tabella 3 descrive le caratteristiche degli impianti di illuminazione e delle sorgenti utilizzate, divisi in impianti tradizionali ed impianti con tecnologia LED. La sintesi di tutte le variabili considerate per l'edificio scolastico è riportata nella Tabella 4 con evidenziato in rosso il sottoinsieme di variabili utilizzate per il confronto tra i due software.

Tabella 3. Caratteristiche degli impianti di illuminazione utilizzati nei diversi scenari di illuminazione dell'edificio scolastico.

CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	
IMPIANTI TRADIZIONALI	IMPIANTI CON TECNOLOGIA A LED
Aule e laboratori didattici – uffici – biblioteca – spazi di distribuzione	
APPARECCHIO DI ILLUMINAZIONE	
 	 
SORGENTE DI ILLUMINAZIONE	
Sorgente: Fluorescente lineare T8 Potenza: 86,1 W Potenza di stand-by: - Flusso luminoso: 6700 lm Efficienza luminosa: 77 lm/W Resa del colore: 80 TCC: 4000 K	Sorgente: LED Potenza: 61,0 W Potenza di stand-by: 0,3 W Flusso luminoso: 6250 lm Efficienza luminosa: 102 lm/W Resa del colore: 90 TCC: 4000 K
SISTEMA DI CONTROLLO	
Manuale ON/OFF	Manuale ON/OFF Manual ON/Auto OFF, dimming con consumi di stand-by Manual ON/Auto OFF, dimming senza consumi di stand-by

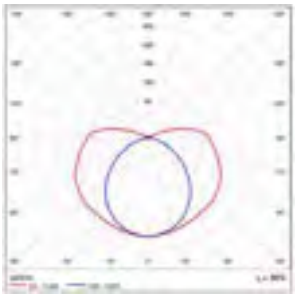
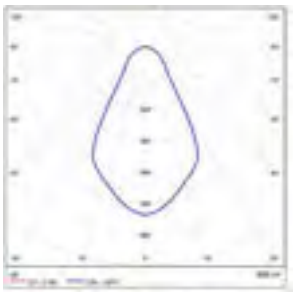
Bagni	
APPARECCHI DI ILLUMINAZIONE	
 	 
SORGENTE DI ILLUMINAZIONE	
Sorgente: Fluorescente compatta Potenza: 21,6 W Potenza di stand-by: - Flusso luminoso: 1200 lm Efficienza luminosa: 70 lm/W Resa del colore: 80 TCC: 4000 K Classe di protezione IP: 65	Sorgente: LED Potenza: 15,0 W Potenza di stand-by: 0,3 W Flusso luminoso: 1200 lm Efficienza luminosa: 77 lm/W Resa del colore: 90 TCC: 4000 K Classe di protezione IP: 65
SISTEMA DI CONTROLLO	
Manuale ON/OFF	Manuale ON/OFF Auto ON/Auto OFF

Tabella 4. Variabili considerate nello studio parametrico relativo all'edificio scolastico. In rosso sono evidenziati le variabili utilizzate nel confronto tra i software.

POSIZIONE E ORIENTAMENTO DELL'EDIFICIO				
Località	Torino Lat 45.1°; H_{dir}/H_{glob} 0.43		Palermo Lat 38.1°; H_{dir}/H_{glob} 0.55	
Densità Urbana	Bassa – angoli di ostruzione: 5° PT; 0° P1; 0° P2	Media – angoli di ostruzione: 22.8° PT; 14.3° P1; 5° P2	Alta – angoli di ostruzione: 40° PT; 26.9° P1; 10° P2	
Orientamento	Nord - Sud		Est - Ovest	
SCENARI DI ILLUMINAZIONE				
	Scenario 0	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Caratteristiche apparecchi	Sorgenti FLUO Potenza apparecchio 86,1W (ogni punto luce) 21,6W (bagni)	Sorgenti LED Potenza apparecchio 61,0W (ogni punto luce) 15,0W (bagni) 22,0W (archivio)	Sorgenti LED Potenza apparecchio 61,0W (ogni punto luce) 15,0W (bagni) 22,0W (archivio)	Sorgenti LED Potenza apparecchio 61,0W (ogni punto luce) 15,0W (bagni) 22,0W (archivio)
- Controllo occupazione	Manual ON/OFF (in ogni locale)	Manual ON/OFF (in ogni locale)	Manual ON/Auto OFF (aule, lab., uffici) Auto ON/OFF (bagni) Manual ON/OFF (spazi di distribuzione)	Manual ON/Auto OFF (aule, lab., uffici) Auto ON/OFF (bagni) Manual ON/OFF (spazi di distribuzione)
- Controllo luce naturale	Manuale (in ogni locale)	Manuale (in ogni locale)	Auto dimmed con consumi di stand-by (aule, lab., uffici) Manuale (bagni e spazi di distribuzione)	Auto dimmed senza consumi di stand-by (aule, lab., uffici) Manuale (bagni e spazi di distribuzione)

4 Risultati relativi al confronto tra i software

Le differenze nella stima dei parametri sia di luce naturale che di fabbisogno energetico ottenute con i due software sono dovute al diverso grado di accuratezza delle procedure di calcolo e alle differenze che, pur analizzando uno stesso ambiente, si introducono nel definire i dati di input per i due software. A titolo di esempio, per definire il profilo d'uso di un ambiente in LENICALC v.2.0, è necessario specificare il tipo di edificio, cui corrispondono un numero totale di ore di utilizzo suddivise in ore con luce naturale e ore in assenza di luce naturale. Viceversa, in DIVA-for-Rhino si seleziona un profilo di utilizzo settimanale e giornaliero. I due modi di definire lo stesso input possono evidentemente portare ad un diverso dato nell'ambito sia del calcolo della luce naturale che del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione.
Nella Tabella 5 si riportano i principali dati di input per i calcoli effettuati in LENICALC v2.0 e in DIVA. In particolare nella tabella vengono distinti gli input per i quali è stato possibile utilizzare valori coincidenti e gli input che, pur rappresentando la stessa variabile, possono differire nei valori di calcolo e che quindi sono stati distinti come specifici per LENICALC v2.0 e DIVA-for-Rhino.

Tabella 5. Elenco dei valori di input per i calcoli effettuati in LENICALC V2.0 e in DIVA, divisi in variabili comuni e variabili specifiche di ciascun software.

VARIABILI CON VALORI COINCIDENTI TRA LENICALC v2.0 E DIVA-for-Rhino
Posizione geografica
Caratteristiche architettoniche degli ambienti: dimensioni in pianta, altezze dei locali, altezza del piano di lavoro e angoli di ostruzione
Dimensione delle finestre
Illuminamento medio mantenuto per ciascun locale
Potenza degli impianti relativa alle zone A_D e A_{ND}
VARIABILI CON VALORI SPECIFICI PER LENICALC v2.0
Clima: Luminous exposure H_{dir}/H_{glob} calcolata dal file climatico utilizzato per le simulazioni dinamiche in DIVA
Fattore di manutenzione: MF = 0,8
Edificio di riferimento: Ambiente ufficio: Edificio per uffici Ambienti edificio scolastico: Edifici scolastici
Room type (e relativi fattori di assenza): per ciascuna tipologia di locale in base ai valori della tabella E.2 della norma UNI EN 15193-1:2017
Superficie di calcolo: distinta in A_D e A_{ND}
Effective transmittance: Ambiente ufficio: τ_{vis} = 0,70; k_1 = 0,80; k_2 = 1; k_3 = 1 ($\tau_{vis,\ effective}$ = 0.56) Ambienti edificio scolastico: τ_{vis} = 0,75; k_1 = 0,90; k_2 = 1; k_3 = 0,85 ($\tau_{vis,\ effective}$ = 0.57)
Sistema di schermatura: Ambiente ufficio: assente; protezione dall'abbagliamento Ambienti edificio scolastico: protezione dall'abbagliamento
Tempo di utilizzo degli ambienti Ambiente ufficio: **t_d =** 2250 h; **t_n** = 250 h Ambienti edificio scolastico **t_d** = 1800 h **t_n** = 200 h
Sistema di controllo rispetto all'occupazione Ambienti edificio scolastico**:** Scenario 0: Manual ON/OFF Scenario 2: Manual ON/Auto OFF (in aule, laboratori e uffici) Manual ON/OFF (negli spazi di distribuzione) Auto ON/OFF (nei bagni) Scenario 3: Manual ON/Auto OFF (in aule, laboratori e uffici) Manual ON/OFF (negli spazi di distribuzione) Auto ON/OFF (nei bagni)
Sistema di controllo rispetto alla luce naturale Ambienti edificio scolastico**:** Scenario 0: Manual Type I Scenario 2: Auto dimmed Type V, con consumi di stand-by (in aule, laboratori, uffici e atrio) Manual Type I (negli spazi di distribuzione) Scenario 3: Auto dimmed Type VIII, senza consumi di stand-by (in aule, laboratori, uffici e atrio) Manual Type I (negli spazi di distribuzione)
VARIABILI CON VALORI SPECIFICI PER DIVA-for-Rhino
Superficie di calcolo: tutta l'area dei locali, con 50 cm di margine dalle pareti; griglia di punti con interdistanza 50 cm;

Fattore di riflessione luminosa Ambiente ufficio: 70% soffitti; 50% muri; 30% pavimenti; 25% ostruzioni, albedo, facciate dell'edificio stesso Ambienti edificio scolastico: 70% soffitti; 50% muri; 30% pavimenti; 25% ostruzioni, albedo, facciate dell'edificio stesso .
Trasmissione luminosa effettiva dei vetri Ambiente ufficio: 0.70 Ambienti edificio scolastico: 0.75 NOTA: per entrambi gli ambienti i valori di trasmissione riportati sono riferiti alla lastra vetrata; la presenza del telaio è stata modellato nel modello in Rhino in maniera conforme a quanto implementato in LENICALC v2.0, in modo che le trasmissioni luminose effettive risultassero uguali per i due strumenti di calcolo
Sistema di schermatura Ambiente ufficio: assente; Conceptual dynamic shading Ambienti edificio scolastico: Conceptual dynamic shading[1]
Profilo di utilizzo degli ambienti Ambiente ufficio: da lunedì a venerdì, dalle ore 8:00 alle 17:00 Ambienti edificio scolastico: da lunedì a venerdì, dalle ore 7:00 alle 15:00
Sistema di controllo degli apparecchi di illuminazione Ambienti edificio scolastico**:** Scenario 0: Manuale ON/OFF, con controllo distinto tra zone di A_D e A_{ND} Scenario 2: Photodimming con consumi di stand-by, con controllo distinto tra zone di A_D e A_{ND} (in aule, laboratori e uffici, bagni e blocchi scale), Manuale ON/OFF nei corridoi Scenario 3: Photodimming senza consumi di stand-by, con controllo distinto tra zone di A_D e A_{ND} (in aule, laboratori e uffici, bagni e blocchi scale), Manuale ON/OFF nei corridoi

4.1 Risultati relativi alla stima della disponibilità di luce naturale

Di seguito si riportano, separatamente per i due software, i risultati relativi alla stima delle condizioni di illuminazione naturale degli ambienti considerati.

4.1.1 LENICALC v2.0

Nelle tabelle seguenti (tabella 6 e 7) sono elencati, per ciascun ambiente simulato, le variabili considerate e i risultati di fattore di luce diurna e di disponibilità di luce diurna riferiti alla sola area A_D (D e $F_{D,S}$) e all'intero ambiente (D' e $F'_{D,S}$). In particolare nella tabella 6 sono riportati i valori calcolati per il singolo ambiente ufficio e nella tabella 7 quelli relativi all'edificio scolastico.

[1] veneziana con trasmissione luminosa del 25%, attiva quando in un punto della griglia l'irradianza sia > 50 W/m^2

Tabella 6 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software LENICALC V2.0 per l'ambiente ufficio. (continua)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			METRICHE			
TORINO	PALERMO	Londra	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	D [%]	D' [%]	$F_{D,S}$ [%]	$F'_{D,S}$ [%]
													1.37	0.61	47.00	20.89
													1.37	0.61	58.00	25.78
													1.37	0.61	53.00	23.56
													3.99	3.16	64.00	50.67
													3.99	3.16	78.00	61.75
													3.99	3.16	72.00	57.00
													9.12	9.12	74.00	74.00
													9.12	9.12	85.00	85.00
													9.12	9.12	80.00	80.00
													0.52	0.23	28.00	12.44
													0.52	0.23	19.00	8.44
													0.52	0.23	24.00	10.67
													1.53	1.21	50.00	39.58
													1.53	1.21	60.00	47.50
													1.53	1.21	56.00	44.33
													3.49	3.49	60.00	60.00
													3.49	3.49	67.00	67.00
													3.49	3.49	64.00	64.00
													1.37	0.61	47.00	20.89
													1.37	0.61	37.00	16.44
													1.37	0.61	42.00	18.67
													3.99	3.16	64.00	50.67
													3.99	3.16	57.00	45.13
													3.99	3.16	61.00	48.29
													9.12	9.12	73.00	73.00
													9.12	9.12	63.00	63.00
													9.12	9.12	69.00	69.00
													0.52	0.23	28.00	12.44
													0.52	0.23	19.00	8.44
													0.52	0.23	24.00	10.67
													1.53	1.21	50.00	39.58
													1.53	1.21	39.00	30.88
													1.53	1.21	45.00	35.63
													3.49	3.49	60.00	60.00
													3.49	3.49	46.00	46.00
													3.49	3.49	53.00	53.00

Tabella 6 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software LENICALC V2.0 per l'ambiente ufficio. (segue)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			METRICHE			
TORINO	PALERMO	Londra	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	D [%]	D' [%]	$F_{D,S}$ [%]	$F'_{D,S}$ [%]
													1.37	0.61	45.00	20.00
													1.37	0.61	59.00	26.22
													1.37	0.61	53.00	23.56
													3.99	3.16	57.00	45.13
													3.99	3.16	77.00	60.96
													3.99	3.16	68.00	53.83
													9.12	9.12	63.00	63.00
													9.12	9.12	81.00	81.00
													9.12	9.12	73.00	73.00
													0.52	0.23	26.00	11.56
													0.52	0.23	14.00	6.22
													0.52	0.23	20.00	8.89
													1.53	1.21	47.00	37.21
													1.53	1.21	61.00	48.29
													1.53	1.21	55.00	43.54
													3.49	3.49	53.00	53.00
													3.49	3.49	64.00	64.00
													3.49	3.49	59.00	59.00
													1.37	0.61	43.00	19.11
													1.37	0.61	29.00	12.89
													1.37	0.61	37.00	16.44
													3.99	3.16	55.00	43.54
													3.99	3.16	47.00	37.21
													3.99	3.16	52.00	41.17
													9.12	9.12	61.00	61.00
													9.12	9.12	51.00	51.00
													9.12	9.12	57.00	57.00
													0.52	0.23	27.00	12.00
													0.52	0.23	14.00	6.22
													0.52	0.23	21.00	9.33
													1.53	1.21	49.00	38.79
													1.53	1.21	30.00	23.75
													1.53	1.21	40.00	31.67
													3.49	3.49	58.00	58.00
													3.49	3.49	35.00	35.00
													3.49	3.49	48.00	48.00

Tabella 6 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software LENICALC V2.0 per l'ambiente ufficio. (segue)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			METRICHE			
TORINO	PALERMO	Londra	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	D [%]	D' [%]	$F_{D,S}$ [%]	$F'_{D,S}$ [%]
													1.37	0.61	49.00	21.78
													1.37	0.61	57.00	25.33
													1.37	0.61	53.00	23.56
													3.99	3.16	67.00	53.04
													3.99	3.16	78.00	61.75
													3.99	3.16	73.00	57.79
													9.12	9.12	77.00	77.00
													9.12	9.12	86.00	86.00
													9.12	9.12	82.00	82.00
													0.52	0.23	30.00	13.33
													0.52	0.23	23.00	10.22
													0.52	0.23	27.00	12.00
													1.53	1.21	52.00	41.17
													1.53	1.21	60.00	47.50
													1.53	1.21	56.00	44.33
													3.49	3.49	63.00	63.00
													3.49	3.49	68.00	68.00
													3.49	3.49	66.00	66.00
													1.37	0.61	49.00	21.78
													1.37	0.61	41.00	18.22
													1.37	0.61	45.00	20.00
													3.99	3.16	67.00	53.04
													3.99	3.16	62.00	49.08
													3.99	3.16	65.00	51.46
													9.12	9.12	77.00	77.00
													9.12	9.12	70.00	70.00
													9.12	9.12	74.00	74.00
													0.52	0.23	30.00	13.33
													0.52	0.23	23.00	10.22
													0.52	0.23	27.00	12.00
													1.53	1.21	52.00	41.17
													1.53	1.21	44.00	34.83
													1.53	1.21	48.00	38.00
													3.49	3.49	63.00	63.00
													3.49	3.49	52.00	52.00
													3.49	3.49	58.00	58.00

Tabella 7 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software LENICALC V2.0 per gli ambienti scolastici.

LOCALITA'		TIPOLOGIA DI AMBIENTE											ORIENTAMENTO		PIANO			METRICHE			
TORINO	PALERMO	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	D [%]	D' [%]	$F_{D,S}$ [%]	$F'_{D,S}$ [%]
																		3.20	2.17	63.80	43.29
																		3.41	2.31	64.00	43.43
																		3.20	2.17	61.00	41.39
																		3.41	2.31	61.00	41.39
																		2.92	1.98	60.00	40.71
																		3.28	2.23	61.00	41.39
																		3.49	2.37	65.00	44.11
																		2.85	1.93	72.00	48.86
																		3.20	2.17	73.00	49.54
																		3.44	2.33	73.00	49.54
																		2.85	2.26	60.00	47.50
																		2.85	2.26	63.00	49.88
																		2.85	2.26	63.00	49.88
																		2.85	1.93	72.00	48.86
																		2.85	1.93	87.00	59.04
																		1.80	0.70	86.00	33.35
																		2.03	0.79	86.00	33.35
																		2.16	0.84	86.00	33.35
																		2.68	2.05	66.30	50.79
																		3.02	2.31	66.70	51.10
																		3.22	2.46	66.70	51.10
																		3.57	2.83	70.30	55.65
																		3.20	2.17	63.80	43.29
																		3.41	2.31	64.00	43.43
																		3.20	2.17	61.00	41.39
																		3.41	2.31	61.00	41.39
																		2.92	1.98	60.00	40.71
																		3.28	2.23	61.00	41.39
																		3.49	2.37	65.00	44.11
																		2.85	1.93	72.00	48.86
																		3.20	2.17	73.00	49.54
																		3.44	2.33	73.00	49.54
																		2.85	2.26	60.00	47.50
																		2.85	2.26	63.00	49.88
																		2.85	2.26	63.00	49.88
																		2.85	1.93	72.00	48.86
																		2.85	1.93	87.00	59.04
																		1.80	0.70	86.00	29.08
																		2.03	0.79	86.00	29.08
																		2.16	0.84	86.00	29.08
																		2.68	2.05	54.30	41.60
																		3.02	2.31	54.90	42.06
																		3.22	2.46	54.90	42.06
																		3.60	2.85	59.90	47.42

4.1.2 DIVA-for-Rhino

Nelle tabelle seguenti (tabella 8 e 9) sono elencati, per ciascun ambiente simulato, le variabili considerate e i risultati di fattore medio di luce diurna (DF_m) e di Continuous Daylight Autonomy (DA_{con}) ottenuti con la simulazione in DIVA-for-Rhyno. In particolare nella tabella 8 sono riportati i valori calcolati per il singolo ambiente ufficio e nella tabella 9 quelli relativi all'edificio scolastico.

Tabella 8 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software DIVA-for-Rhino per l'ambiente ufficio. (continua)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			METRICHE	
TORINO	PALERMO	Londra	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	DF_m [%]	$DA_{con,m}$ [%]
													0.57	20.17
													0.57	37.69
													0.57	28.21
													3.25	77.70
													3.25	88.68
													3.25	83.47
													7.90	94.10
													7.90	96.19
													7.90	95.33
													0.20	13.14
													0.20	12.21
													0.20	12.51
													1.30	59.39
													1.30	50.41
													1.30	54.57
													3.4	85.04
													3.4	78.52
													3.40	81.97
													0.57	20.04
													0.57	25.36
													0.57	22.04
													3.25	78.16
													3.25	75.12
													3.25	75.64
													7.90	94.10
													7.90	90.61
													7.90	92.17
													0.20	12.69
													0.20	10.11
													0.20	10.92
													1.30	59.99
													1.30	42.80
													1.30	48.93
													3.4	85.01
													3.4	63.29
													3.40	71.42

Tabella 8 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software DIVA-for-Rhino per l'ambiente ufficio. (segue)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			METRICHE	
TORINO	PALERMO	Londra	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	DF_m [%]	$DA_{con,m}$ [%]
													0.57	20.99
													0.57	40.70
													0.57	32.45
													3.25	83.62
													3.25	93.74
													3.25	90.34
													7.90	97.29
													7.90	98.67
													7.90	98.76
													0.20	15.73
													0.20	14.11
													0.20	15.22
													1.30	68.83
													1.30	57.77
													1.30	63.51
													3.40	91.93
													3.40	85.20
													3.40	88.13
													0.57	20.99
													0.57	25.67
													0.57	22.93
													3.25	83.62
													3.25	76.60
													3.25	79.74
													7.90	97.30
													7.90	91.34
													7.90	94.46
													0.20	15.21
													0.20	11.85
													0.20	13.08
													1.30	69.24
													1.30	48.89
													1.30	55.52
													3.40	91.97
													3.40	69.61
													3.40	72.83

Tabella 8 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software DIVA-for-Rhino per l'ambiente ufficio. (segue)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			METRICHE	
TORINO	PALERMO	Londra	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	DF_m [%]	$DA_{con,m}$ [%]
													0.57	18.48
													0.57	34.12
													0.57	26.26
													3.25	71.72
													3.25	80.26
													3.25	76.32
													7.90	88.59
													7.90	90.18
													7.90	89.49
													0.20	12.27
													0.20	10.54
													0.20	11.17
													1.30	53.23
													1.30	44.44
													1.30	48.04
													3.40	76.72
													3.40	70.84
													3.40	74.06
													0.57	18.33
													0.57	22.44
													0.57	20.98
													3.25	71.72
													3.25	67.08
													3.25	70.42
													7.90	88.59
													7.90	83.30
													7.90	86.74
													0.20	11.83
													0.20	8.66
													0.20	9.91
													1.30	53.68
													1.30	36.83
													1.30	43.51
													3.40	76.71
													3.40	57.57
													3.40	65.38

Tabella 9 – Variabili considerate e risultati relativi alla stima della luce naturale ottenuti con il software DIVA-for-Rhino per gli ambienti scolastici.

LOCALITA'		TIIPOLOGIA DI AMBIENTE										ORIENTAMENTO		PIANO			METRICHE	
TORINO	PALERMO	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	DF_m [%]	$DA_{con,m}$ [%]
																	2.70	62.25
																	2.92	67.30
																	2.71	58.00
																	2.93	64.55
																	2.67	57.66
																	3.04	64.94
																	3.25	69.99
																	2.66	75.62
																	2.99	80.76
																	3.19	83.83
																	2.40	50.94
																	2.44	55.08
																	2.79	62.38
																	2.32	68.67
																	2.35	86.98
																	0.73	45.25
																	0.87	50.18
																	0.91	53.78
																	2.01	82.71
																	2.24	89.17
																	2.32	90.45
																	4.37	91.17
																	2.70	57.01
																	2.92	61.86
																	2.71	56.12
																	2.93	62.02
																	2.67	56.20
																	3.04	62.43
																	3.25	66.77
																	2.66	70.38
																	2.99	75.96
																	3.19	83.83
																	2.40	48.92
																	2.44	55.08
																	2.79	56.93
																	2.32	63.57
																	2.35	83.66
																	0.73	45.25
																	0.87	50.18
																	0.91	53.78
																	2.01	78.85
																	2.24	85.50
																	2.32	86.81
																	4.37	87.68

4.1.3 Confronto LENICALC v2.0 – DIVA-for-Rhino

Per ciascun ambiente simulato, i dati calcolati relativi al fattore medio di luce diurna e alla disponibilità di luce naturale sono stati elaborati per ottenere le differenze relative percentuali, calcolate come segue:

$$\Delta[D'_DF_m] = \frac{D' - DF_m}{DF_m}$$

$$\Delta[F'_{D,S}_DA_{con,m}] = \frac{F'_{D,S} - DA_{con,m}}{DA_{con,m}}$$

I risultati ottenuti sono riportati nelle tabelle 10 e 11, riferite rispettivamente al singolo ambiente ufficio e agli ambienti dell'edificio scolastico.

Tabella 10 – Differenze percentuali tra DIVA-for-Rhino e LENICALC V2.0 relative al fattore medio di luce diurna e alla disponibilità annua di luce naturale. Singolo ambiente ufficio. (continua)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			DIFFERENZA	
TORINO	PALERMO	LONDRA	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	Δ[D';DFm] [%]	Δ[F'D,S;DAcon,m] [%]
													6.82	3.59
													6.82	-31.61
													6.82	-16.51
													-2.81	-34.79
													-2.81	-30.37
													-2.81	-31.71
													15.44	-21.36
													15.44	-11.63
													15.44	-16.08
													15.56	-5.30
													15.56	-30.82
													15.56	-14.75
													-6.83	-33.35
													-6.83	-5.78
													-6.83	-18.76
													2.65	-29.44
													2.65	-14.67
													2.65	-21.92
													6.82	4.23
													6.82	-35.14
													6.82	-15.31
													-2.81	-35.17
													-2.81	-39.93
													-2.81	-36.16
													15.44	-22.42
													15.44	-30.47
													15.44	-25.13
													15.56	-1.97
													15.56	-16.45
													15.56	-2.30
													-6.83	-34.02
													-6.83	-27.86
													-6.83	-27.19
													2.65	-29.42
													2.65	-27.32
													2.65	-25.79

Tabella 10 – Differenze percentuali tra DIVA-for-Rhino e LENICALC V2.0 relative al fattore medio di luce diurna e alla disponibilità annua di luce naturale. Singolo ambiente ufficio. (segue)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			DIFFERENZA	
TORINO	PALERMO	LONDRA	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	$\Delta[D';DF_{ml}]$ [%]	$\Delta[F'_{D,s};DAcon,m]$ [%]
													6.82	-4.72
													6.82	-35.58
													6.82	-27.40
													-2.81	-46.04
													-2.81	-34.97
													-2.81	-40.41
													15.44	-35.25
													15.44	-17.91
													15.44	-26.08
													15.56	-26.53
													15.56	-55.89
													15.56	-41.61
													-6.83	-45.95
													-6.83	-16.40
													-6.83	-31.44
													2.65	-42.35
													2.65	-24.88
													2.65	-33.05
													6.82	-8.96
													6.82	-49.79
													6.82	-28.30
													-2.81	-47.93
													-2.81	-51.43
													-2.81	-48.37
													15.44	-37.31
													15.44	-44.16
													15.44	-39.66
													15.56	-21.09
													15.56	-47.50
													15.56	-28.66
													-6.83	-43.97
													-6.83	-51.42
													-6.83	-42.96
													2.65	-36.94
													2.65	-49.72
													2.65	-34.09

Tabella 10 – Differenze percentuali tra DIVA-for-Rhino e LENICALC V2.0 relative al fattore medio di luce diurna e alla disponibilità annua di luce naturale. Singolo ambiente ufficio. (segue)

LOCALITA'			SCHERMATURA		OSTRUZIONE		APERTURA			ORIENTAMENTO			DIFFERENZA	
TORINO	PALERMO	LONDRA	ASSENTE	CONTR. ABBAGLIAM.	FRONTALE 0°	FRONTALE 45°	FINESTRA L1	FINESTRA L2	FINESTRA L3	NORD	SUD	OVEST	$\Delta[D';DF_{ml}]$ [%]	$\Delta[F'_{D,s};DAcon,m]$ [%]
													6.82	17.85
													6.82	-25.76
													6.82	-10.31
													-2.81	-26.04
													-2.81	-23.06
													-2.81	-24.28
													15.44	-13.08
													15.44	-4.64
													15.44	-8.37
													15.56	8.64
													15.56	-2.99
													15.56	7.40
													-6.83	-22.66
													-6.83	6.89
													-6.83	-7.72
													2.65	-17.88
													2.65	-4.01
													2.65	-10.88
													6.82	18.81
													6.82	-18.79
													6.82	-4.69
													-2.81	-26.04
													-2.81	-26.83
													-2.81	-26.93
													15.44	-13.08
													15.44	-15.97
													15.44	-14.69
													15.56	12.66
													15.56	18.02
													15.56	21.10
													-6.83	-23.31
													-6.83	-5.43
													-6.83	-12.67
													2.65	-17.87
													2.65	-9.68
													2.65	-11.29

Tabella 11 – Differenze percentuali tra LENICALC V2.0 e DIVA-for-Rhino relative al fattore medio di luce diurna e alla disponibilità annua di luce naturale. Edificio scolastico.

LOCALITA'		TIPOLOGIA DI AMBIENTE											ORIENTAMENTO		PIANO			DIFFERENZA	
TORINO	PALERMO	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	$\Delta[D';DF_m]$ [%]	$\Delta[F'D,S;DAcon,m]$ [%]
																		-19.58	-30.45
																		-20.67	-35.47
																		-19.93	-28.63
																		-21.07	-35.88
																		-25.73	-29.39
																		-26.72	-36.26
																		-27.17	-36.98
																		-27.39	-35.39
																		-27.38	-38.66
																		-26.78	-40.91
																		-6.07	-6.75
																		-7.54	-9.44
																		-19.05	-20.04
																		-16.67	-28.86
																		-17.55	-32.13
																		-4.91	-26.30
																		-9.27	-33.53
																		-7.87	-37.98
																		1.99	-38.59
																		3.41	-42.69
																		6.35	-43.50
																		-35.32	-38.95
																		-19.58	-37.87
																		-20.67	-42.41
																		-19.93	-43.17
																		-21.07	-48.58
																		-25.73	-44.46
																		-26.72	-48.92
																		-27.17	-47.15
																		-27.39	-42.15
																		-27.38	-48.19
																		-26.78	-53.05
																		-6.07	-25.57
																		-7.54	-26.69
																		-19.05	-29.08
																		-16.67	-39.15
																		-17.55	-36.73
																		-4.91	-17.13
																		-9.27	-25.26
																		-7.87	-30.26
																		1.99	-53.11
																		3.41	-56.75
																		6.35	-52.53
																		-34.83	-31.57

Analizzando in dettaglio i dati di fattore di luce diurna riportati in figura 8 si evidenzia una buona correlazione tra i valori ottenuti con LENICALC v2.0 e con DIVA-for-Rhino. Il coefficiente di correlazione R^2 risulta essere pari a 0.96, e si evidenzia una miglior correlazione per bassi valori di fattore di luce diurna, mentre la differenza tra i risultati dei due software si incrementa, seppur con qualche eccezione, al crescere di DF. In figura 9 sono rappresentate le differenze relative tra D' e DF_m per tutti i casi analizzati. Nel grafico i dati sono rappresentati al crescere di DF_m.
In media, la variazione nella stima del fattore di luce diurna tra LENICALC v2.0 e DIVA-for-Rhino è di -11.6%.

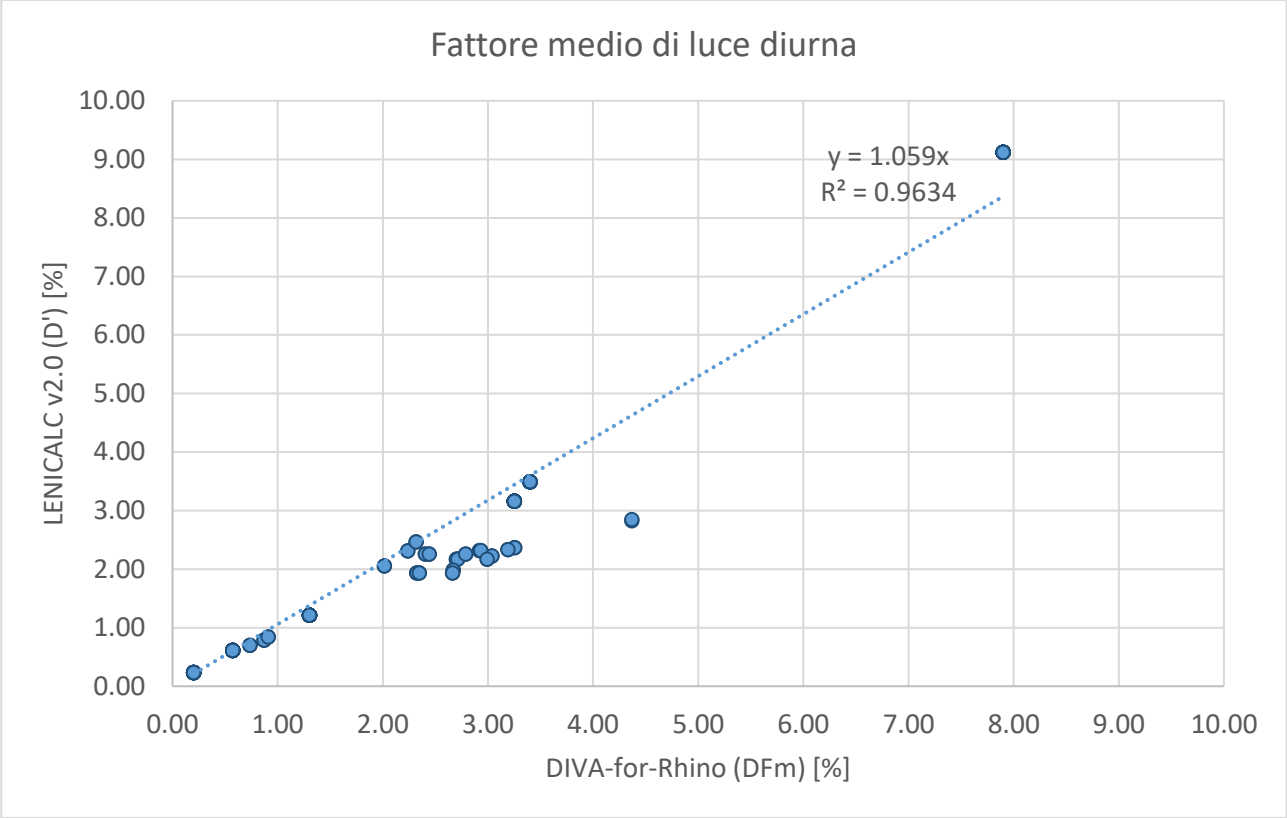


Figura 8 – Confronto tra fattore medio di luce diurna D' calcolato con LENICALC e DF_m calcolato con DIVA per l'insieme degli ambienti analizzati

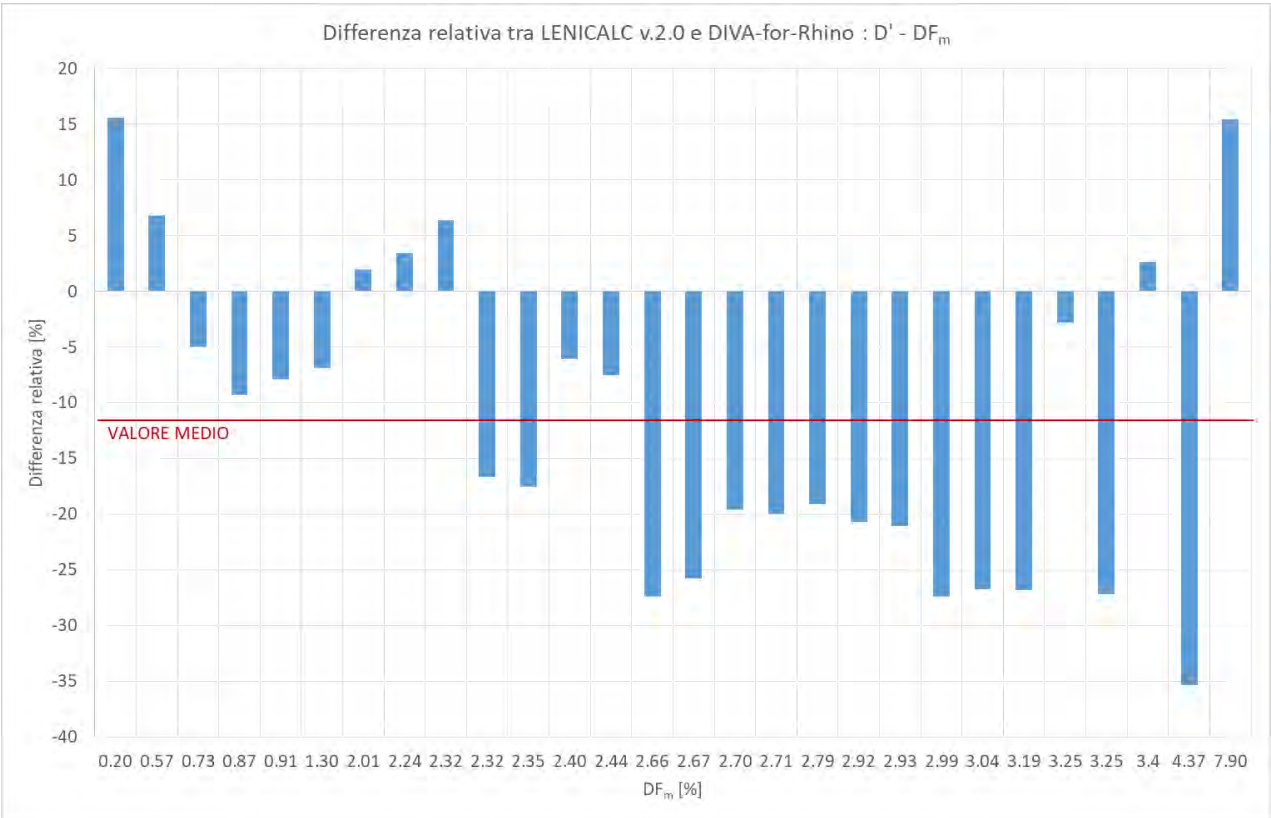


Figura 9 – Differenza percentuale tra fattore medio di luce diurna calcolato con LENICALC 2.0 e con DIVA-for-Rhino.

L'analisi relativa alla disponibilità annua di luce naturale, effettuata col confronto delle metriche $F'_{D,S}$ per LENICALC v2.0 e DA_{con} per DIVA-for-Rhyno, ha prodotto risultati analoghi ai precedenti, ma con scostamenti mediamente superiori (figura 10). La correlazione tra le due metriche risulta buona (coefficiente di correlazione R^2>0.8) e si osserva una generale sottostima della disponibilità di luce naturale annua di LENICALC v2.0 rispetto a DIVA-for-Rhyno.

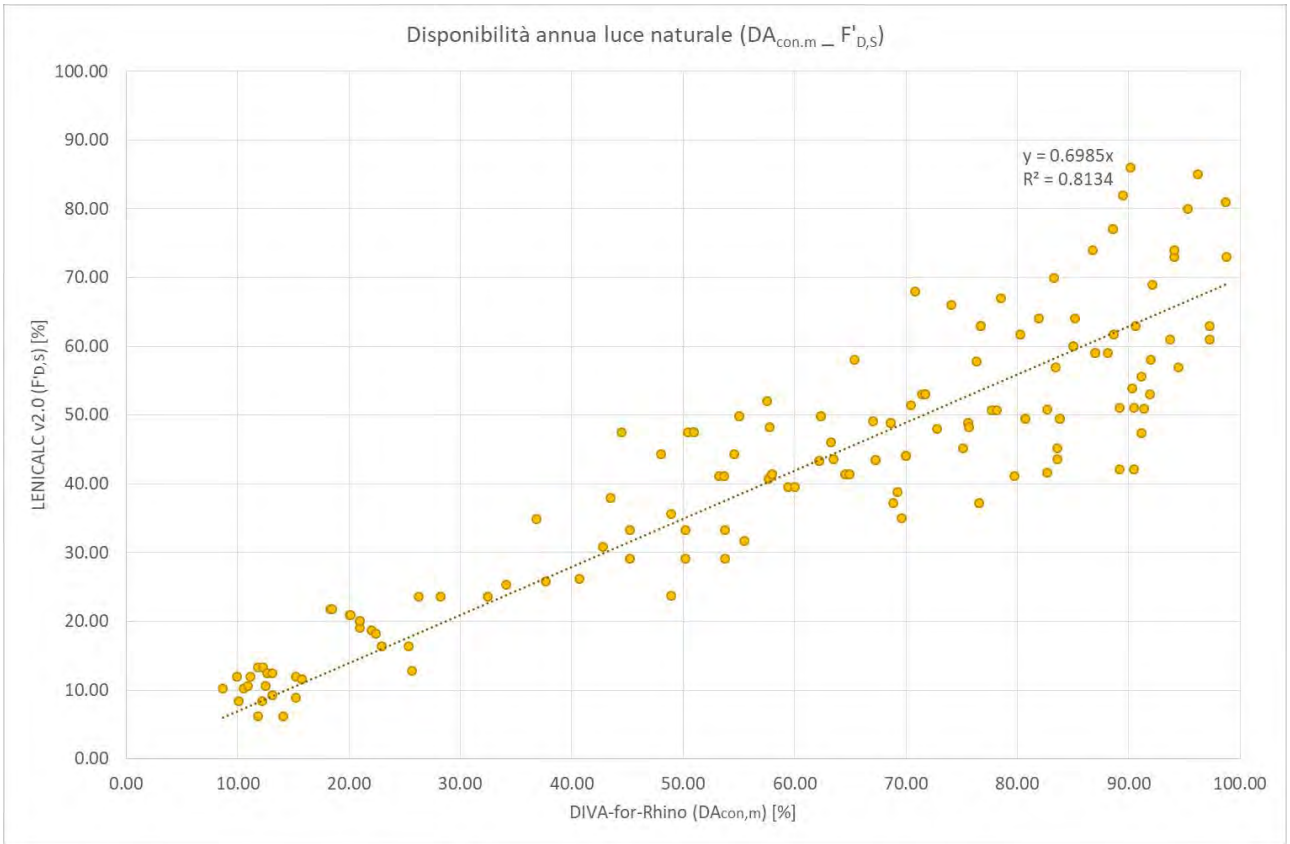


Figura 10– Confronto tra $F_{D,S}$ calcolato con LENICALC e $DA_{con,m}$ calcolata con DIVA per l'insieme degli ambienti analizzati

In figura 11 sono riportate, per l'insieme dei casi analizzati, le differenze relative tra $F'_{D,S}$ e $DA_{con,m}$; viene inoltre indicato, mediante una linea rossa orizzontale, il valore medio di tali scostamenti. Dall'analisi del grafico si osserva come, solo per un numero limitato di casi (6%) si abbia una differenza relativa positiva tra LENICALC e DIVA, mentre, per la restante parte del campione, la differenza relativa è compresa in un intervallo di valori che va da -2% a -57%. Per l'intero campione la differenza relativa media è pari a -26%.
I dati sono stati successivamente rielaborati nell'ottica di disaggregare i risultati relativi alle tre località analizzate (Torino, Palermo e Londra) e per ciascuna località si sono confrontati i valori medi complessivi, con quelli relativi ai sottoinsiemi di casi senza schermatura solare, con schermatura solare, esposti a nord, sud e ovest ed infine considerando solo i casi con fattore di luce diurna molto elevato (DF>7) o fattore di luce diurna molto basso (DF<1). I risultati sono riportati nel grafico di figura 12. È possibile osservare come Londra sia la località per la quale si ottengono gli scostamenti minori tra i due software di simulazione, mentre le differenze si incrementano progressivamente per Torino e Palermo. Inoltre, per i casi simulati a Londra gli scostamenti non differiscono molto al variare dell'orientamento delle aperture o in presenza o meno della schermatura, mentre per valori molto bassi di fattore di luce diurna si inverte la tendenza e si ha una sovrastima di LENICALC rispetto a DIVA. Per i casi simulati a Torino e Palermo si osservano andamenti molto simili, seppur con valori assoluti differenti: i casi senza tenda presentano scostamenti inferiori rispetto a quelli con tenda, così come le differenze tra LENICALC e DIVA sono inferiori per gli ambienti a nord e a ovest rispetto ai casi orientati a sud. Quest'ultimo risultato è riscontrabile anche per i casi di Londra, nonostante la variazione sia molto contenuta.

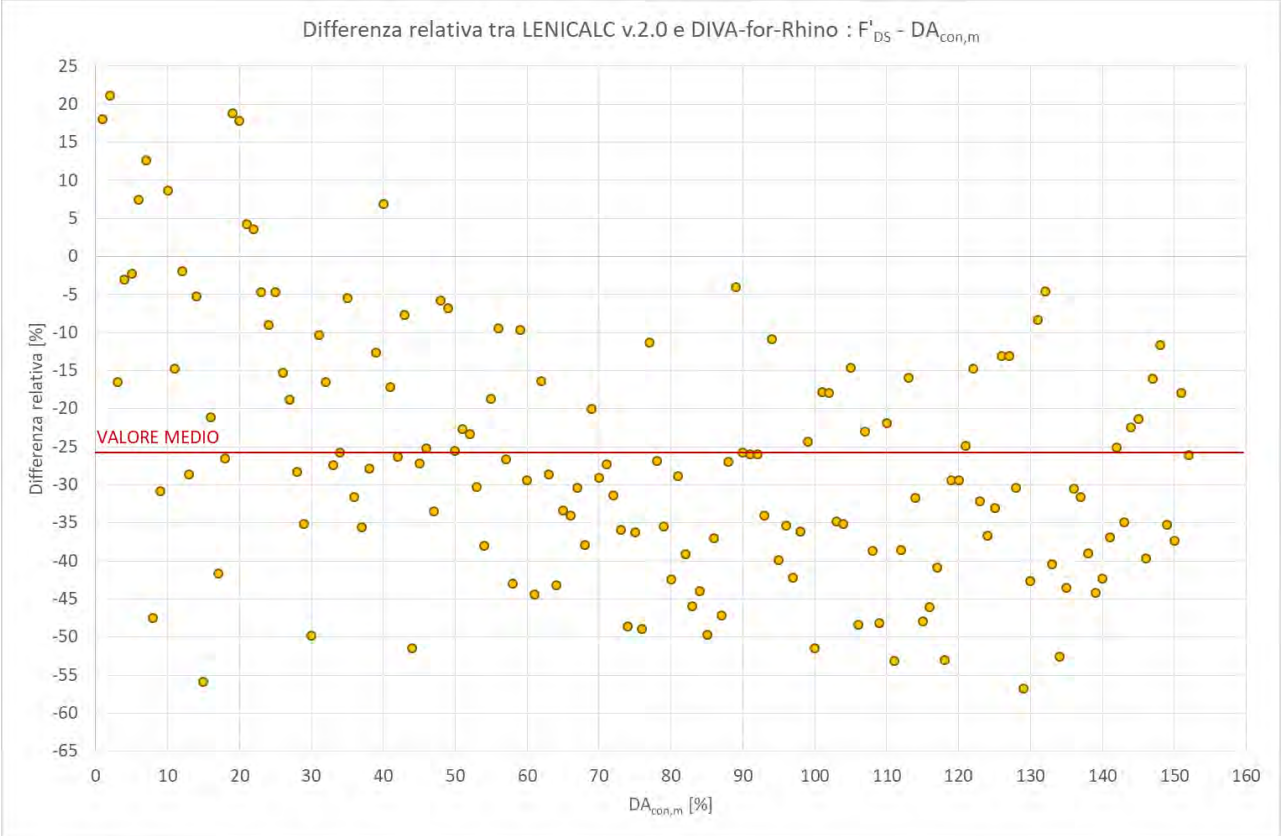


Figura 11– Differenza relativa $F_{D,S}$ calcolata con LENICALC e $DA_{con,m}$ calcolata con DIVA per l'insieme degli ambienti analizzati

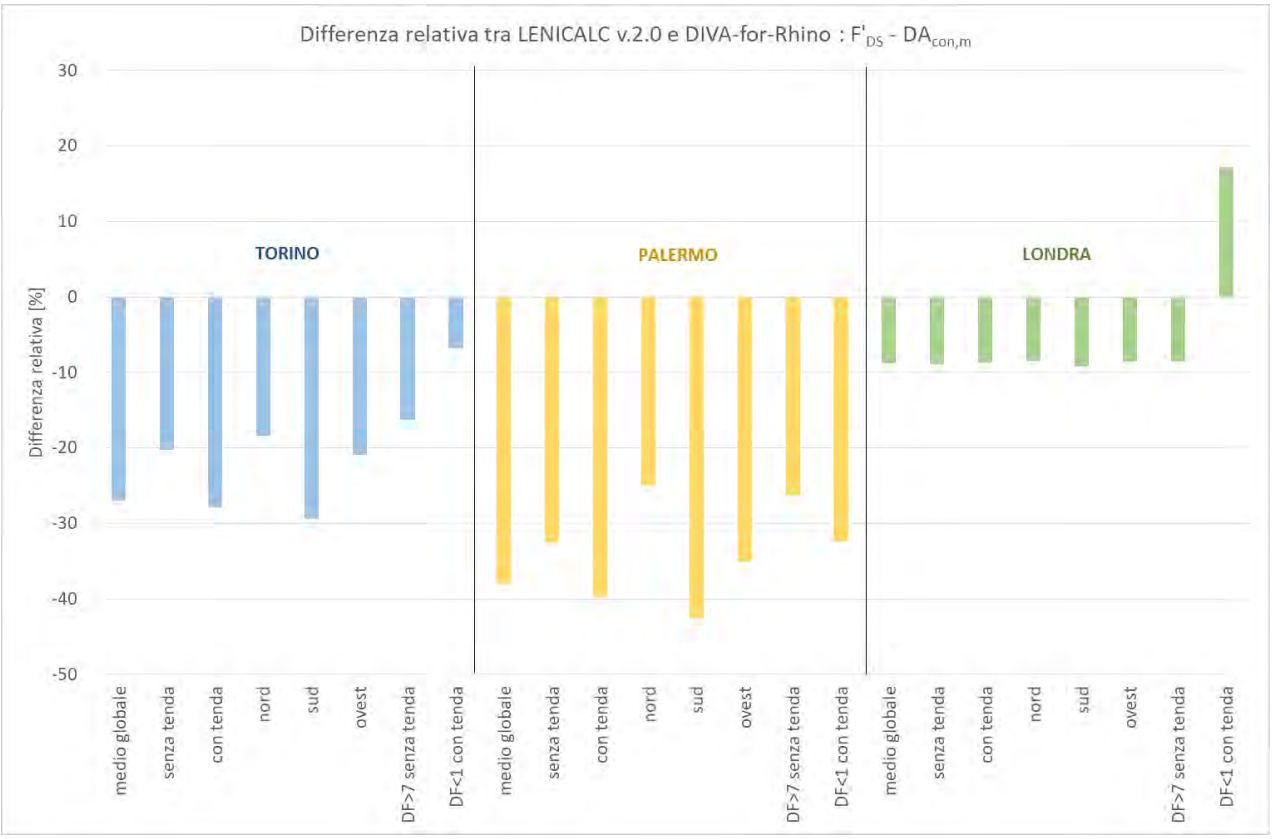


Figura 12 – Differenza relativa $F_{D,S}$ calcolata con LENICALC e $DA_{con,m}$ calcolata con DIVA per l'insieme degli ambienti analizzati. Dati aggregati per località.

4.2 Risultati relativi alla stima del fabbisogno energetico per l'illuminazione

Il confronto tra i due software, relativamente alla stima del fabbisogno energetico per l'illuminazione, è stato effettuato sul campione degli ambienti dell'edificio scolastico, facendo variare l'impianto di illuminazione e di controllo della luce secondo 3 diversi scenari (senario 0, 2 e 3), per un totale complessivo di 150 casi. Di seguito si riportano, separatamente per i due software, i risultati relativi al calcolo dell'energia totale per l'illuminazione (W) e dell'indice LENI. I risultati riportati di seguito non includono il fabbisogno per l'illuminazione di emergenza.

4.2.1 LENICALC v2.0

Nella tabella seguente (tabella 12) sono elencati, per ciascun ambiente simulato, le variabili considerate e i risultati di energia totale per l'illuminazione (W) e di LENI. Per quanto riguarda l'energia vengono inoltre riportati i dati distinti per la zona di ambiente che riceve luce naturale A_D e quella che non riceve luce naturale $A_{N,D}$. Questi dati sono calcolati tenendo conto del numero di apparecchi che ricade in ciascuna zona (cfr. figura 6).

Tabella 12 – Variabili considerate e risultati relativi all'energia totale per l'illuminazione e al LENI ottenuti con il software LENICALC V2.0 per gli ambienti scolastici.

LOCALITA'		SCENARIO			TIPOLOGIA DI AMBIENTE											ORIENTAMENTO		PIANO			METRICHE			
TORINO	PALERMO	SCENARIO 0	SCENARIO 2	SCENARIO 3	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	W_{ND} [kWh]	W_{AND} [kWh]	W_{tot} [kWh]	LENI [kWh/m^{2}anno]
																					345.9	492.5	838.4	17.11
																					345.4	492.5	837.9	17.10
																					352.5	492.5	844.9	17.24
																					352.1	492.5	844.6	17.24
																					702.4	967.7	1670.1	11.36
																					699.6	967.7	1667.3	11.34
																					655.5	967.7	1623.2	11.04
																					465.8	725.8	1191.6	12.16
																					463.1	725.8	1188.9	12.13
																					462.8	725.8	1188.5	12.13
																					174.1	121.0	295.1	14.05
																					195.5	138.2	333.7	15.89
																					437.0	311.0	748.0	17.81
																					266.2	414.7	680.9	13.90
																					117.4	207.4	324.7	6.63
																					47.5	129.6	177.1	7.23
																					47.7	129.6	177.3	7.24
																					47.6	129.6	177.2	7.23
																					139.4	0.0	139.4	4.50
																					138.9	0.0	138.9	4.48
																					138.9	0.0	138.9	4.48
																					192.9	0.0	192.9	2.30
																					0.0	1762.6	1762.6	8.27
																					0.0	1762.6	1762.6	8.27
																					0.0	1762.6	1762.6	8.27
																					149.1	279.8	428.8	8.75
																					164.7	279.8	444.4	9.07
																					170.2	274.5	444.7	9.08
																					170.2	274.5	444.7	9.08
																					314.2	502.0	816.2	5.55
																					312.2	502.0	814.2	5.54
																					294.9	502.0	796.9	5.42
																					209.7	376.5	586.2	5.98
																					207.9	376.5	584.4	5.96
																					207.7	376.5	584.2	5.96
																					79.2	62.8	142.0	6.76
																					91.5	75.0	166.4	7.92
																					204.7	176.1	380.8	9.07
																					124.8	224.9	349.6	7.13
																					19.2	52.8	72.0	1.47
																					33.9	62.0	95.9	3.92
																					33.8	62.0	95.8	3.91
																					33.7	62.0	95.7	3.91
																					98.4	0.0	98.4	3.17
																					98.1	0.0	98.1	3.16
																					98.0	0.0	98.0	3.16
																					136.2	0.0	136.2	1.62
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					139.4	274.5	413.9	8.45
																					138.9	275.0	413.9	8.45
																					145.4	275.0	420.4	8.58
																					145.0	275.0	420.0	8.57
																					266.7	488.0	754.7	5.13
																					264.4	488.0	752.4	5.12
																					242.2	488.0	730.2	4.97
																					228.8	366.0	594.8	6.07
																					161.3	366.0	527.3	5.38
																					161.0	366.0	527.0	5.38
																					65.5	61.0	126.5	6.02
																					75.5	73.2	148.7	7.08
																					176.2	170.0	346.2	8.24
																					130.7	219.6	350.3	7.15
																					11.6	52.8	64.4	1.31
																					22.7	62.0	84.7	3.46
																					28.5	62.0	90.5	3.69
																					28.5	62.0	90.5	3.69
																					98.4	0.0	98.4	3.17
																					98.1	0.0	98.1	3.16
																					98.0	0.0	98.0	3.16
																					136.2	0.0	136.2	1.62
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35

LOCALITA'		SCENARIO			TIPOLOGIA DI AMBIENTE												ORIENTAMENTO		PIANO			METRICHE			
TORINO	PALERMO	SCENARIO 0	SCENARIO 2	SCENARIO 3	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	W_{AD} [kWh]	W_{AND} [kWh]	W_{tot} [kWh]	LENI [kWh/m^{2}anno]
																					372.1	492.5	864.6	17.64
																					371.6	492.5	864.0	17.63
																					385.4	492.5	877.9	17.92
																					385.0	492.5	877.5	17.91
																					765.1	967.7	1732.8	11.79
																					762.6	967.7	1730.3	11.77
																					717.9	967.7	1685.6	11.47
																					521.5	725.8	1247.3	12.73
																					518.5	725.8	1244.3	12.70
																					518.0	725.8	1243.7	12.69
																					190.2	121.0	311.1	14.82
																					210.3	138.2	348.5	16.59
																					473.2	311.0	784.2	18.67
																					298.0	414.7	712.7	14.55
																					130.0	207.4	337.4	6.88
																					51.5	129.6	181.1	7.39
																					51.6	129.6	181.2	7.40
																					51.5	129.6	181.1	7.39
																					151.6	0.0	151.6	4.89
																					151.0	0.0	151.0	4.87
																					151.0	0.0	151.0	4.87
																					210.4	0.0	210.4	2.50
																					0.0	1762.6	1762.6	8.27
																					0.0	1762.6	1762.6	8.27
																					0.0	1762.6	1762.6	8.27
																					167.6	279.8	447.3	9.13
																					185.2	279.8	464.9	9.49
																					196.0	274.5	470.5	9.60
																					196.0	274.5	470.5	9.60
																					358.6	502.0	860.6	5.85
																					356.8	502.0	858.8	5.84
																					336.2	502.0	838.2	5.70
																					244.5	376.5	621.0	6.34
																					243.4	376.5	619.9	6.33
																					243.1	376.5	619.6	6.32
																					90.6	62.8	153.4	7.30
																					102.5	75.0	177.4	8.45
																					230.3	176.1	406.4	9.68
																					146.2	224.9	371.1	7.57
																					21.3	52.8	74.1	1.51
																					36.0	62.0	98.0	4.00
																					36.1	62.0	98.1	4.00
																					36.0	62.0	98.0	4.00
																					107.1	0.0	107.1	3.45
																					106.6	0.0	106.6	3.44
																					106.6	0.0	106.6	3.44
																					148.5	0.0	148.5	1.77
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					163.5	274.5	438.0	8.94
																					163.0	274.5	437.5	8.93
																					175.8	274.5	450.3	9.19
																					175.4	274.5	449.9	9.18
																					319.0	488.0	807.0	5.49
																					317.0	488.0	805.0	5.48
																					291.3	488.0	779.3	5.30
																					289.5	366.0	655.5	6.69
																					204.5	366.0	570.5	5.82
																					161.0	366.0	527.0	5.38
																					78.8	61.0	139.8	6.66
																					88.4	73.2	161.6	7.70
																					206.4	170.8	377.2	8.98
																					165.5	219.6	385.1	7.86
																					14.1	52.8	66.9	1.37
																					24.6	62.0	86.6	3.54
																					30.9	62.0	92.9	3.79
																					30.8	62.0	92.8	3.79
																					107.1	0.0	107.1	3.45
																					106.6	0.0	106.6	3.44
																					106.6	0.0	106.6	3.44
																					148.5	0.0	148.5	1.77
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35
																					0.0	714.0	714.0	3.35

4.2.2 DIVA-for Rhino

Nella tabella seguente (tabella 13) sono elencati, per ciascun ambiente simulato, le variabili considerate e i risultati di energia totale per l'illuminazione (W) e di LENI.

Tabella 13 – Variabili considerate e risultati relativi all'energia totale per l'illuminazione e al LENI ottenuti con il software DIVA-for-Rhyno per gli ambienti scolastici.

LOCALITA'		SCENARIO			TIPOLOGIA DI AMBIENTE										ORIENTAMENTO		PIANO			METRICHE	
TORINO	PALERMO	SCENARIO 0	SCENARIO 2	SCENARIO 3	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	W_{tot} [kWh]	LENI [kWh/m^{2}anno]
																					861.2	17.58
																					773.8	15.79
																					890.9	18.18
																					790.1	16.12
																					2462.6	16.75
																					2272.4	15.46
																					2010.6	13.68
																					1798.0	18.35
																					1654.2	16.88
																					1463.4	14.93
																					476.9	22.71
																					486.5	23.17
																					902.4	21.49
																					940.5	19.19
																					612.4	12.50
																					314.9	12.85
																					312.9	12.77
																					308.6	12.60
																					310.4	10.01
																					296.2	9.55
																					293.7	9.47
																					379.3	4.52
																					3008.1	14.12
																					3008.1	14.12
																					3008.1	14.12
																					462.5	9.44
																					394.0	8.04
																					523.9	10.69
																					431.0	8.80
																					1484.5	10.10
																					1279.9	8.71
																					1091.6	7.43
																					831.4	8.48
																					681.3	6.95
																					549.2	5.60
																					295.5	14.07
																					281.1	13.39
																					486.0	11.57
																					448.9	9.16
																					67.0	1.37
																					200.4	8.18
																					193.8	7.91
																					187.9	7.67
																					219.2	7.07
																					209.1	6.75
																					207.3	6.69
																					113.3	1.33
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72
																					459.4	9.38
																					391.2	7.98
																					520.8	10.63
																					428.2	8.74
																					1475.9	10.04
																					1271.9	8.65
																					1084.5	7.38
																					825.0	8.42
																					675.4	6.89
																					544.2	5.55
																					293.8	13.99
																					279.4	13.30
																					483.0	11.50
																					445.6	9.09
																					64.8	1.32
																					200.4	8.18
																					191.4	7.81
																					185.2	7.56
																					219.2	7.07
																					209.1	6.75
																					207.3	6.69
																					110.0	1.31
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72

LOCALITA'		SCENARIO			TIPOLOGIA DI AMBIENTE										ORIENTAMENTO		PIANO			METRICHE	
TORINO	PALERMO	SCENARIO 0	SCENARIO 2	SCENARIO 3	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	W_{tot} [kWh]	LENI [kWh/m^{2}anno]
																					918.8	18.75
																					822.1	16.78
																					880.0	17.96
																					783.5	15.99
																					2476.4	16.85
																					2248.9	15.30
																					2053.5	13.97
																					1937.0	19.77
																					1780.9	18.17
																					1599.6	16.32
																					472.7	22.51
																					486.5	23.17
																					955.1	22.74
																					998.7	20.38
																					649.6	13.26
																					314.9	12.85
																					312.9	12.77
																					308.6	12.60
																					321.1	10.36
																					295.6	9.54
																					296.9	9.58
																					381.4	4.54
																					3008.1	14.12
																					3008.1	14.12
																					3008.1	14.12
																					520.5	10.62
																					445.0	9.08
																					502.4	10.25
																					430.3	8.78
																					1837.5	12.50
																					1272.4	8.66
																					1093.0	7.44
																					979.2	9.99
																					811.1	8.28
																					671.6	6.85
																					287.9	13.71
																					281.1	13.39
																					542.9	12.93
																					511.7	10.44
																					81.2	1.66
																					203.0	8.29
																					193.8	7.91
																					187.9	7.67
																					217.4	7.01
																					207.6	6.70
																					203.3	6.56
																					140.9	1.68
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72
																					509.4	10.40
																					428.5	8.74
																					506.3	10.33
																					427.1	8.72
																					1631.9	11.10
																					1264.6	8.60
																					1098.9	7.48
																					941.3	9.61
																					783.4	7.99
																					647.2	6.60
																					286.4	13.64
																					279.4	13.30
																					529.1	12.60
																					499.3	10.19
																					77.1	1.57
																					200.4	8.18
																					191.4	7.81
																					185.2	7.56
																					217.4	7.01
																					207.6	6.70
																					203.3	6.56
																					132.0	1.57
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72
																					1218.6	5.72

4.2.3 Confronto LENICALC v2.0 – DIVA-for-Rhino

Per ciascun ambiente e configurazione impiantistica simulata, i dati di LENI sono stati elaborati per ottenere le differenze relative percentuali, calcolate come segue:

$$\Delta LENI = \frac{LENI_{LC} - LENI_D}{LENI_D}$$

Con
$LENI_{LC}$ = valore di LENI relativo al singolo ambiente calcolato con LENICALC v2.0
$LENI_D$ = valore di LENI relativo al singolo ambiente calcolato con DIVA-for-Ryno

I risultati ottenuti sono riportati nelle tabella 14.

Tabella 14 – Differenze percentuali tra LENICALC V2.0 e DIVA-for-Rhino relative al valore di LENI per gli ambienti dell'edificio scolastico.

LOCALITA'		SCENARIO			TIPOLOGIA DI AMBIENTE											ORIENTAMENTO		PIANO			DIFFERENZA
TORINO	PALERMO	SCENARIO 0	SCENARIO 2	SCENARIO 3	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	ΔLENI [%]
																					-2.65
																					8.28
																					-5.16
																					6.89
																					-32.18
																					-26.63
																					-19.27
																					-33.73
																					-28.13
																					-18.78
																					-38.13
																					-31.40
																					-17.11
																					-27.60
																					-46.98
																					-43.75
																					-43.34
																					-42.58
																					-55.10
																					-53.11
																					-52.72
																					-49.14
																					-41.41
																					-41.41
																					-41.41
																					-7.28
																					12.80
																					-15.12
																					3.18
																					-45.02
																					-36.38
																					-27.00
																					-29.49
																					-14.22
																					6.37
																					-51.95
																					-40.80
																					-21.65
																					-22.12
																					7.52
																					-52.12
																					-50.58
																					-49.06
																					-55.11
																					-53.11
																					-52.71
																					22.37
																					-41.41
																					-41.41
																					-41.41
																					-9.91
																					5.81
																					-19.27
																					-1.91
																					-48.86
																					-40.84
																					-32.67
																					-27.90
																					-21.92
																					-3.16
																					-56.96
																					-46.79
																					-28.32
																					-21.38
																					-0.63
																					-57.72
																					-52.71
																					-51.15
																					-55.11
																					-53.11
																					-52.71
																					23.82
																					-41.41
																					-41.41
																					-41.41

LOCALITA'		SCENARIO			TIPOLOGIA DI AMBIENTE										ORIENTAMENTO		PIANO			DIFFERENZA
TORINO	PALERMO	SCENARIO 0	SCENARIO 2	SCENARIO 3	AULA	LAB. TIPO I	LAB. TIPO II	UFFICIO	UFFICIO OPENSPACE	SALA DOCENTI	ARCHIVIO	BAGNI	SCALE	ATRIO	CORRIDOI	NORD	SUD	TERRA	PRIMO	SECONDO	ΔLENI [%]
																					-5.90
																					5.10
																					-0.24
																					11.99
																					-30.03
																					-23.06
																					-17.92
																					-35.61
																					-30.13
																					-22.25
																					-34.18
																					-28.37
																					-17.89
																					-28.64
																					-48.07
																					-42.51
																					-42.09
																					-41.33
																					-52.77
																					-48.91
																					-49.13
																					-44.85
																					-41.41
																					-41.41
																					-41.41
																					-14.06
																					4.47
																					-6.36
																					9.33
																					-53.16
																					-32.51
																					-23.31
																					-36.58
																					-23.57
																					-7.74
																					-46.73
																					-36.89
																					-25.15
																					-27.49
																					-8.69
																					-51.74
																					-49.38
																					-47.87
																					-50.75
																					-48.64
																					-47.56
																					5.39
																					-41.41
																					-41.41
																					-41.41
																					-14.01
																					2.11
																					-11.06
																					5.34
																					-50.55
																					-36.35
																					-29.08
																					-30.36
																					-27.18
																					-18.57
																					-51.17
																					-42.16
																					-28.72
																					-22.88
																					-13.22
																					-56.78
																					-51.49
																					-49.91
																					-50.75
																					-48.64
																					-47.56
																					12.51
																					-41.41
																					-41.41
																					-41.41

Analizzando in dettaglio i dati di LENI riportati in figura 13 si evidenzia una discreta correlazione tra i valori ottenuti con LENICALC v2.0 e con DIVA-for-Rhino. Il coefficiente di correlazione R^2 risulta essere pari a 0.78. Il grafico in figura 14 mostra le differenze relative tra $LENI_{LC}$ e $LENI_D$ per tutti gli ambienti analizzati (25 ambienti, riportati in ascissa) e per i tre scenari impiantistici. Non essendo state rilevate differenze significative tra i risultati per le due località analizzate viene riportata la media dei dati calcolati per Torino e Palermo. Nel grafico, gli ambienti da 1 a 4 corrispondono alle aule, da 5 a 10 ai laboratori, da 11 a 14 agli uffici, l'ambiente 15 è l'archivio, gli ambienti da 16 a 18 sono i bagni, da 19 a 21 le scale, l'ambiente 22 è l'atrio, quelli da 23 a 25 i corridoi. Sul grafico, inoltre, è riportata una linea rossa orizzontale corrispondente al valore medio della differenza relativa calcolata sull'intero campione, che risulta essere pari a -30.2%. In generale si evidenzia come, salvo rari casi (due aule, la sala docenti e l'archivio nello scenario 3 e l'atrio negli scenari 2 e 3) il valore dell'indice di fabbisogno energetico per l'illuminazione calcolato con LENICALC v2.0 risulti inferiore a quello stimato con DIVA-for-Rhino.

Dall'analisi dei dati si evidenzia inoltre come la differenza relativa tra i due software si incrementi all'aumentare del fattore di assenza (F_A), parametro presente nel metodo di calcolo semplificato per tener conto della potenziale assenza di utenti negli ambienti durante le ore di funzionamento degli edifici (F_A=0 corrisponde ad una presenza costante, mentre al crescere del valore si presuppone una maggior assenza e quindi, concettualmente, un minor consumo energetico dell'impianto di illuminazione). Questo aspetto non viene considerato nel processo di calcolo di DIVA-for-Rhino, che sostanzialmente considera un fattore di assenza comune a tutti gli ambienti e pari a 0. Con questo software per ogni ambiente è necessario definire un profilo di occupazione, che normalmente corrisponde all'orario di utilizzo dell'edificio e che viene considerato nel suo insieme sia per stimare la disponibilità di luce naturale che il fabbisogno energetico di illuminazione.

Per gli ambienti dell'edificio scolastico i fattori di assenza considerati in LENICALC sono:

- F_A = 0.25 per le aule
- F_A = 0.3 per laboratori e ufficio open-space
- F_A = 0.4 per uffici e sala docenti
- F_A = 0.6 per scale, spazi distributivi, archivio e bagni.

Questa distinzione è coincidente con le diverse fasce di variazione percentuale tra $LENI_{LC}$ e $LENI_D$ individuabili nel grafico di figura 14. Per un fattore di assenza minore (es. le aule, corrispondenti nel grafico agli ambienti da 1 a 4) si riducono le differenze tra le due stime, mentre queste aumentano all'aumentare del fattore di assenza (es. bagni e spazi distributivi, corrispondenti nel grafico agli ambienti da 16 a 25).

Le differenze inoltre si riducono, per ogni tipologia di ambiente, all'aumentare del piano, ovvero all'aumentare della disponibilità di luce naturale, che DIVA sovrastima rispetto a LENICALC. In pratica il consumo di energia elettrica viene sovrastimato da DIVA rispetto a LENICALC per la quota che compete all'occupazione degli ambienti, mente viene sovrastimato da LENICALC rispetto a DIVA per la quota che compete alla disponibilità di luce naturale.

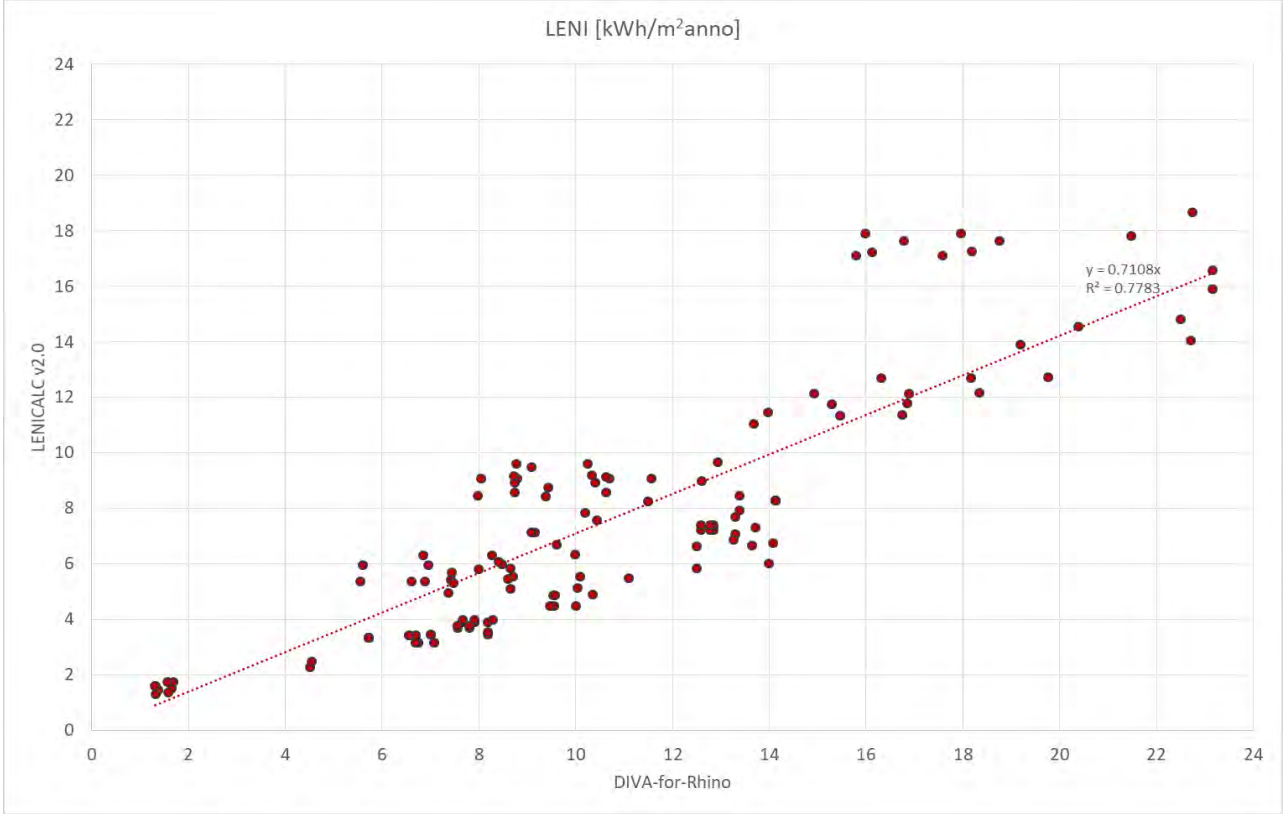


Figura 13 – Variazione dei valori di LENI calcolati con DIVA-for-Rhino e LENICALC

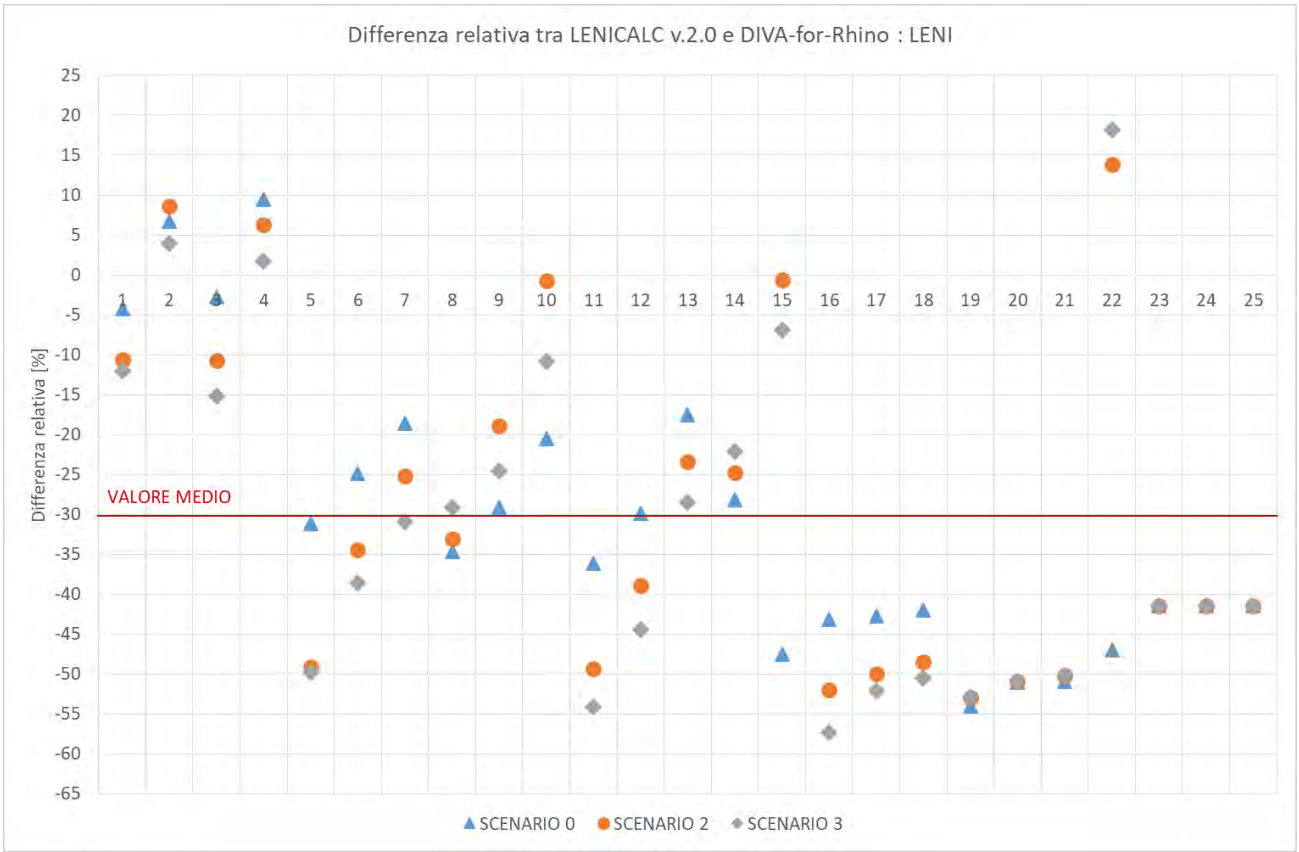


Figura 14 – Differenze relative dei valori di LENI calcolati con LENICALC v2.0 e con DIVA-for-Rhino

5 Risultati relativi alla determinazione di valori di fabbisogno energetico di riferimento (valori benchmark)

Nella definizione dei valori di riferimento di LENI per l'edilizia scolastica italiana sono state variate diverse caratteristiche dell'edificio, del contesto e del sistema di illuminazione artificiale. Le differenti configurazioni di variabili (2 località, 3 densità urbane, 2 orientamenti e 4 scenari di illuminazione) hanno condotto alla definizione di 48 configurazioni di edificio, che, considerando i diversi ambienti nell'edifico, corrisponde ad un database complessivo di 1200 casi. La sintesi delle variabili considerate è riportata in tabella 15.

Tabella 15 - Variabili considerate per la definizione dei valori di riferimento del LENI relativi all'edificio scolastico.

POSIZIONE E ORIENTAMENTO DELL'EDIFICIO				
Località	Torino Lat 45°; H_{dir}/H_{glob} 0.43		Palermo Lat 38°; H_{dir}/H_{glob} 0.55	
Densità Urbana	Bassa – angoli di ostruzione: 5° PT; 0° P1; 0° P2	Media – angoli di ostruzione: 22,8° PT; 14,3° P1; 5° P2	Alta – angoli di ostruzione: 40° PT; 26,9° P1; 10° P2	
Orientamento	Nord - Sud		Est - Ovest	
SCENARI DI ILLUMINAZIONE				
	Scenario 0	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Caratteristiche apparecchi	Sorgenti FLUO Potenza apparecchio 86,1W (ogni punto luce) 21,6W (bagni)	Sorgenti LED Potenza apparecchio 61,0W (ogni punto luce) 15,0W (bagni) 22,0W (archivio)	Sorgenti LED Potenza apparecchio 61,0W (ogni punto luce) 15,0W (bagni) 22,0W (archivio)	Sorgenti LED Potenza apparecchio 61,0W (ogni punto luce) 15,0W (bagni) 22,0W (archivio)
- Controllo occupazione	Manual ON/OFF (in ogni locale)	Manual ON/OFF (in ogni locale)	Manual ON/Auto OFF (aule, lab., uffici) Auto ON/OFF (bagni) Manual ON/OFF (spazi di distribuzione)	Manual ON/Auto OFF (aule, lab., uffici) Auto ON/OFF (bagni) Manual ON/OFF (spazi di distribuzione)
- Controllo luce naturale	Manuale (in ogni locale)	Manuale (in ogni locale)	Auto dimmed con consumi di stand-by (aule, lab., uffici) Manual ON/OFF (bagni e spazi di distribuzione)	Auto dimmed senza consumi di stand-by (aule, lab., uffici) Manual ON/OFF (bagni e spazi di distribuzione)

Questa fase del lavoro è stata finalizzata a creare un database di dati utili a definire valori di riferimento non solo per l'edificio scolastico "tipo" italiano, ma anche ad individuare i differenti consumi delle tipologie di locali presenti nell'edificio ed a valutare l'effetto che le diverse configurazioni (posizione geografica, densità urbana e orientamento) producono sul valore di LENI di edificio.

La Figura 15 riassume i valori di LENI delle 48 configurazioni individuate per l'edificio scolastico. L'analisi evidenzia come il passaggio dagli impianti fluorescenti tradizionali (scenario 0) a quelli LED (scenario 1) comporti una sensibile diminuzione dei consumi, dovuti esclusivamente alla maggiore efficienza luminosa della tecnologia LED. L'introduzione di sistemi di controllo relativi all'occupazione e alla luce naturale (scenario 2) porta ad un ulteriore abbassamento del consumo di energia elettrica per l'illuminazione. Il passaggio ad un sistema di controllo della luce naturale senza consumi di stand-by (scenario 3), invece, non ha effetti di particolare rilievo sulla riduzione complessiva dei consumi.
Indipendentemente dallo scenario di illuminazione, gli orientamenti Sud-Nord risultano avere consumi leggermente inferiori rispetto agli orientamenti Est-Ovest in relazione alla diversa disponibilità di luce naturale ed all'utilizzo della schermatura per il controllo dell'abbagliamento.

Gli effetti delle differenti densità urbane non risultano essere significativi sul LENI dell'edificio. Il motivo di tale risultato è riconducibile alla disponibilità di luce naturale. Le finestre dei locali dell'edificio scolastico sono dimensionate per garantire un Fattore medio di Luce Diurna maggiore di 3% (in conformità con normativa UNI 10840:2007 [21]). Le finestre dell'edificio scolastico di riferimento, pertanto, sono molto estese in larghezza (Window-to-Wall Ratio, WWR di 0,46 per la maggior parte dei locali). Questa caratteristica comporta un elevato apporto di luce naturale all'interno dei locali, indipendentemente dalle ostruzioni frontali. Pertanto, la riduzione del fattore di luce diurna (D) per effetto delle diverse ostruzioni relative alle densità è minima e comunque non sufficiente affinché cambi la classificazione della disponibilità di luce naturale D_{class}.
Infine, si rileva un leggero aumento del LENI nei casi di Palermo rispetto a Torino. Il motivo di questa differenza è riconducibile ai differenti tempi in cui le schermature sono attivate. All'aumentare del rapporto H_{dir}/H_{glob} (Torino: 0,43; Palermo: 0,55) aumenta la percentuale di tempo in cui le schermature sono utilizzate. Di conseguenza il fattore di disponibilità di luce naturale ($F_{D,S}$) diminuisce, portando ad una riduzione del fattore F_D e ad un conseguente incremento del LENI.
La Tabella 16 riassume i valori di LENI calcolati per le 48 configurazioni dell'edificio scolastico.

Figura 15 – Variazioni del valore di LENI dell'edificio scolastico in base agli scenari analizzati.

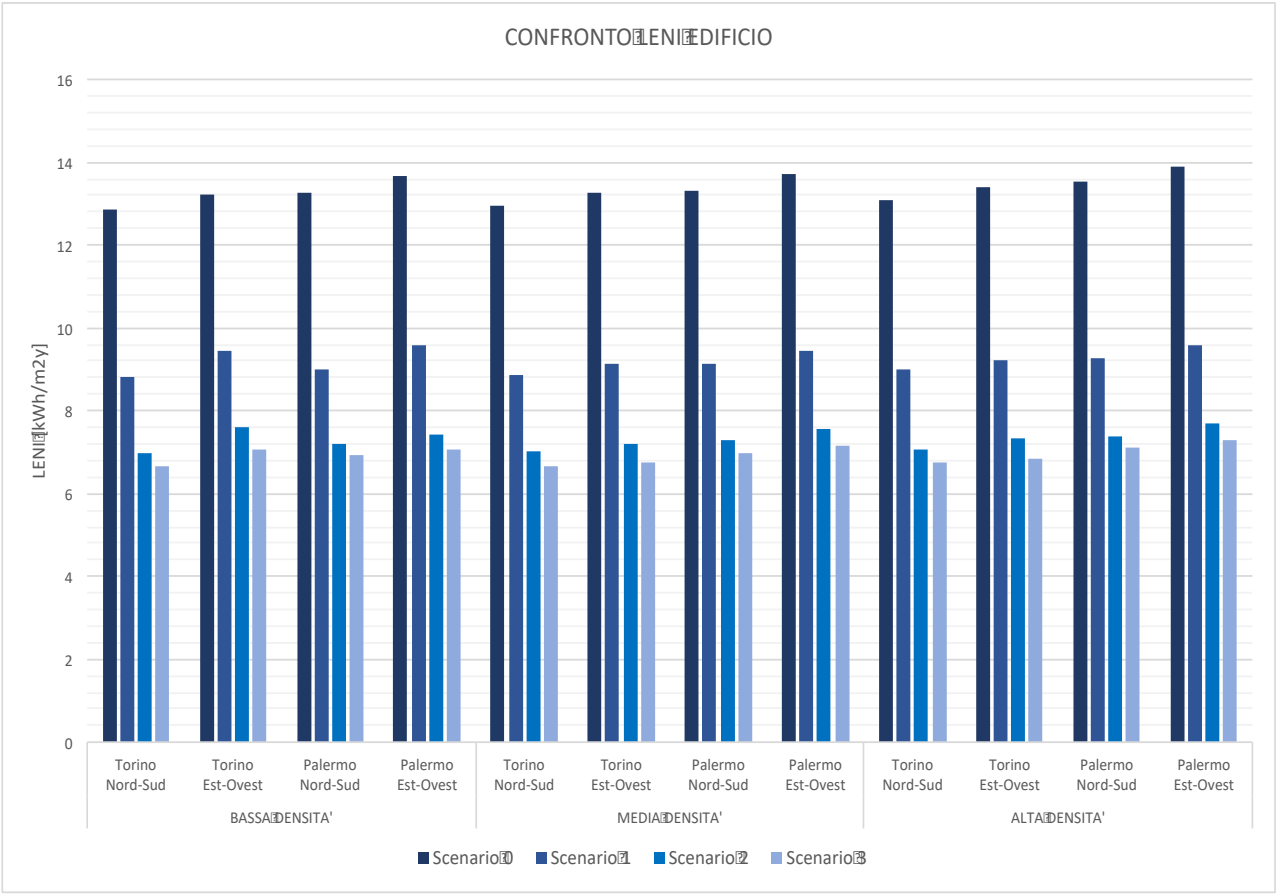


Tabella 16 – Valori di LENI delle 48 configurazioni dell'edificio scolastico analizzati.

LENI [kWh/m²anno]

	BASSA DENSITA'				MEDIA DENSITA'				ALTA DENSITA'			
	Tor N-S	Tor E-O	Pal N-S	Pal E-O	Tor N-S	Tor E-O	Pal N-S	Pal E-O	Tor N-S	Tor E-O	Pal N-S	Pal E-O
SC 0	12,87	13,20	13,27	13,68	12,93	13,25	13,33	13,73	13,09	13,42	13,55	13,88
SC 1	8,81	9,46	8,99	9,56	8,85	9,11	9,15	9,45	8,99	9,23	9,26	9,57
SC 2	6,96	7,58	7,20	7,41	7,00	7,22	7,27	7,57	7,08	7,34	7,37	7,68
SC 3	6,64	7,08	6,94	7,06	6,65	6,75	6,96	7,16	6,74	6,86	7,09	7,27

I fabbisogni di energia elettrica per l'illuminazione dell'edificio scolastico sono stati calcolati sommando i fabbisogni parziali dei diversi locali di cui è composto l'edificio. I locali sono stati suddivisi in tipologie (aule, laboratori, uffici, corridoi, scale e bagni), di ogni tipologia sono stati individuati i fabbisogni e i LENI (Tabella 17, quindi il loro impatto sul LENI totale di edifico (Figura 16).
Si nota, per differenti tipologie di locali, un andamento dei valori di LENI diverso rispetto al valore complessivo dell'edificio. In particolare le aule, pur occupando circa il 28% della superficie dell'interno edificio, contribuiscono al LENI dell'edificio per il 40%, i corridoi a fronte del 20% di superficie hanno un impatto del 10% sul LENI. Questo andamento è dovuto, oltre che alle caratteristiche dell'impianto di illuminazione, ai livelli di illuminamento target (500 lux per le aule; 100 lux per i corridoi) e al fattore di assenza (F_A= 0,25 per le aule; F_A = 0,60 per i corridoi) (da norma UNI EN 15193-1, allegato E [3]).

Tabella 17 – Energia totale e LENI medi per tipologia di locali e scenari

ENERGIA TOTALE [kWh]

	Aule	Laboratori	Uffici	Corridoi	Scale	Bagni	Edificio
SC 0	17,107	12,703	4,876	5,287	1,050	2,211	**43,608**
SC 1	11,972	9,359	3,258	2,142	0,796	1,363	**28,963**
SC 2	9,066	6,624	2,374	2,142	0,796	1,207	**22,273**
SC 3	8,479	6,078	2,210	2,142	0,796	1,122	**21,120**

LENI [kWh/m²y]

	Aule	Laboratori	Uffici	Corridoi	Scale	Bagni	Edificio
SC 0	18,48	13,49	14,62	9,27	4,43	9,44	**13,35**
SC 1	13,29	9,98	10,21	4,35	3,46	5,95	**9,20**
SC 2	10,27	7,31	7,75	4,35	3,46	5,43	**7,31**
SC 3	9,79	6,83	7,23	4,35	3,46	5,29	**6,93**

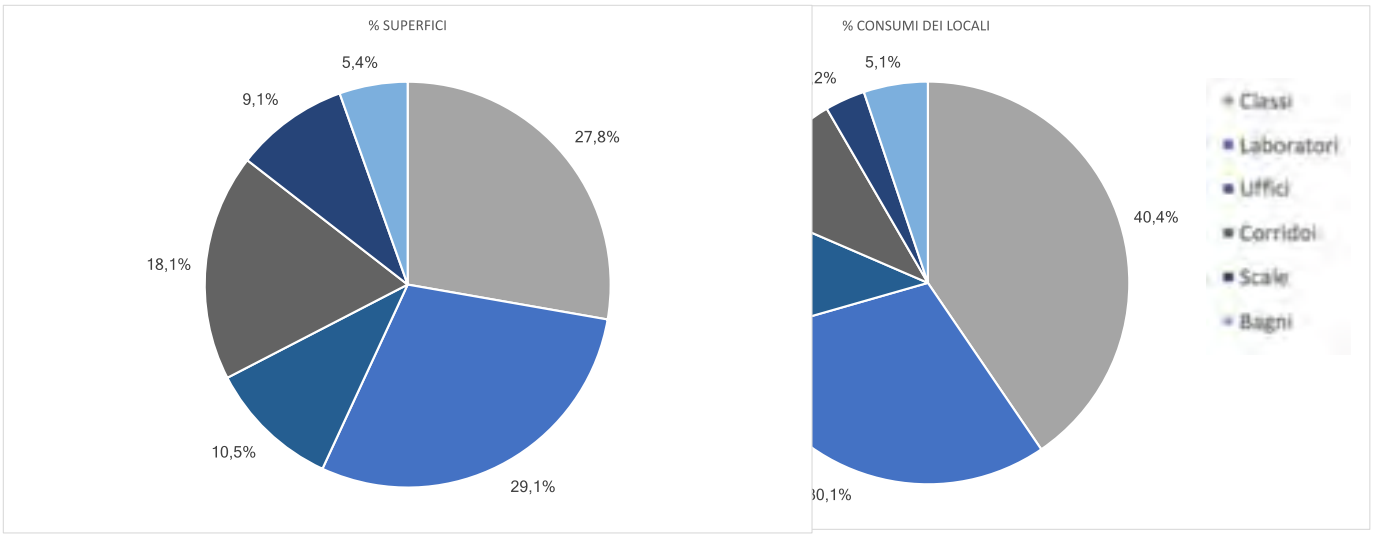


Figura 16 – Superfici occupata rispetto all'area totale dell'edificio e contributo sul consumo totale delle tipologie di locali

La Figura 17 mostra i contributi delle tipologie di locali sull'indice di fabbisogno medio degli edifici nei differenti scenari.

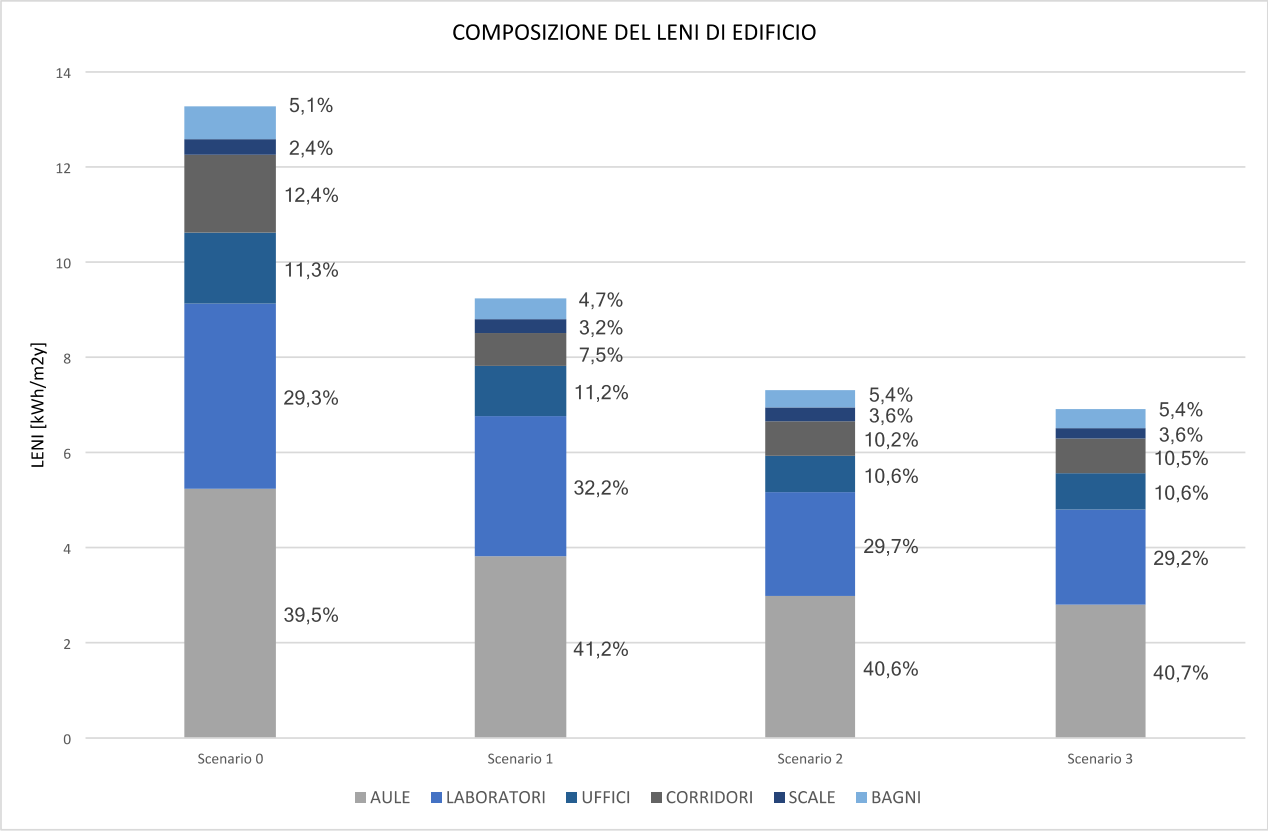


Figura 17 - Contributi delle tipologie di locali sul consumo totale medio degli edifici nei differenti scenari.

La Figura 18 mostra la variazione del LENI dei locali che compongono l'edificio scolastico al variare dello scenario impiantistico. Si nota che la variazione dei consumi non ha un andamento costante per le diverse tipologie di ambienti. Questo dipende dalla scelta di differenti sistemi di controllo negli scenari e dalle differenti percentuali di area daylit (A_D) che caratterizzano i locali. Mentre le aule, i laboratori e gli uffici (locali con identici sistemi di controllo e A_D) mostrano una variazione di LENI costante tra i quattro scenari, risultano esserci sostanziali differenze nelle altre tipologie di locali. I corridoi, ambienti senza aperture e quindi

illuminati solo artificialmente) mostrano una sensibile diminuzione dei consumi per il solo effetto del passaggio dagli apparecchi fluorescenti a quelli LED. Nelle scale, ambienti con 100% di A_D e bassi livelli di illuminamento richiesti, l'impianto di illuminazione artificiale resta spento per la maggior parte del tempo e i consumi per tutti gli scenari risultano ridotti, pur mantenendo un'uguale differenza percentuale tra scenario 0 e scenario 1. Nei bagni, l'introduzione di sistemi di controllo sull'occupazione (auto ON/auto OFF) comporta comunque una riduzione dei consumi nel passaggio dallo scenario 1 a 2 e 3.

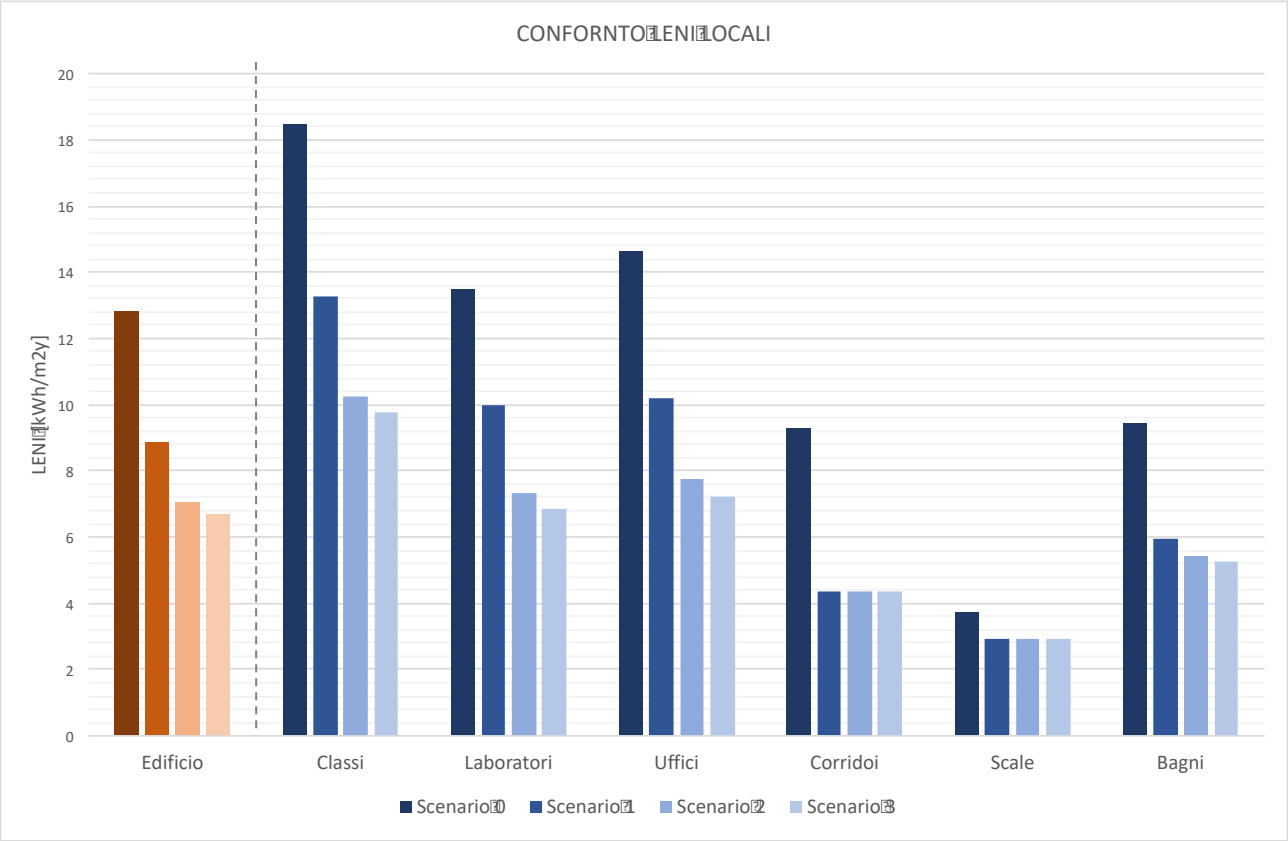


Figura 18 - Variazione del LENI delle tipologie di locali che compongono l'edificio scolastico

La Tabella 18 indica i valori di benchmark di LENI proposti per l'edificio scolastico "tipo" italiano sulla base dei risultati ottenuti in questo studio. I valori sono differenziati per tipologia di impianto, e per tipologia di ambiente.

Tabella 18 – Valori di benchmark del LENI

BENCHMARK LENI [kWh/m²anno]

	Aule	Laboratori	Uffici	Corridoi	Scale	Bagni	Edificio
Impianti tradizionali	18,00	13,00	15,00	10,00	4,00	13,00	**13,00**
Impianti LED	13,00	10,00	10,00	4,00	4,00	8,00	**9,00**
Impianti LED Con sistemi di controllo automatici (luce diurna e occupazione)	10,00	7,00	8,00	4,00	4,00	8,00	**7,00**

6 Conclusioni

Questa sezione sintetizza i risultati complessivi del lavoro e riporta eventuali raccomandazioni per possibili ulteriori sviluppi della ricerca.

La ricerca del presente report è stata incentrata su due parti: nella prima parte si sono voluti confrontare i risultati relativi alla stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione degli edifici ottenuti attraverso due software di calcolo, LENICALC V2.0 e DIVA-for-Rhino; nella seconda parte si è invece proceduto ad utilizzare LENICALC v2.0 per determinare dei valori di benchmark per i consumi dell'illuminazione per un edificio scolastico di riferimento, in relazione a diversi scenari di sistemi di illuminazione e di controllo.

In **riferimento al confronto fra i due software** LENICALC v2.0 e DIVA-for-Rhino, come commento generale si può osservare come il metodo analitico implementato in LENICALC presenti un maggior dettaglio di calcolo in relazione al calcolo del fabbisogno di energia per illuminazione (attraverso un'ampia gamma di sistemi di controllo dell'illuminazione) e invece un minor livello di dettaglio in relazione al calcolo della disponibilità di luce naturale (daylight supply factor); al contrario, DIVA-for-Rhino è stato sviluppato con elevata accuratezza per la simulazione della disponibilità di luce naturale in uno spazio interno (in termini sia di fattore di luce diurna, sia di metriche climatiche) attraverso l'algoritmo di calcolo di Radiance, mentre un minor livello di dettaglio è disponibile in relazione al calcolo del fabbisogno di energia per illuminazione.

I principali risultati di questa parte della ricerca possono essere sintetizzati nei seguenti punti:

- per quanto riguarda il calcolo della disponibilità di luce naturale in ambiente, si è osservata una generale sottostima dei risultati di LENICALC v2.0 rispetto agli omologhi output di DIVA-for-Rhino. In maggior dettaglio:
  - si è osservata una buona corrispondenza fra i valori del fattore di luce diurna calcolati coi due software (R^2 = 0.96), anche in relazione al minor numero di variabili che influenzano questa grandezza; si è evidenziata una miglior correlazione per bassi valori di fattore di luce diurna, mentre la differenza tra i risultati dei due software si incrementa, seppur con qualche eccezione, al crescere di DF
  - si è osservata una corrispondenza meno robusta nel confronto fra il Fattore di disponibilità di luce naturale e la continuous Daylight Autonomy, con un comunque buon coefficiente di correlazione (R^2>0.8). il maggior scostamento fra i risultati ottenuti con i due metodi è dovuto al fatto che queste grandezze, a differenza del fattore di luce diurna, tengono in considerazione varabili geografiche (in termini di latitudine e clima), geometriche (orientamento) e di utilizzo di sistemi di schermatura mobili. In relazione all'impatto del clima, i risultati più vicini si sono registrati per la città di Londra, mentre le differenze sono risultate progressivamente crescenti per Torino e ancor più per Palermo, vale a dire la città caratterizzata da una maggior presenza di radiazione solare diretta e conseguentemente un maggior utilizzo del sistema di schermatura adottato (infatti, i minori scostamenti fra i risultati sono stati osservati per l'orientamento nord)
- per quanto riguarda il calcolo del fabbisogno di energia per illuminazione, In generale, salvo rari casi, il valore dell'indice di fabbisogno energetico per l'illuminazione calcolato con LENICALC v2.0 è risultato inferiore a quello stimato con DIVA-for-Rhino. In maggior dettaglio:
  - si è potuta osservare una discreta correlazione tra i valori ottenuti con LENICALC v2.0 e con DIVA-for-Rhino, con un coefficiente di correlazione R^2 = 0.78. In termini di valori LENI, non sono state rilevate differenze significative tra i risultati per due località italiane analizzate (Torino e Palermo)
  - la differenza relativa tra i due software si incrementa all'aumentare del fattore di assenza (F_A): questo parametro viene considerato nel metodo di calcolo semplificato della norma per tener conto della potenziale assenza di utenti negli ambienti durante le ore di funzionamento degli edifici (ad una maggior assenza corrisponde, concettualmente, un minor consumo energetico dell'impianto di

illuminazione), mentre non è implementato nel processo di calcolo di DIVA-for-Rhino, che sostanzialmente considera un fattore di assenza comune a tutti gli ambienti e pari a 0. Con DIVA-for-Rhino è necessario definire per ogni ambiente un profilo di occupazione, che normalmente corrisponde all'orario di utilizzo dell'edificio e che viene considerato nel suo insieme sia per stimare la disponibilità di luce naturale che il fabbisogno energetico di illuminazione

- le differenze si riducono, per ogni tipologia di ambiente, all'aumentare del piano, ovvero all'aumentare della disponibilità di luce naturale, che DIVA sovrastima rispetto a LENICALC
- il consumo di energia elettrica viene sovrastimato da DIVA rispetto a LENICALC per la quota che compete all'occupazione degli ambienti, mente viene sovrastimato da LENICALC rispetto a DIVA per la quota che compete alla disponibilità di luce naturale.

Le differenze nella stima dei parametri sia di luce naturale che di fabbisogno energetico ottenute con i due software sono dovute al diverso grado di accuratezza delle procedure di calcolo e alle differenze che, pur analizzando uno stesso ambiente, si introducono nel definire i dati di input per i due software. Modi diversi di definire lo stesso input possono evidentemente portare ad un diverso dato nell'ambito sia del calcolo della luce naturale che del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione (ad esempio il fattore 'clima' viene definito in LENICALC attraverso un unico valore di sintesi - Hdir/Hglob, mentre in DIVA viene utilizzato un file climatico specifico del luogo, con dati orari di radiazione diretta, diffusa e globale). Diverso è anche l'algoritmo che controlla il sistema di schermatura mobile implementato nei due software e la modalità per considerare l'influenza dei sistemi di controllo dell'illuminazione artificiale.

In **riferimento ai valori di benchmark calcolati con LENICALC v2.0**, i valori LENI sono stati calcolati per l'edificio scolastico di riferimento, in relazione a 4 diversi scenari impiantistici relativi agli apparecchi di illuminazione (a fluorescenza e a LED, con diversi sistemi di controllo). Nell'intento di rendere l'edificio rappresentativo dell'edilizia scolastica italiana, si sono assunte 2 località, 3 densità urbane e 2 diversi orientamenti. In dettaglio, i risultati possono essere riassunti come segue:

- in relazione ai <u>valori LENI dell'intero edificio</u>:
  - il passaggio dagli impianti fluorescenti tradizionali (scenario 0) a quelli LED (scenario 1) comporta una sensibile diminuzione dei consumi, dovuta esclusivamente alla maggiore efficienza luminosa della tecnologia LED. L'introduzione di sistemi di controllo relativi all'occupazione e alla luce naturale (scenario 2) porta ad un ulteriore abbassamento del consumo di energia elettrica per l'illuminazione. Il passaggio ad un sistema di controllo della luce naturale senza consumi di stand-by (scenario 3), invece, non ha effetti di particolare rilievo sulla riduzione complessiva dei consumi
  - si è osservato un leggero aumento del LENI nei casi di Palermo rispetto a Torino
  - gli orientamenti Sud-Nord sono risultati avere consumi leggermente inferiori rispetto agli orientamenti Est-Ovest
  - le diverse densità urbane non sono risultate avere un impatto significativo sui valori LENI di edificio
- in relazione ai <u>valori LENI per le diverse tipologie di ambienti</u>, si è osservato come le aule, pur occupando circa il 28% della superficie dell'interno edificio, contribuiscono al LENI dell'edificio per il 40%, i corridoi a fronte del 20% di superficie hanno un impatto del 10% sul LENI. Questo andamento è dovuto, oltre che alle caratteristiche dell'impianto di illuminazione, ai livelli di illuminamento target (500 lux per le aule; 100 lux per i corridoi) e al fattore di assenza (F_A= 0,25 per le aule; F_A = 0,60 per i corridoi).

Sulla base dei risultati ottenuti nel presente studio, emergono alcuni ambiti per i quali risulterebbe opportuno un approfondimento della ricerca:

- studio delle procedure e degli algoritmi per la simulazione dei sistemi di controllo, sia delle schermature solari, che influenzano la disponibilità della luce naturale, sia degli impianti di illuminazione artificiale.

Approcci diversi al calcolo del comportamento di questi componenti (schermature mobili, controlli in base all'occupazione, alla presenza di fotosensori, etc.) per diversi software o metodi di calcolo semplificato, si è visto influenzano in modo rilevante la stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione. A parità di scelta del sistema di controllo il progettista ad oggi rischia di ottenere risultati significativamente diversi. Analogamente un approfondimento sarebbe necessario per definire l'impatto del comportamento dell'utente anche in presenza di sistemi di controllo manuali;

- ampliamento del database di valori di benchmark relativi all'indice di prestazione energetica per l'illuminazione (LENI) degli edifici pubblici italiani. Questa approfondimento di ricerca risulta essenziale per fornire ai progettisti valori limite coerenti con le caratteristiche climatiche, architettoniche ed impiantistiche del patrimonio edilizio italiano.

7 Riferimenti bibliografici

1. CRESME, "Miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici pubblici – volume 1: lo studio", preparato da CRISME Consulting nell'ambito del servizio "Analisi e confronto tra le procedure di affidamento più innovative, anche a livello internazionale, di serivzi finalizzati al miglioramento dell'efficienza energetica per alcune tipologie di edifici", svolto per l'Autorità di Gestione del Programma Operativo Interregionale Energie Rinnovabili e Risparmio Energetico FESR 2007-2013, marzo 2011.
2. ENEA, "Ricerca sistema elettrico – Edifici tipo, indici di benchmark di consumi per tipologie di edificio, ad uso scolastico (medie superiori e istituti tecnici), applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani", a cura di S.P. Corgnati, E. Fabrizio, F. Ariaudo, L. Rollino, Report RSE/2010/190, 2010.
3. EN 15193-1:2017, "Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting – Part 1: Specifications, Module M9", Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2017.
4. C. Aghemo, A. Pellegrino, V.R.M. Lo Verso, "Studio preliminare e identificazione di edifici tipo per la validazione del metodo di calcolo del LENI", Report RdS/PAR2015/005, ENEA, 2016.
5. A. Pellegrino, V.R.M. Lo Verso, A. Paragamyan, C. Aghemo, "Verifica e validazione del software LENICALC V1 e applicazione ad edifici tipo", Report RdS/PAR2016/015, ENEA, 2017.
6. Illuminating Engineering Society of North America (2000), "The IESNA Lighting Handbook", 9th edition, New York, pp. 8-11 - 8-14
7. Sito Web Dialux: www.dial.de/it/home/
8. Sito Web Relux: https://reluxnet.relux.com/it/
9. Sito Web Litestar: https://www.oxytech.it/software/litestar-suite.asp
10. Sito Web EnergyPlus: https://energyplus.net
11. Sito Web DIVA: http://diva4rhino.com
12. Sito Web Radiance: https://www.radiance-online.org
13. C. Aghemo, L. Blaso, S. Fumagalli, V.R.M. Lo Verso, A. Pellegrino, "The new prEN 15193-1 to calculate the energy requirements for lighting in buildings: comparison to the previous standard and sensitivity analysis on the new influencing factors", Energy Procedia 101 (2016) 232 – 239. ISSN: 1876-6102, DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.030.
14. A. Pellegrino A., V.R.M. Lo Verso, C. Aghemo, L. Blaso, S. Fumagalli, "The new EN 15193-1 to calculate the energy performance for lighting in buildings: analysis and application to reference building types", atti della International Conference "Lux Europa", Lubjana, Slovenia, 18-20 settembre 2017.
15. V.R.M. Lo Verso, A. Pellegrino, C. Aghemo, "The energy performance for lighting in buildings according to the new EN 15193-1: potential energy saving due to different photodimming controls", atti della IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe, Palermo, Italia, 12-15 giugno 2018.
16. V.R.M. Lo Verso, A. Pellegrino, A. Paragamyan, "Validation of the EN 15193:2017 calculation method to estimate the daylight supply in a building: comparison with dynamic climate-based simulations", atti della International Conference on Building Physics IBPC, Syracuse, NY, USA, 24-26 settembre 2018.

17. EN 15193-2:2017, “Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting - Part 2: Explanation and justification of EN 15193-1”, Module M9. Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2017.
18. J. Mardaljevic, “Climate-Based Daylight Analysis”, CIE (Commission Internationale de l’Eclairage) Report 3–26, 2008.
19. C.F. Reinhart, J. Mardaljevic, Z. Rogers, “Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design”, LEUKOS 3(1) (2006), pp. 7-31.
20. UNI EN 12464-1:2011, “Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni”, Ente Nazionale di Unificazione, Milano, 2011.
21. UNI 10840:2007, “Luce e illuminazione - Locali scolastici - Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale”, Ente Nazionale di Unificazione, Milano, 2007.

APPENDICE

Di seguito si riporta un breve Curriculum Scientifico degli autori del rapporto

Anna Pellegrino,
laureata in Architettura, dottore di ricerca in Energetica, e dal 2005 professore associato nel settore della Fisica Tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino.
Svolge la propria attività scientifica presso il Dipartimento di Energia "Galileo Ferraris" del Politecnico di Torino, nell'ambito del gruppo di ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment). Il settore prevalente di interesse è quello dell'illuminotecnica: dalle tecnologie per l'illuminazione e il controllo alle loro applicazioni, dal rapporto luce-confort e luce-energia a quello luce-conservazione e valorizzazione dei beni culturali, dalla progettazione alla verifica, con riferimento all'illuminazione naturale e artificiale di ambienti interni ed esterni.
Opera nell'ambito di progetti di ricerca o di contratti di consulenza con enti pubblici e privati, sia come ricercatore che nel ruolo di referente scientifico. Riveste inoltre il ruolo di tutore di dottorandi di ricerca e responsabile scientifico di assegni e borse di ricerca.
In ambito didattico è titolare di corsi di primo e secondo livello inerenti i temi dell'illuminotecnica e della Fisica Tecnica Ambientale nell'ambito dei Corsi di Laurea di Architettura e di Ingegneria Energetica del Politecnico di Torino.
Opera come revisore per progetti di Ricerca internazionali e per riviste internazionali quali Building and Environment, Energy and Buildings, Sustainable Cities and Societies, Energy Efficiencies, Lighting Research and Technology, Leukos, etc.
E' stata delegata Nazionale per la Divisione 3 della CIE (International Commission of Illumination), nonché, nell'ambito della stessa Divisione ha operato nel ruolo di Associate Director for Daylighting e membro di Comitati Tecnici.
Membro dell'Associazione Italiana di Illuminazione (AIDI) e, dal 2018, parte del Comitato esecutivo e direttivo dell'Associazione, nonché presidente della delegazione territoriale Piemonte, Liguria e Valle d'Aosta.

Valerio R. M. Lo Verso,
Laurea in Architettura con il massimo dei voti con una tesi sul comfort visivo, PhD in Fisica Tecnica con una tesi sulla simulazione della luce naturale mediante cieli artificiali. La tesi verte sul progetto, realizzazione e collaudo di un labortorio con sole e cielo artificiali per lo studio dell'illuminazione naturale su modelli in scala, unico in Italia. Nel 2006-07, ricercatore post-doc ('post-doc visiting fellow') presso il National Research Council of Canada di Ottawa (Ontario, Canada), sul tema dell'illuminazione naturale, dell'integrazione illuminazione naturale – illuminazione artificiale e del comfort visivo per la realizzazione di architetture sostenibili. Attualmente è ricercatore confermato e professore aggregato presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino nell'ambito del SSD 'Fisica Tecnica Ambientale'. Opera nel Gruppo di Ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment), costituito da 10 docenti strutturati e circa 20 giovani ricercatori, tra dottorandi, assegnisti e borsisti. Nel 2018 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale per professore universitario di II fascia.
I suoi ambiti di ricerca riguardano in particolare l'illuminazione artificiale e naturale, approfondendo con attività sperimentali in campo, mediante software e con modelli in scala gli aspetti legati al comfort visivo, alla progettazione e caratterizzazione di sistemi trasparenti e schermanti e al risparmio energetico attraverso l'incremento dell'uso di luce naturale e l'integrazione luce naturale-luce artificiale. Come principale ambito di ricerca, analizza le prestazioni visive, termiche e energetiche di componenti di facciata innovativi a comportamento responsivo (utilizzo di alghe come sistemi di schermatura, vetri termocromici, termotropici, elettrocromici), comprese le ricadute ambientali in termini di comfort e accettabilità da parte dell'utenza (attraverso misure in campo, simulazioni, questionari distribuiti in ambienti reali). Altri temi di ricerca riguardano lo studio del comfort e del corrispondente carico di lavoro mentale in ambienti caratterizzati da compiti visivi severi, quali sale di controllo o abitacoli di velivoli militari o di automobili o ancora all'interno

di strutture ospedaliere, in cui viene analizzata la risposta sia dei degenti, sia del personale medico-infermieristico.
Tiene corsi di primo, secondo e terzo livello (in italiano e in inglese), nonché lezioni a corsi professionalizzanti, sui temi della fisica dell'edificio e delle tecniche di controllo ambientale ed è supervisor di tesi di dottorato. Dal 2007 al 2013 è stato membro del Collegio Docenti del Dottorato di Ricerca in "Psicologia applicata e ergonomia" dell'Università degli Studi di Torino.
E' autore di oltre 70 pubblicazioni, di cui circa la metà su riviste internazionali indicizzate (WoS and SCOPUS). Uno di questi articoli è risultato vincitore del premio Leon Gaster come miglior articolo pubblicato nel 2010 sulla rivista internazionale 'Light Research & Technology'. E' inoltre autore del volume "Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale", 3 paragrafi per il "Manuale di progettazione illuminotecnica", (Mancosu Editore), e un paragrafo per il volume "Sustainable indoor lighting" (Springer, in inglese).
Ha fatto parte della Divisione 3 della CIE, in particolare nell'ambito dei Technical Committees TC 3-47 e TC 3-51, risultando co-autore della pubblicazione CIE TC 3-51, "CIE Standard General Sky Guide".
Membro del Comitato Scientifico di Conferenze nazionali ed internazionali, è stato membro del Comitato Organizzatore delle conferenze internazionali IBPC 2015 e SEB2016, attualmente membro del comitato scientifico dell'International conference SEB 2018. È inoltre Associate Editor della rivista Journal of Daylighting (indicizzata su Scopus).
Revisore per riviste internazionali, tra cui principali Energy and Buildings, Building and Environment, Building Simulation, Indoor and Built Environment, Lighting Research and Technology, Leukos, Energy Efficiency, Energies, Sustainability.

Argun Paragamyan
Laureato in Architettura Costruzione Città presso il Politecnico di Torino con una tesi, segnalata sul sito di ateneo, sull'illuminazione artificiale quale strumento per la riqualificazione del quartiere EUR di Roma. É attualmente titolare di un assegno di ricerca presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino.
L'ambito di ricerca dell'assegno riguarda lo studio degli effetti visivi e non visivi della luce naturale e artificiale, metriche correlate, soluzioni innovative per il controllo della luce e connessione alla rete con un approccio di analisi sperimentale e applicazione in laboratorio.
É inserito nell'albo degli studiosi e degli esperti esterni con titolarità del Politecnico di Torino nel settore disciplinare ING-IND/11 – Fisica Tecnica Ambientale. Svolge attività di tutoraggio in corsi di primo e secondo livello inerenti i temi dell'illuminotecnica
É stato titolare di due borse per attività di ricerca presso il Dipartimento Energia nell'ambito di un allestimento illuminotecnico per il Salone del Libro di Torino 2016 e nell'ambito del calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione degli edifici, attraverso il confronto tra metodi indicati nelle normative di riferimento e simulazione con software dinamici climate-based.
Ha partecipato a diversi concorsi in ambito illuminotecnico, risultando I classificato nel concorso "PoliTo in Light" e II classificato - sezione studenti nel concorso di idee internazionale "Urban Lightscape". Ha realizzato diversi studi e proposte progettuali in ambito illuminotecnico tra i quali l'illuminazione del campanile della Chiesa S. Silvestro Papa a Chiaverano (TO) e la proposta di illuminazione di una voliera monumentale all'interno della mostra "Genio e Maestria" presso la Reggia di Venaria.

Chiara Aghemo
Chiara Aghemo, architetto, è professore ordinario di Fisica Tecnica Ambientale e fa parte del gruppo di ricerca TEBE del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino.
Insegna in diversi Corsi di Studi nell'area dell'architettura e nell'ultimo ventennio la sua attività didattica e di ricerca si è fortemente indirizzata all'approfondimento delle tematiche relative alla qualità dell'ambiente luminoso, alla progettazione della luce naturale e artificiale orientata al comfort ed al risparmio energetico ed all'innovazione tecnologica delle sorgenti luminose e degli apparecchi di illuminazione.
È Autore di circa 170 pubblicazioni a carattere scientifico e didattico e responsabile scientifico di contratti di ricerca con Enti pubblici e privati inerenti in particolare il risparmio energetico connesso all'illuminazione ed ai sistemi di controllo e gestione della luce, l'illuminazione urbana e monumentale, la limitazione

dell'inquinamento luminoso, l'illuminazione per la conservazione e la valorizzazione del patrimonio culturale.
Responsabile Scientifico del LAMSA (Laboratorio di Analisi e Modellazione dei Sistemi Ambientali) del Politecnico di Torino.
Dal 1998 al 2018 è stato membro del Consiglio Direttivo dell' Associazione Italiana Di Illuminazione (AIDI) .
Ulteriori informazioni sono presenti sul sito www.tebe.polito.it.