

La luce che serve, solo quando serve

0. Abstract

L'elaborato propone possibili modifiche per il sistema di illuminazione dell'edificio universitario Bertalia, che mirano a diminuire il consumo di **energia elettrica** e l'emissione di **gas inquinanti** dovuta alla sua produzione. Si prendono in considerazione due tipologie di ambiente, ovvero un'aula di lezione e lo spazio riservato ai servizi igienici. In riferimento alla situazione attuale dell'edificio, si calcolano i valori annuali della potenza elettrica e dei costi energetici necessari per l'illuminazione dei due ambienti. Successivamente si analizza l'introduzione nell'aula di un **sistema automatico di regolazione delle sorgenti luminose**, che mantenga l'illuminamento dell'ambiente costante; questa alternativa presuppone uno sforzo economico non indifferente, tale da richiedere un lungo tempo di recupero. Per i servizi igienici si suggerisce, invece, l'inserimento di **sensori di movimento** che attivino gli apparecchi illuminanti solo quando necessario; al contrario di quella precedente, questa soluzione genera benefici economici evidenti fin dai primi tempi successivi alla sua implementazione. In conclusione, si determina l'impatto ambientale ottenuto dall'applicazione di entrambe le proposte.

1. Introduzione

Il tema ambientale trattato nell'elaborato è il risparmio di energia elettrica per l'illuminazione, che rappresenta un obiettivo importante in termini sia ambientali sia economici. Una grande parte di energia elettrica prodotta in Italia, infatti, deriva da fonti non rinnovabili ovvero combustibili fossili quali gas naturale, carbone e petrolio, tutti principalmente importati dall'estero. L'usufruire di tali combustibili causa la formazione di gas ad effetto serra e di sostanze nocive per la salute umana: due fenomeni che sicuramente andrebbero ridotti il più possibile. Dal punto di vista economico, invece, un minor consumo energetico si traduce direttamente in un risparmio di costi che è sicuramente auspicabile, soprattutto in ambito di spese pubbliche quali quelle prese in considerazione nel caso in oggetto.

I dati raccolti dall'*Osservatorio Conti Pubblici Italiani* mostrano come il consumo attuale pro capite di energia elettrica per l'illuminazione nei luoghi pubblici in Italia è di 100 KWh/anno, che corrisponde esattamente al doppio della media europea. Questo consumo è rimasto sostanzialmente stabile nell'ultimo decennio e comporta un'elevata spesa per l'illuminazione pubblica pari a circa 1,7 miliardi di euro all'anno.

Esaminando invece i consumi di energia elettrica in riferimento a un livello più locale, si nota come l'Emilia Romagna attui un consumo notevole rispetto alle altre regioni italiane. I dati mostrano come questa regione sfrutti infatti una percentuale significativa, pari al 9,2% sulla totalità della domanda nazionale.

2. Definizione del problema

In merito alla situazione attuale del sistema di illuminazione del plesso di Terracini, si nota come non sia presente nessuna forma particolare di sfruttamento dell'energia elettrica naturale e di come non ci sia una distinzione specifica tra l'illuminazione dei diversi ambienti.

Il punto di forza di tale situazione è la presenza di un margine migliorativo in quanto esistono soluzioni pratiche e facilmente reperibili sul mercato, che permettono di sfruttare al meglio la risorsa naturale della luce solare e che consentono un tipo di illuminazione specifica in relazione ai diversi ambienti. Il punto di debolezza della situazione è invece riconducibile al campo economico, in quanto è necessario un investimento iniziale da compiere per mettere in pratica tale progetto.

In seguito si analizza quantitativamente la situazione attuale dell'illuminazione interna dell'edificio considerato, prendendo in considerazione due diverse tipologie di ambienti quali una generica aula di lezione e i servizi igienici.

AS-IS aula di lezione

Il primo ambiente valutato è un'aula di medie dimensioni in cui sono presenti 48 apparecchi illuminanti identici, i quali presentano le seguenti caratteristiche:

- Tipo di apparecchio illuminante: riflettore a fascio largo;
- Tipo di sorgente luminosa: tubo led di lunghezza 120 [cm];
- Potenza nominale: 46 [W];

- Flusso luminoso: 3200 [lm];
- Efficienza luminosa: 70 [lm/W];
- Vita utile media: 20000 [h];
- Costo unitario: 9,9 €.

A partire da questi dati e stimando un utilizzo temporale medio dell'edificio preso in considerazione, si calcola la potenza elettrica complessiva necessaria per l'illuminazione annuale dell'aula, ovvero:

$potenza_{unit\ lampada} * num\ lampade * ore\ utilizzo\ annuali = potenza_{tot}$, che in termini numerici diventa $46 \frac{W}{lampada} * 48\ lampade * 9 \frac{h}{gg} * 240 \frac{gg}{anno} = 4769,28 \frac{KWh}{anno}$.

Si stima quindi il costo specifico dell'energia elettrica per KWh ricavato dai dati forniti dalla *Relazione Annuale ARERA-2019*, riportati nella tabella n. 1:

Prezzo finale dell'energia elettrica dei consumatori industriali - 2018				
Fascia di consumo MWh/anno	inferiore a 20		tra 20 e 500	
Prezzo	Netto	Lordo	Netto	Lordo
Unione europea	14,11 c€/kWh	22,91 c€/kWh	9,96 c€/kWh	17,18 c€/kWh
Italia	14,36	26,34	10,06	19,84

Tabella n. 1

È quindi possibile calcolare la spesa complessiva annuale dovuta all'illuminazione dell'aula: $energia_{tot\ annua} * costo\ specifico\ energia = costo_{tot}$, che corrisponde a

$$4769,28 \frac{KWh}{anno} * 0,1984 \frac{€}{KWh} = 946,25 \left[\frac{€}{anno} \right].$$

AS-IS servizi igienici

Si passa alla valutazione dell'altra tipologia di ambiente con dimensioni inferiori e dove sono presenti 3 apparecchi illuminanti identici, i quali presentano le seguenti caratteristiche:

- Tipo di apparecchio illuminante: lampadario a conchiglia
- Tipo di sorgente luminosa: lampada alogena lineare (7,8 x 1,2 x 1,2 [cm])
- Potenza nominale: 80 [W]
- Flusso luminoso: 1400 [lm]
- Efficienza luminosa: 17,5 [lm/W]

La potenza elettrica complessiva necessaria per l'illuminazione annuale dell'ambiente considerato risulta pari a:

$$80W * 3\ lampade * 9 \frac{h}{gg} * 240 \frac{gg}{anno} = 518,4 \left[\frac{KWh}{anno} \right].$$

La spesa complessiva annuale dovuta all'illuminazione dell'ambiente invece è:

$$518,4 \frac{KWh}{anno} * 0,1984 \frac{€}{KWh} = 102,85 \left[\frac{€}{anno} \right].$$

3. Soluzioni individuate

TO-BE aula di lezione

L'idea progettuale individuata consiste nell'inserimento di sensori che mantengono un illuminamento costante nell'aula regolando la tensione di funzionamento degli apparecchi illuminanti in funzione a quanta luce proviene dall'ambiente esterno, al fine di ottimizzare i consumi energetici.

L'aula presenta le seguenti misure: *larghezza= 9,7 [m]; lunghezza=17,2[m]; altezza=4,51[m]*.

Si suppone di garantire nell'aula un grado di illuminamento (E_0) di almeno 300 lux, come previsto dalla norma europea UNI EN 12464 riguardante i requisiti di illuminazione minima da garantire negli edifici in modo da salvaguardare la salute delle persone e la loro sicurezza.

Grazie ai dati precedentemente descritti, si calcola il flusso luminoso totale che deve essere prodotto dall'insieme di tutte le sorgenti luminose presenti nell'ambiente:

$$\phi_{tot} = 300 * 166,84 = 50052 \text{ [lm]}.$$

Il flusso appena calcolato va moltiplicato per un fattore che tiene conto sia dell'usura dell'impianto sia dei materiali dell'aula, in modo da trovarne il valore effettivamente necessario per ottenere il livello di illuminamento desiderato.

Si suppone, quindi, un fattore di manutenzione (m) pari a 0,75 che tiene conto dello sporco e dell'invecchiamento subiti dall'impianto luminoso.

Inoltre si calcola l'indice del locale, in base alla sua forma, tenendo presente una situazione di illuminazione semidiretta:

$$K = \frac{\text{larghezza} \cdot \text{profondità}}{\text{altezza} \cdot (\text{larghezza} + \text{profondità})} \quad \text{ovvero} \quad K = \frac{9,7 \cdot 17,2}{4,5 \cdot (9,7 + 17,2)} = 1,38.$$

Si prende ora in considerazione un fattore di riflessione delle pareti (r) pari a 0,7 dal momento che sono rivestite da intonaco bianco e un fattore di riflessione del soffitto (r) pari a 0,10 in quanto i pannelli sono di color marrone chiaro.

Si ottiene quindi il fattore di utilizzo delle installazioni (u) pari a 0,44 grazie a un'apposita tabella in cui lo si ricava in funzione di r, u e K.

Per concludere si calcola il flusso luminoso effettivamente necessario nell'aula:

$$\phi_{eff} = 50052 \cdot \frac{1}{0,75 \cdot 0,44} = 151672,7 [lm].$$

Per rendere maggiormente sostenibile l'illuminazione dell'aula, una possibile soluzione è l'inserimento di un sistema automatico di regolazione delle lampade, in modo tale da sfruttare la radiazione luminosa del sole entrante dalla grande superficie vetrata posizionata nella parte posteriore dell'aula stessa.

Per risolvere il problema ci si avvale della consulenza di un elettricista, che ha suggerito delle possibili pratiche impiantistiche implementabili.

A seguito di ricerche approfondite, sono stati individuati i componenti necessari con le relative spese di acquisto e di installazione per realizzare un impianto di tipo KNX/dali, rappresentante lo stato dell'arte della domotica relativamente agli impianti di illuminazione. Gli elementi sono dunque i seguenti:

- 1 gateway dali KNX 64 entrate Schneider MTN672S-0001, dal costo di 770 €;
- 3 sensori di luminosità Osram Luxeye Sense, dal costo di 114,35 €;
- 1 alimentatore Omnialed, dal costo di 120 €;
- 24 Plafoniere Stagna dali (6400 lm) dal costo di 89 €.

Le spese di installazione e dei componenti accessori si stimano pari a 800 €. Si calcola quindi un computo totale, ottenuto dalla somma dei costi elencati e risultante pari a 3940 €.

Per individuare il tempo di ritorno di tale investimento, si calcola l'impatto della modifica in termini di risparmio energetico e si stima quindi il contributo della luce solare entrante nell'aula durante le ore di utilizzo dell'edificio. Servendosi di tale contributo, grazie all'utilizzo dei sensori, è possibile fornire il flusso minimo necessario per garantire il corretto grado di illuminazione.

Per determinare il contributo della radiazione solare all'illuminamento dell'ambiente, è opportuno partire dai dati forniti dall'ente ENEA che, una volta indicate latitudine e longitudine di Bologna (tabella n.2), rappresentano l'irradiazione annuale complessiva fornita dal sole per unità di superficie, come visibile nella tabella n. 3:

Modello per calcolo della frazione della radiazione diffusa rispetto alla globale: ENEA-SOLTERM	
Latitudine	44.514012
Longitudine	11.320459
Unità di misura	$\frac{Wh}{m^2}$
Mesi considerati	Tutti

Tabella n. 2

Risultato:

Mese	Ostacolo	Rggmm su sup. orizz.	Errore
Gennaio	assente	1595.5	Wh/m2
Febbraio	assente	2465.8	Wh/m2
Marzo	assente	3763.8	Wh/m2
Aprile	assente	4871.6	Wh/m2
Maggio	assente	5896.8	Wh/m2
Giugno	assente	6435.4	Wh/m2
Luglio	assente	6464.5	Wh/m2
Agosto	assente	5401.1	Wh/m2
Settembre	assente	4228.0	Wh/m2
Ottobre	assente	2792.1	Wh/m2
Novembre	assente	1748.5	Wh/m2
Dicembre	assente	1239.0	Wh/m2

Radiazione globale annua sulla superficie orizzontale: 1429902 Wh/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni)

Tabella n. 3

Si ricava quindi l'irraggiamento solare medio, che equivale al rapporto tra la radiazione globale annua e il tempo medio di irraggiamento annuo e risulta pari a: $I = \frac{29902}{365,25 \cdot 12,1} = 323,54 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Se si considera un'efficienza luminosa solare di circa 105 lm/watt si ha quindi un illuminamento (diffuso) pari a: $E_0 = 323,54 \cdot 105 = 33971,7 \text{ [lux]}$.

Tramite la norma tecnica si effettua una valutazione della radiazione luminosa entrante, applicando la seguente formula che definisce il *fattore medio di luce diurna* $F_{mld} = \frac{\sum_i A_i \cdot \tau_i \cdot \varepsilon_i \cdot \psi_i}{S(1-r_m)} = \frac{E}{E_0}$, dove:

- E = radiazione solare interna che si vuole conoscere;
- E_0 = radiazione solare su un piano orizzontale libero;
- A_i = l'area della finestra i-esima;
- τ_i = coefficiente di trasmissione luminosa del vetro;
- r_m = coefficiente di riflessione medio nel visibile delle superfici che costituiscono l'involucro dell'ambiente considerato e che si calcola come $r_m = \frac{\sum_i S_i \cdot r_i}{\sum_i S_i}$;
- ε_i = fattore finestra, cioè il rapporto tra l'illuminamento sul baricentro della finestra e l'illuminamento su una superficie orizzontale liberamente esposta alla volta celeste (tiene conto delle ostruzioni);
- ψ_i = fattore che tiene conto dell'ombreggiamento indotto sulla finestra dall'imbotte.

Per trovare i valori corrispondenti ai fattori riportati sopra, si esegue tale procedura:

1. Si individua il coefficiente di trasmissione nella banda della radiazione del visibile per il vetro della finestra.

Sistema trasparenti	τ_v
vetro float singolo chiaro 4-6 mm	0,80-0,90
vetro float singolo assorbente	0,70-0,80
vetro singolo retinato	0,85

Il valore selezionato (τ) risulta essere quindi pari a 0.8.

2. Per ciascuna finestra che si affaccia sull'ambiente, si valuta l'area della superficie vetrata che è corrispondente a $A_i = 2,75 \cdot 9,7 = 26,7 \text{ [m}^2\text{]}$.
3. Si misura l'area delle superfici interne che delimitano l'ambiente.
 - Superficie muri di intonaco bianco $177 \text{ [m}^2\text{]}$ con fattore di riflessione $r = 0,7$.
 - Superficie soffitto in pannelli di legno chiaro di $166,84 \text{ [m}^2\text{]}$ con fattore di riflessione $r = 0,1$.

Sostituendo tali valori si ricava $r_m = \frac{177 \cdot 0,7 + 166,84 \cdot 0,1}{177 + 166,84} = 0,41$.

4. Per ogni finestra del locale si valuta il rapporto: $\frac{H-h}{L_a}$ da cui, leggendo l'ascissa in figura n. 1, si ricava il fattore finestra ε dalle ordinate; si considera $\varepsilon = 0,5$ in quanto non sono presenti ostacoli nelle vicinanze dell'edificio ($L_a = 0$).

5. Una volta calcolati i rapporti $\frac{l_a}{p}$ e $\frac{h}{p}$ si individua l'intercetta dalla figura n. 2

$$\frac{l_a}{p} = \frac{9,7}{2,2} = 4,4; \quad \frac{h}{p} = \frac{2,75}{2,2} = 1,25;$$

Dalla medesima figura si ricava un valore di $\psi_1 = 0,75$.

6. Si applica la relazione $F_{mld} = \frac{\sum_i A_i \cdot \tau_i \cdot \varepsilon_i \cdot \psi_i}{S(1-r_m)} = \frac{26,7 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,75}{343,84 \cdot (1-0,41)} = 0,039$ e si determina l'illuminamento creato dalla luce diurna $E = E_0 \cdot F_{mld} = 33971,7 \cdot 0,039 = 1325 \text{ [lux]}$.

Con il precedente risultato si ricava il flusso complessivo entrante dalla superficie vetrata:

$$\Phi_{tot \text{ fin}} = E \cdot S_{fin} = 1325 \cdot 26,7 = 35375 \text{ [lm]}.$$

Tale contributo solare deve essere sottratto al flusso complessivo dell'illuminazione artificiale:

$151672,7 - 35375 = 116297,7 \text{ [lm]}$ in modo da determinare il risparmio energetico conseguente alla modifica proposta, che risulta essere pari al 23,32% ovvero $946,25 \cdot 0,2332 = 220,67 \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$ in meno.

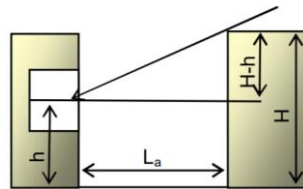
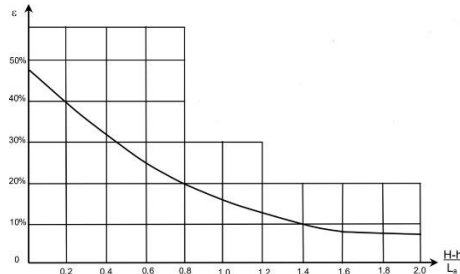
A questo punto si calcola il tempo di ritorno dell'investimento considerando di sostituire i led già presenti al termine della loro vita utile.

Al costo totale dell'investimento di 3940 €, si sottrae il costo di acquisto delle lampade attualmente utilizzate di 475,2€, ottenendo così un investimento netto di 3463,8 €. Tale investimento richiede un periodo di

recupero di 15,7 anni, molto lungo rispetto alla vita utile dell'impianto che è circa di 20 anni, perciò è necessaria un'ulteriore valutazione prima della sua effettiva realizzazione.

Si può tuttavia considerare che eseguendo modifiche in tutte le aule dell'edificio si presenterebbero:

- Sconti per grandi quantità;
- Un risparmio maggiore di energia consumata in caso di modifiche nelle aule di dimensioni minori (quella presa in considerazione presenta una grandezza media rispetto alle altre);
- La condivisione di parte dei costi considerati per le modifiche dell'aula tra più ambienti in quanto il sistema KNX copre l'interfaccia di quasi due aule.



h	Altezza finestra dal piano stradale
H	Altezza fabbricato contrapposto
L_a	Larghezza strada
ε	Fattore finestra

Figura n. 1

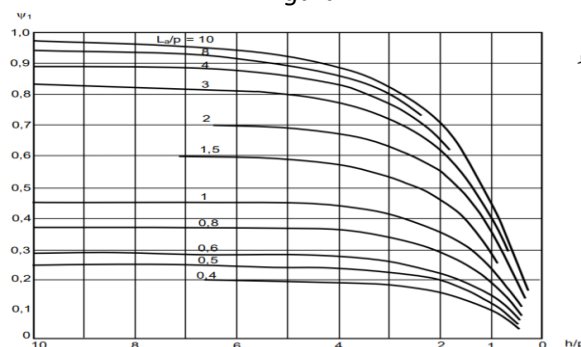


Figura n. 2

TO-BE servizi Igienici

L'idea progettuale per il secondo ambiente considerato consiste nell'inserimento di sensori di movimento che rilevano la presenza degli utenti azionando l'interruttore dell'apparecchio illuminante.

Grazie all'utilizzo di tali sensori è possibile sfruttare l'impianto solo quando necessario, riducendo così al minimo i consumi elettrici. Inoltre tale soluzione, come si può vedere in seguito, è poco onerosa e ha tempi di recupero dell'investimento trascurabili.

I componenti necessari per attuare questo intervento sono minori rispetto al caso precedente, infatti occorrono:

3 plafoniere a led

- Costo: 10.90 [€]
- Flusso luminoso: 2200 [lm]
- Potenza: 24 [W]
- Vita utile media: 20000 [h]

3 sensori di rilevamento presenza

- Costo: 7.90 [€]
- Sensibilità: 3 [lux]
- Portata max: 12 [m]
- Angolo operativo: 160 [gradi]

Il costo di installazione stimato è $10 * 3 + 20 * 3 = 90$ €.

Il costo totale dell'intervento risulta uguale a $90 + 10.90 * 3 + 7.90 * 3 = 146.4$ €.

La valutazione dell'investimento è possibile grazie al confronto della spesa media annua prima dell'intervento e quella che si avrebbe a seguito di questo.

Riconsiderando che la spesa complessiva attuale per l'illuminazione annuale dell'ambiente è pari a $102,85 \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$, si tiene presente della riduzione del tasso di utilizzo degli apparecchi illuminanti (il bagno è mediamente utilizzato per il 60% del tempo complessivo). Tale effetto comporta un impiego di energia di $24 * 3 * 0,6 * 9 * 240 = 93,312 \left[\frac{\text{KWh}}{\text{anno}} \right]$ che moltiplicato per il costo specifico dell'energia elettrica porta a una spesa di $93,312 * 0.1984 = 18,51 \left[\frac{\text{€}}{\text{anno}} \right]$.

Il recupero dell'investimento avviene in soli $\frac{146,4}{(102,85-18,51)} = 1,73$ [anni] che rispetto alla vita utile stimata dell'impianto di 15 anni rende consigliabile tale miglioramento.

4. Individuazione degli stakeholders

Gli stakeholders interessati al progetto sono sicuramente gli studenti universitari che, attraverso il regolare pagamento di tasse, contribuiscono a coprire le spese dovute al consumo di energia elettrica. Inoltre l'università ricaverebbe sicuramente benefici dal progetto, in quanto vedrebbe le sue spese diminuire. In aggiunta, il piano è di interesse della collettività stessa dal momento che la sua applicazione porterebbe a minori emissioni di CO_2 e di altri gas nocivi. Infine i fornitori, dall'altro lato, contribuiscono al progetto per pubblicizzare i loro prodotti, caratterizzati da tecnologie innovative, e per ottenere notevoli ricavi dalla loro vendita.

5. Impatti generati dal progetto

Si effettua un confronto fra l'emissione di CO_2 corrispondente allo stato attuale e quella che si avrebbe in caso di attuazione del progetto sviluppato, considerando i risultati finali ottenuti complessivamente dagli ambienti aula e servizio igienico.

In riferimento alla situazione AS-IS, si focalizza l'attenzione sull'emissione di CO_2 poiché essa risulta essere la principale responsabile di alterazione dell'ecosistema. In particolare dalla tabella n. 4 ricava la quantità di CO_2 emessa per kWh e la si moltiplica per la potenza elettrica totale necessaria per l'illuminazione annuale totale dei due ambienti. Si attua inoltre la stessa procedura con i dati della situazione TO-BE, ottenendo un'emissione totale inferiore rispetto a quella precedentemente trovata. In particolare si esegue una differenza di tali valori, ricavando in questo modo la riduzione dell'impatto di CO_2 :

$$\frac{(5287,68-3750,192)*355}{1000} = 545,8 \left[\frac{KCO_2}{anno} \right] \text{ in meno mettendo in atto il progetto.}$$

Tabella 1 – Fattori di emissione da consumo di energia elettrica nel periodo 1990-2016 (Fonte dati colonne a-d: ISPRA, 2018)

	Emissioni da produzione di energia elettrica	Produzione destinata al consumo	Energia richiesta	Perdite di rete	% Perdite di rete	Consumi netti legati a emissioni (senza import)	FE consumi elettrici senza import
	Mt CO_2 /anno	TWh	TWh	TWh	%	TWh	g CO_2 /kWh
	a	b	c	d	e=d/c	f=b*(1-e)	g=a/f*1000
2016	93	277	314	18,8	6,0%	261	355

Tabella n. 4

6. Riferimenti

- <https://osservatoriocpi.unicatt.it/cpi-archivio-studi-e-analisi-illuminazione-pubblica-spendiamo-troppo>
- <https://download.terna.it/terna/0000/0994/85.PDF>
- https://www.silamp.it/tubo-led-t8-36w-120cm-diffusore-opaco-per-plafoniere-t8-36w-120-p-24142.html?gclid=CjwKCAiArJvBRACEiwA-Wiqq2cEf9582OagIcPUG_Q2VK8StvOlG5_qAQUJB9PZ0Fc0pmL1FGH7dBoCcPUQAvD_BwE
- https://www.silamp.it/tubo-led-t8-36w-120cm-diffusore-opaco-per-plafoniere-t8-36w-120-p-24142.html?gclid=CjwKCAiArJvBRACEiwA-Wiqq2cEf9582OagIcPUG_Q2VK8StvOlG5_qAQUJB9PZ0Fc0pmL1FGH7dBoCcPUQAvD_BwE
- https://www.amazon.it/Philips-EcoHalo-Lampada-alogena-lineare/dp/B009568CJG/ref=sr_1_1?__mk_it_IT=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&keywords=philips+ecohalo+lampada+alogena+lineare&qid=1575373061&sr=8-1
- <https://www.se.com/ww/en/product/MTN6725-0001/knx-dali-gateway-reg-k-1-16%2864%29-64-ip1/>
- <http://www.solaritaly.enea.it/CalcComune/Calcola.php>
- <http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Fabio-Pero/materiali-/elementi-d/scheda-01-fmld.pdf>
- https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=2ahUKEwj64beex5nmAhVO_KQKHWeeCdcQFjAFegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ingegneriadellambiente.net%2Ffojs%2Findex.php%2Fida%2Farticle%2Fdownload%2F207%2F313%2F&usq=AOvVaw0i3X--zbTPoBbTkUDCM4oV