



Ricerca di Sistema elettrico

Criteria di normalizzazione dei KPI di riferimento e di stime di risparmi energetici conseguibili in reali condizioni d'uso per edifici scolastici esistenti

R. Armani, L. Pagliano, M. Pietrobon, S. Erba

CRITERI DI NORMALIZZAZIONE DEI KPI DI RIFERIMENTO E DI STIME DI RISPARMI ENERGETICI CONSEGUIBILI
IN REALI CONDIZIONI D'USO PER EDIFICI SCOLASTICI ESISTENTI

R. Armani, L. Pagliano, M. Pietrobon, S.Erba

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:

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Criteri di normalizzazione dei KPI di riferimento e di stime di risparmi energetici conseguibili in reali condizioni d'uso per edifici scolastici esistenti"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Politecnico di Milano: Lorenzo Pagliano

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DEFINIZIONI.....	8
3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	11
3.1 ESPLORAZIONE DI METODI SEMPLIFICATI PRESENTI IN LETTERATURA O STANDARD INTERNAZIONALI.	11
3.2 INDIVIDUAZIONE DELLE CARATTERISTICHE FISICHE INDISPENSABILI PER LO SVILUPPO DI METODI SEMPLIFICATI DI PREVISIONE DEI RISPARI.	18
3.2.1 <i>Gradi giorno</i>	19
3.3 INDICAZIONE DI UNA METODOLOGIA SEMPLIFICATA PER ANALISI QUALITATIVE DEI RISPARI ENERGETICI CONSEGUIBILI A FRONTE DI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DI UN EDIFICIO SCOLASTICO ESISTENTE.	26
3.3.1 <i>Apporti termici interni</i>	30
3.3.2 <i>Apporti solari</i>	32
3.3.3 <i>Coefficiente di dispersione dell'edificio per trasmissione e per ventilazione</i>	33
3.3.4 <i>Ventilazione meccanica forzata</i>	34
3.3.5 <i>Illuminazione artificiale</i>	35
3.4 LIMITI E POSSIBILI SVILUPPI DELLA METODOLOGIA.....	38
4 CONCLUSIONI.....	40
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	41
6 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	43
7 ALLEGATO 1: SCHEDA DI INDAGINE E DI RACCOLTA DATI PER EDIFICI SCOLASTICI.....	44

Sommario

In questo rapporto viene proposta una prima metodologia semplificata per la valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio scolastico. Il metodo proposto avrà lo scopo di caratterizzare gli edifici nel loro stato di fatto, al fine di valutare le potenzialità di risparmio energetico dovute a possibili interventi di riqualificazione energetica da attuare sull'organismo edilizio, in previsione di interventi edilizi da programmare nel prossimo futuro.

In alcuni casi, le diagnosi energetiche che applicano le procedure di calcolo normativo restituiscono indicazioni della domanda di energia consegnata poco verosimile con l'effettiva richiesta dell'edificio. Una possibile causa di questo effetto indesiderato è dovuta ad una conduzione da parte dell'occupante o del gestore dell'edificio che difficilmente è descrivibile in una procedura di calcolo normativa. L'occupante infatti, con le sue azioni e logiche di gestione dell'edificio può influenzare significativamente i profili di consumo a servizio dei diversi usi finali. Il risultato è una stima dei possibili risparmi energetici e conseguentemente una valutazione della sostenibilità economica dell'intervento che difficilmente rappresenta le reali potenzialità dell'edificio.

Tali valutazioni risultano ancora più difficili nel caso di edifici con occupazione intermittente, come una scuola.

La metodologia presentata è da intendersi come una prima proposta di analisi e calcolo della domanda di energia fornita (per ciascun vettore energetico), di un generico edificio scolastico, a supporto dello sviluppo di una piattaforma informatica finalizzata alla categorizzazione, analisi prestazionale e monitoraggio remoto dei consumi, da mettere a disposizione dei tecnici e degli amministratori locali come aiuto al processo decisionale di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio scolastico esistente.

Nel rapporto è presente una ricerca nella letteratura scientifica di metodologie analoghe in cui il numero di dati di input richiesti per la stima semplificata delle prestazioni energetiche sia ridotta.

Sulla base della fase esplorativa viene costruito e proposto un quadro metodologico per la quantificazione dei flussi energetici in ingresso al sistema edificio, limitando per quanto possibile i dati di input ed introducendo semplificazioni di calcolo con lo scopo di permettere una valutazione qualitativa degli effetti di un determinato canale di intervento di efficientamento energetico in termini di risparmio.

Il quadro metodologico proposto è pensato per utenti che abbiano a disposizione una serie di informazioni inerenti la geometria e le caratteristiche fisiche degli elementi edilizi ed impiantistici.

Attualmente il livello di preparazione richiesto ad un possibile utilizzatore della futura piattaforma elettronica è quella di un tecnico con una buona preparazione tecnico-scientifica nella valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio e del suo sistema impiantistico. Questo può risultare inizialmente come un possibile limite, ma data la complessità del problema energetico degli edifici, per una migliore affidabilità dei risultati finali, si ritiene che tale tipologia di valutazioni debbano essere in via prioritaria effettuate da personale competente. Possibili sviluppi potrebbero essere quelli di semplificare ulteriormente i dati di ingresso al metodo in modo da ampliare il bacino di utenza della futura piattaforma informatica.

Il metodo proposto non esclude altre metodologie che la letteratura scientifica propone per questo tipologia di valutazioni. Il metodo si propone come possibile alternativa costruito sulla base di poche leggi della fisica che governano lo scambio di energia termica tra lo spazio interno e l'esterno. Una particolare attenzione è stata posta nell'inserimento di logiche che considerino il più possibile il profilo di utilizzo dell'edificio e le modalità di gestione e conduzione dell'immobile da parte dell'occupante.

Il metodo non è stato testato su casi reali. Possibili sviluppi potrebbero essere l'applicazione sperimentale del quadro metodologico proposto su interventi di riqualificazione energetica di istituti scolastici di cui si dispone di dati che descrivono puntualmente l'edificio prima dell'intervento edilizio e almeno un anno, meglio due o tre, di esercizio dell'edificio a valle della riqualificazione. Le informazioni prioritarie sono le caratteristiche prestazionali degli elementi di involucro, le caratteristiche degli impianti di illuminazione, i

profili dei consumi, meglio se suddivisi per uso finale e vettore termico. Quest'ultimi possibilmente provenienti da una campagna di monitoraggio strumentale.

Questa fase di test permetterebbe di valutare l'introduzione di eventuali ulteriori semplificazioni del metodo che, allo stato attuale, non è stato possibile studiare.

1 Introduzione

Il presente rapporto ha lo scopo di definire metodi semplificati, di prima approssimazione, per la quantificazione dei risparmi di energia conseguibili a fronte di interventi di efficientamento da prevedere su edifici esistenti.

La destinazione d'uso prevalente oggetto del presente rapporto e quella degli edifici scolastici.

Il rapporto si inerisce all'interno dell'Accordo di Programma PAR "Piano Annuale di Realizzazione 2017" nell'ottica di uno sviluppo di una piattaforma informatica finalizzata alla categorizzazione, analisi prestazionale e monitoraggio remoto di edifici scolastici, da mettere a disposizione dei tecnici e degli amministratori locali come supporto al processo decisionale di intervento sul patrimonio edilizio scolastico esistente.

Non è scopo di tale rapporto proporre metodologie alternative a valutazioni come diagnosi energetiche, o certificati di prestazione energetiche che implementano al loro interno metodologie di calcolo legate agli standard nazionali vigenti. Spesso queste valutazioni restituiscono indicazioni sui risparmi di energia primaria dell'edificio che non tengono conto del reale profilo di utilizzo e gestione del fabbricato, influenzando così le valutazioni di sostenibilità e fattibilità economica degli investimenti di retrofit energetico. A volte, i risultati di tali valutazioni si pongono come barriera all'efficienza, soprattutto quando vengono valutati i tempi di ritorno degli investimenti.

Lo studio condotto è da intendersi come base nella definizione di metodi di analisi di prima approssimazione dei risparmi di energia, e quindi anche economici, di alcuni interventi di efficientamento energetico (i più ricorrenti), da attuare sugli edifici scolastici considerando, per quanto possibile, i consumi reali dell'edificio. Il fine ultimo è quello di fare stime più consone della reale risposta energetica che la costruzione ha al variare delle condizioni climatiche esterne ed in base alla conduzione che i gestori e gli occupanti hanno dei sistemi impiantistici installati al suo interno.

La modellazione fisica del comportamento prestazionale di un elemento di involucro, nonché la stima dell'efficienza energetica di un sistema impiantistico, unitamente alla conoscenza delle gestione dell'edificio dell'occupante permetterebbe al conduttore dell'edificio, oppure alla pubblica amministrazione responsabile della gestione e manutenzione dell'immobile tramite i suoi amministratori e tecnici, di valutare con maggior consapevolezza i benefici ottenibili da interventi di efficientamento energetico dell'immobile.

Tali interventi dovranno essere accompagnati da una serie di monitoraggi di natura strumentale in modo da poter costruire nel tempo un valido database di interventi, che potrebbe a sua volta fungere come riferimento di "migliori pratiche" da attuare nella manutenzione e nella ristrutturazione delle scuole italiane.

Come noto, il contesto climatico nazionale è molto eterogeneo, da nord a sud e da zone di pianura a contesti puramente montani. Per questa ragione può essere utile che i risultati delle attività di analisi degli interventi in fase di progettazione e di monitoraggio consuntivo possano essere normalizzati rispetto a parametri che siano in grado di caratterizzare il clima in cui è sito l'edificio.

In molti casi, l'analisi della prestazione energetica dell'edificio, indipendentemente dalla metodologia dalla procedura di calcolo richiede un importante sforzo in fase di raccolta e definizione dei dati di ingresso ai modelli. Per lo stesso edificio, in fase predittiva, si possono ottenere diversi risultati. Questo accade perché si utilizzano programmi di simulazione differenti, a volte i dati di ingresso sono difficili da reperire, l'esperienza e le competenze di chi svolge questa tipologia di analisi sono diverse da soggetto a soggetto.

Spesso avviene che, nonostante una accurata e precisa definizione dei dati di ingresso nel modello energetico predittivo, le prestazioni effettive dell'edificio, valutate attraverso una campagna di monitoraggio, si discostino notevolmente rispetto a quanto calcolato.

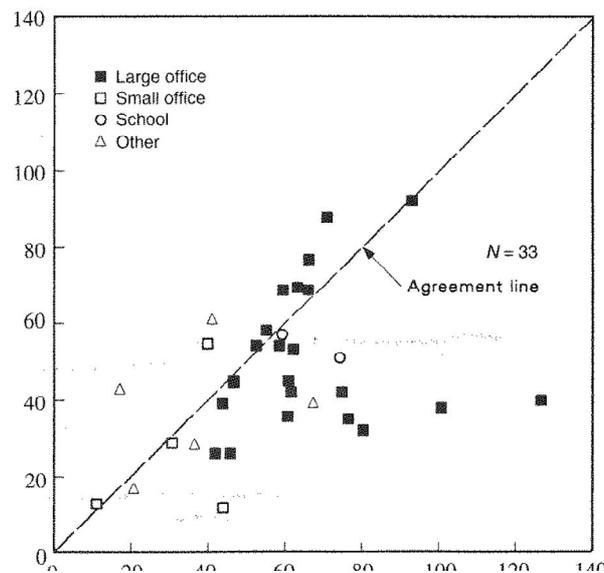


Figura 1: confronto tra le prestazioni energetiche calcolate e reali di edifici non residenziali. Real Energy intensity [kBtu/(ft² x year) in ascissa, e Predicted Energy intensity [kBtu/(ft² x year)] in ordinata [7;14]

In Figura 1 è mostrata una analisi comparativa tra le prestazioni energetiche calcolate rispetto a quelle reali che sono state osservate con edificio a regime. La dispersione dei risultati appare importante a conferma di quanto esposto sopra. Naturalmente le ragioni di queste discrepanze sono tra le più svariate: dal contesto climatico considerato, alla definizione delle prestazioni degli elementi edilizi e dei sistemi impiantistici, alla modalità di uso e gestione dell'edificio da parte degli occupanti, ai valori di set point ed ai momenti di attivazione dei diversi sistemi impiantistici.

Il confronto con valori misurati è una delle procedure utilizzate per la verifica e l'analisi di una metodologia di stima. Ma spesso anche il valore misurato è caratterizzato da un certo grado di incertezza. Frequentemente queste campagne di monitoraggio sono poco presidiate e pertanto risulta difficile tenere traccia di tutti gli eventi che caratterizzano la domanda di energia utilizzata per i diversi usi presenti nell'edificio. In Figura 2 è riportata una analisi analoga a quella rappresentata in Figura 1 per la destinazione d'uso residenziale, dove i profili di occupazione ed i set point impiantistici sono normalmente meno variabili nel tempo rispetto alle altre destinazioni d'uso.

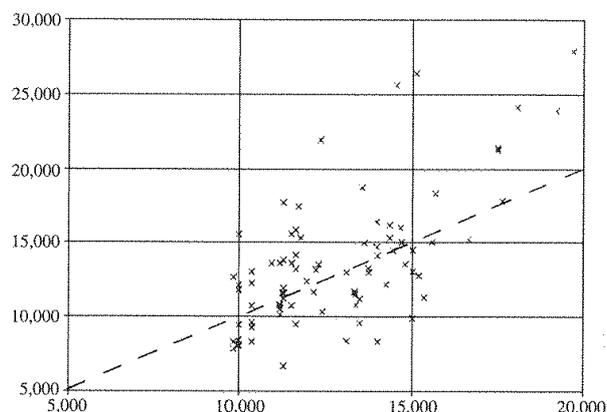


Figura 2: confronto tra le domande di energia importata in edifici residenziali. In ascissa i kWh calcolati ed in ordinata i kWh misurati [8;1414]

Anche in questo caso, come per gli edifici non residenziali, si osserva una importante dispersione dei risultati contraddistinta da una tendenza nel sottostimare in fase di calcolo le prestazioni ed i consumi rispetto a quanto misurabile nella realtà.

La definizione di metodi semplificati che non richiedano eccessivi sforzi di reperimento dati e di modellazione energetica degli edifici permetterebbe l'analisi dello stato di fatto di un importante patrimonio edilizio, individuando gli edifici che prioritariamente necessiterebbero di un intervento di riqualificazione energetica rispetto agli altri.

2 Definizioni

Viene di seguito proposto un breve glossario di armonizzazione delle definizioni che saranno utilizzate all'interno del rapporto che trovano riscontro nella terminologia riportata nella normativa e nella legislazione nazionale vigente.

Fabbisogno di energia termica (utile).

Quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo [1].

Fabbisogno netto di energia termica utile.

Fabbisogno diminuito della quantità di perdite recuperate [2].

Ad esempio per l'acqua calda sanitaria da intendersi come energia necessaria per innalzare la temperatura dell'acqua di fornitura dell'acquedotto alla temperatura desiderata, al netto delle perdite del sistema impiantistico.

Apporti termici utili.

Porzione degli apporti termici interni e solari che contribuisce alla riduzione del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento [3].

Energia totale usata per l'illuminazione.

Energia consumata nel periodo t, espressa dalla somma delle potenze degli apparecchi di illuminazione con le lampade attive, alla quale si sommano i carichi parassiti quando le lampade sono inattive, in un locale o zona, misurata in kWh [4].

Energia consegnata o fornita.

Energia espressa per vettore energetico finale, fornita al confine dell'edificio agli impianti tecnici per produrre energia termica o elettrica per i servizi energetici dell'edificio [5].

Confine del sistema o confine energetico dell'edificio.

Confine che include tutte le aree di pertinenza dell'edificio, sia all'interno che all'esterno dello stesso, dove l'energia è consumata o prodotta [5].

Energia da fonti rinnovabili.

Energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas [5].

Energia primaria

Energia, da fonti rinnovabili e non, che non ha subito alcun processo di conversione o trasformazione [5].

Energia prodotta in situ: energia prodotta o captata o prelevata all'interno del confine del sistema [5].

Fattore di conversione in energia primaria.

Rapporto adimensionale che indica la quantità di energia primaria impiegata per produrre un'unità di energia fornita, per un dato vettore energetico; tiene conto dell'energia necessaria per l'estrazione, il processamento, lo stoccaggio, il trasporto e, nel caso dell'energia elettrica, del rendimento medio del sistema di generazione e delle perdite medie di trasmissione del sistema elettrico nazionale e nel caso del teleriscaldamento, delle perdite medie di distribuzione della rete. Questo fattore può riferirsi all'energia primaria non rinnovabile, all'energia primaria rinnovabile o all'energia primaria totale come somma delle precedenti [5].

Fattore di conversione in energia primaria totale [6,] $f_{p,tot}$ è pari a:

$$f_{p,tot} = f_{p,nren} + f_{p,ren}$$

dove:

$f_{p,nren}$: fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile

$f_{p,ren}$: fattore di conversione in energia primaria rinnovabile

Confine del sistema o confine energetico dell'edificio.

Confine che include tutte le aree di pertinenza dell'edificio, sia all'interno che all'esterno dello stesso, dove l'energia è consumata o prodotta.

Edificio.

È un sistema costituito dalle strutture edilizie esterne che delimitano uno spazio di volume definito, dalle strutture interne che ripartiscono detto volume e da tutti gli impianti e dispositivi tecnologici che si trovano stabilmente al suo interno; la superficie esterna che delimita un edificio può confinare con tutti o alcuni di questi elementi: l'ambiente esterno, il terreno, altri edifici; il termine può riferirsi a un intero edificio ovvero a parti di edificio progettate o ristrutturate per essere utilizzate come unità immobiliari a sé stanti [5].

Fabbricato.

Sistema costituito dalle strutture edilizie esterne, costituenti l'involucro dell'edificio, che delimitano un volume definito e dalle strutture interne di ripartizione dello stesso volume. Sono esclusi gli impianti e i dispositivi tecnologici che si trovano al suo interno [5].

Involucro di un edificio.

Elementi e componenti integrati di un edificio che ne separano gli ambienti interni dall'ambiente esterno [5].

Superficie disperdente S (m^2).

Superficie che delimita il volume climatizzato "V" rispetto all'esterno, al terreno, ad ambienti a diversa temperatura o ambienti non dotati di impianto di climatizzazione [6].

Ambiente climatizzato.

Vano o spazio chiuso che, ai fini del calcolo, è considerato riscaldato o raffrescato a determinate temperature di regolazione [1].

Ambiente non climatizzato.

Vano o spazio chiuso che non fa parte di un ambiente climatizzato [3].

Area climatizzata.

Area del pavimento degli ambienti climatizzati, comprendente l'area di tutti i piani se più di uno, esclusi piani interrati o altri ambienti non abitabili. Ai fini del calcolo degli apporti termici interni, è intesa al netto delle pareti perimetrali e di tutti i divisori verticali [1].

Apporti termici interni.

Calore generato all'interno dell'edificio dagli occupanti (calore metabolico sensibile) e dalle apparecchiature, quali apparecchi domestici, dispositivi d'ufficio, ecc., diverse dall'energia intenzionalmente fornita per il riscaldamento, il raffrescamento o la preparazione dell'acqua calda sanitaria [3].

Apporti termici solari.

Calore fornito dalla radiazione solare entrante nell'edificio, direttamente o indirettamente (in seguito all'assorbimento negli elementi edilizi), attraverso le finestre, le pareti opache e le coperture, o i dispositivi solari passivi come le serre solari, l'isolamento trasparente e le pareti solari [3].

3 Descrizione delle attività svolte e risultati

3.1 Esplorazione di metodi semplificati presenti in letteratura o standard internazionali.

Nella definizione di metodi, seppur semplificati, si è ritenuto opportuno procedere con una esplorazione della letteratura scientifica per valutare se esistono procedimenti e/o metodologie che potrebbero trovare una utile applicazioni per gli scopi del presente rapporto.

Normalmente, la prestazione energetica di un edificio e la stima dei suoi consumi avviene tramite un bilancio energetico sulla base delle caratteristiche fisiche e geometriche degli elementi di involucro, dei sistemi impiantistici installati e delle modalità di uso e gestione dell'immobile. Altre metodologie, al contrario, stimano la prestazione energetica di un edificio o in alternativa la sua domanda di energia importata sulla base di dati storici di consumo e di poche informazioni su geometria e caratteristiche dell'involucro, degli impianti, dell'uso dell'edificio. Tali metodologie vengono applicate anche per quantificare i possibili risparmi energetici a fronte di interventi di efficientamento energetico della costruzione senza necessariamente eseguire un bilancio energetico dettagliato.

In questa ricerca sono prese in considerazione metodologie che hanno lo scopo di quantificare il consumo di energia dell'edificio senza la necessità di implementare dei bilanci di energia come richiesto dalle attuali normative e cercando, per quanto possibile, di limitare il numero di informazioni necessarie per la stima.

Lo scopo di tali metodi è quello di, attraverso un processo a ritroso, di avvicinarsi al consumo dell'edificio implementando un numero limitato di parametri che caratterizza il comportamento energetico dello stesso.

Questo tipo di approccio, secondo diversi autori, permetterebbe di valutare lo stato di fatto dell'immobile ed i vantaggi ottenibili da una riqualificazione energetica di un importante parco immobiliare, con una buona affidabilità, riducendo il tempo di calcolo ed i costi professionali necessari all'attività di diagnosi. I principali soggetti potenzialmente interessati a suddetta metodologia potrebbero essere le pubbliche amministrazioni, che spesso sono chiamate a gestire ed intervenire su un gran numero di edifici.

Corgnati et al [9][10], attraverso l'analisi di consumi storici di più di cento edifici scolastici dislocati sul territorio nazionale, definiscono una metodologia per stimare i consumi futuri per riscaldamento degli edifici, sulla base della reale gestione dell'edificio e del clima che ha generato i dati di ingresso alla metodologia. Il metodo applicato a questo studio è suddiviso in quattro fasi principali:

- reperimento e analisi dei dati storici di consumo;
- definizione e verifica dei rendimenti dei sistemi impiantistici installati nell' i-esimo edificio;
- definizione del profilo di utilizzo dell'edificio;
- definizione dell'energia fornita agli ambienti per il riscaldamento.

Per ogni edificio sono ulteriormente calcolati i gradi giorno reali che hanno caratterizzato il consumo di energia misurato durante il periodo di osservazione. In questo modo è possibile tener conto del contesto climatico reale nella stima della domanda di energia importata e dei possibili risparmi.

Nel quantificare il consumo previsto per ogni singolo istituto scolastico, sono stati normalizzati i consumi storici rispetto ai gradi giorno reali e le ore di effettiva occupazione, riportati alle condizioni standard secondo l'equazione indicata in (1).

$$QP = \frac{Eu_{\text{riferimento}}}{\frac{GG_{\text{reali}}}{GG_{\text{convenzionali}}} \times \frac{h_{\text{reale}}}{h_{\text{convenzionali}}}}$$

Dove:

- QP rappresenta il valore di consumo previsto da quantificare riferito ad una condizione convenzionale;
- $Eu_{\text{riferimento}}$ rappresenta l'energia misurata con il monitoraggio,
- GG e h rappresentano rispettivamente i gradi giorno e le ore di occupazione *reali* e *convenzionali*.

Con il termine convenzionale si intende il periodo di tempo previsto da calendario scolastico che può in alcuni casi differire rispetto alla reale occupazione dell'immobile.

Il modello adottato dagli autori [9][10] presuppone una dipendenza dei consumi da un parametro che caratterizza il clima (Gradi Giorno) e da un parametro che definisce il tempo di funzionamento dei sistemi impiantistici, quest'ultimi legati ad un profilo di occupazione dell'edificio.

Nel modello non sono considerate le caratteristiche geometriche dell'edificio come il volume oppure il rapporto di forma dell'immobile in quanto non è priorità degli autori mettere a confronto i consumi del campione di osservazione ma quello di stimare, per il singolo edificio le variazioni dei consumi in funzione del clima.

Il metodo permetterebbe di individuare gli edifici più energivori e con maggiori opportunità di risparmio energetico all'interno di un numeroso campione di edifici. Questo agevolerebbe gli amministratori locali nel definire una lista di priorità rispetto agli edifici su cui intervenire. Per far questo non è sufficiente osservare i consumi degli edifici (monitorati o stimati) senza avere indicazioni quantomeno sulla dimensione dell'immobile (volume lordo riscaldato, superficie utile riscaldata). A titolo di esempio si riporta la suddivisione a quadranti mostrata in [9] [Figura 3]. La figura rappresenta per un campione di novantasette edifici il consumo di energia globale contabilizzata, rapportato con un consumo di energia di energia specifica rispetto al volume lordo riscaldato dell'edificio. Gli edifici che necessiterebbero di un intervento di riqualificazione prioritario sono gli edifici caratterizzati contemporaneamente da un alto consumo globale (kWh) e specifico (kWh/m³).

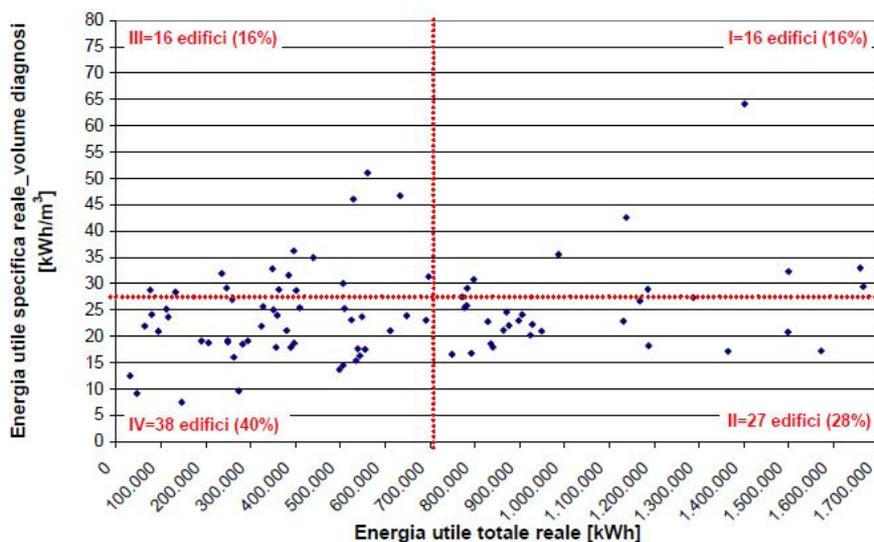


Figura 3: suddivisione in quadranti per la definizione delle priorità di intervento in base al consumo specifico e globale di energia per riscaldamento [1]. Definizione delle priorità di intervento sulla base dei quadranti (in senso orario partendo dal quadrante in alto a destra del grafico): molto alta, alta, bassa, media.

Secondo gli stessi autori, l'applicazione di questo metodo semplificato è possibile per gli edifici in cui la gestione degli impianti e delle condizioni ambientali interne viene fatta indipendentemente dalle esigenze degli occupanti e con limitata possibilità di intervento sulla regolazione da parte degli stessi. Anche la definizione di un profilo di occupazione standard durante il periodo di riscaldamento (unico uso finale preso in considerazione nello studio) è una condizione di applicabilità del metodo.

In letteratura sono presenti altri modelli, più o meno innovativi che hanno lo scopo di definire la prestazione energetica di un edificio senza necessariamente sviluppare un bilancio energetico dell'edificio. Questi metodi sono conosciuti come: *analisi di regressione multipla, metodi che si basano su utilizzo di*

alberi decisionali (*machine learning*), di algoritmi genetici, di rete neurale artificiali (ANN Artificial Neural Network).

Di seguito verranno brevemente trattate le basi sulle quali si fondano alcuni dei metodi sopra citati, applicati alla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici.

Una metodologia che prevede l'utilizzo di una analisi di regressione multipla, per la valutazione della prestazione energetica di un singolo e specifico edificio e la stima di possibili risparmi energetici a fronte di interventi di efficientamento energetico, non può essere condotta senza un valido e ben strutturato database di caratteristiche tecniche e prestazioni energetiche note di un buon numero di edifici. Minore sarà l'eterogeneità degli edifici presenti in questo database (ad esempio strutturando una raccolta dati sulla base della destinazione d'uso) minore saranno gli scostamenti attesi nell'applicazione di questa tipologia di analisi.

Tale metodo statistico è espresso da una equazione del tipo:

$$X = \alpha_0 + \alpha_1 \times y_1 + \alpha_2 \times y_2 + \alpha_3 \times y_3 + \dots + \alpha_n \times y_n + \varepsilon$$

Dove X è la variabile ricercata, la quale dipende dall'intercetta α_0 , dall'errore ε , dai coefficienti del modello di regressione $\alpha_{1...n}$, e dalle variabili del modello $y_{1...n}$. Nel caso specifico la variabili del modello $y_{1...n}$, saranno i descrittori che caratterizzano l'edificio (ad esempio: volume dell'edificio, numero di piani, numero di classi, trasmittanza termica delle pareti, descrittori climatici, descrittori di occupazione dell'edificio ecc.).

Per una più precisa applicazione del modello sarà necessario identificare i descrittori che saranno utilizzati come dati di input sia nella definizione dei coefficienti del modello di regressione, sia come dati di input per il calcolo del parametro ricercato. Questo significa che il livello di precisione richiesto per la definizione di tali input deve essere molto accurato in quanto, tali caratteristiche saranno sia propedeutiche alla definizione dell'equazione sia alla fase di calcolo successiva. In quest'ottica, la metodologia deve prevedere una prima fase esplorativa delle informazioni che si hanno a disposizione per ogni edificio e che andranno a comporre il database iniziale, una valutazione della qualità dell'informazione, la selezione delle variabili che maggiormente influenzano la prestazione energetica dell'edificio. Come esplicitato in [11], alcune di queste variabili possono avere una correlazione tra di loro, tale per cui, considerare una delle variabili correlate implica il fatto di valutare anche gli altri parametri collegati. Nel caso specifico citato, un esempio di variabili correlate sono l'altezza dell'edificio ed il numero di piani, piuttosto che il numero di alunni ed il numero di classi. Tali parametri sono strettamente correlati e l'uno può escludere l'altro, con conseguenti vantaggi in termini di semplificazione.

Un esempio di applicazione del metodo è stato condotto da Capozzoli et al [11]. Nello studio gli autori hanno applicato l'analisi di regressione multipla su un campione di più di cento edifici scolastici per stimare il fabbisogno energetico (*energy use*) per il riscaldamento degli edifici sulla base della loro geometria, del clima, e dei parametri termo-fisici che caratterizzano i diversi componenti di involucro.

La metodologia applicata prevede una analisi preliminare del campione statistico (edifici scolastici) in modo da escludere dal database gli edifici che sono poco rappresentativi del campione (*Outliers*). In una seconda fase sono state selezionate le variabili in ingresso al modello cercando di escludere le variabili irrilevanti, che ad esempio sono strettamente connesse ad altri parametri, come negli esempi citati sopra. Questo permette di ridurre la complessità del modello e di conseguenza il numero di informazioni necessarie per il suo sviluppo. Si riportano di seguito, a titolo di esempio, la selezione effettuata nello studio citato sulla base del fattore di inflazione della varianza (VIF).

Tabella 1: estratto dello studio condotto da Capazzoli et al [11], tabella 3 fattore di inflazione della varianza

Variables	VIF
Real heating degree days [DD]	1.53
Gross heated volume [m ³]	24.28
Heat transfer surface [m ²]	19.25
Aspect ratio [m ⁻¹]	4.96
Building height [m]	2.55
Numbers of floors [n°]	2.46
Thermal trasmittance of walls [W/m ² K]	1.54
Thermal trasmittance of windows [W/m ² K]	1.13
Boiler size (heat input) [kW]	3.10
Number of classrooms [n°]	35.90
Number of pupils [n°]	36.75
Annual operating time [h]	2.02
Average seasonal system efficiency [%]	1.35

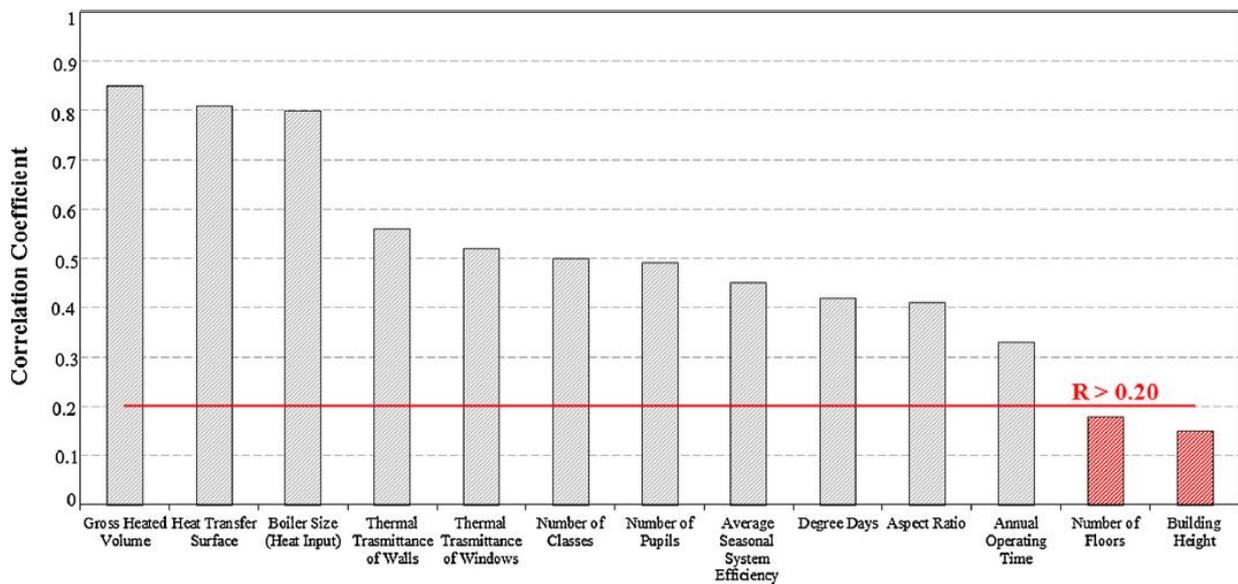


Figura 4: estratto dello studio condotto da Capazzoli et al [11], figura 6 coefficienti di correlazione.

Tabella 2: estratto dello studio condotto da Capazzoli et al [11], tabella 4 variabili selezionate incluse nel modello di regressione.

Statistical description of the variables included into MLR model.

Variables	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
Real heating degree days [DD]	2537	3113	2696	159
Gross heated volume [m ³]	5065	78,532	28,745	17,497
Heat transfer surface [m ²]	1905	24,206	9354	5122
Thermal trasmittance of walls [W/m ² K]	0.40	2.39	1.05	0.40
Thermal trasmittance of windows [W/m ² K]	2.90	6.50	4.25	0.95
Boiler size (heat input) [kW]	141	3807	1424	845
Number of pupils [n°]	115	1194	530	266
Annual operating time [n°]	889	1848	1426	250
Average seasonal system efficiency [%]	0.45	0.77	0.64	0.06

L’ultima fase di applicazione del modello è la fase di apprendimento. Sinteticamente essa consiste nel suddividere il campione di edifici selezionato in due famiglie. Una prima famiglia necessaria alla generazione dai coefficienti di regressione ed alla quantificazione dell’errore. Una seconda famiglia in cui il campione è composto con edifici di test. Nel gruppo di edifici test i consumi energetici sono quantificati applicando il modello di regressione ottenuto in precedenza elaborando le informazioni della prima famiglia di edifici. In Figura 5 un esempio di risultato della validazione rispetto agli edifici di test.

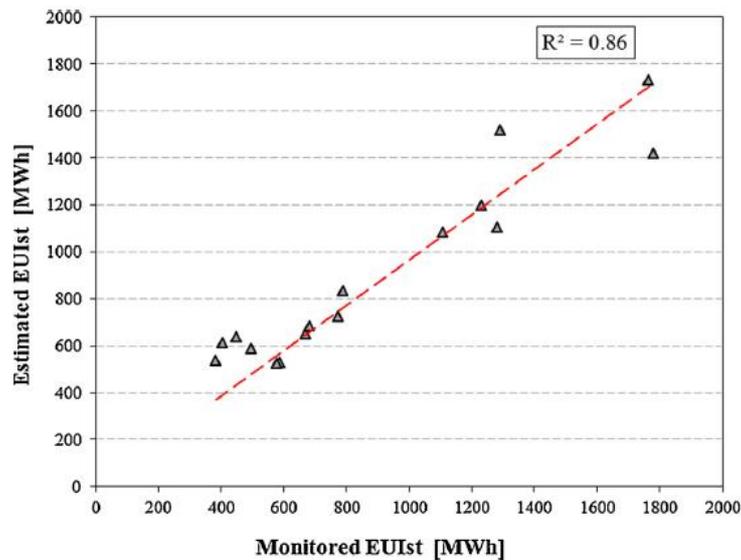


Figura 5: estratto dello studio condotto da Capazzoli et al [11], *figura 7 Standard Energy Use Intensity (definita come il consumo di energia per riscaldamento normalizzato rispetto ai gradi giorno reali e moltiplicato per i gradi giorno di riferimento). Confronto tra i valori misurati ed i valori calcolati attraverso il modello di analisi di regressione multipla per gli “edifici test”.*

Un'altra metodologia, di più recente applicazione ed innovazione è l'applicazione di alberi decisionali mediante l'utilizzo del machine learning. Questa tecnica, similmente al metodo dell'analisi di regressione multipla, implementa degli algoritmi di apprendimento i quali, sulla base di una serie di informazioni organizzate messe a disposizione del risolutore informatico, è in grado di restituire il risultato cercato. Applicato agli edifici, tali algoritmi elaborano i dati di consumo e le caratteristiche fisiche e dimensionali degli immobili. Gli algoritmi sono basati su un albero decisionale di tipo binario in una struttura a nodi in grado di apprendere ed allo stesso tempo fare delle previsioni dato un gruppo di dati, costruendo in modo induttivo un modello basato su dei campioni. Similmente a quanto descritto nella definizione dell'equazione dell'analisi attraverso la regressione multipla il campione di edifici viene suddiviso in due famiglie: la prima di apprendimento, la seconda di test.

Metodologicamente le fasi di selezione del campione, di esclusione degli “outliers” e di definizione delle variabili da inserire nell'albero decisionale, sono necessarie prima dell'avvio della fase di apprendimento.

Entrambe le metodologie, analisi di regressione multipla ed albero decisionale, secondo gli autori in [11], non sono alternative, ma possono essere viste come tra loro complementari. Alcune criticità della regressione lineare multipla evidenziate dagli autori sono:

- necessità di avere un database di edifici sufficientemente uniforme;
 - avere una buona affidabilità dei dati di ingresso;
 - ottenere le informazioni necessarie relativamente alle caratteristiche fisiche dell'edificio;
 - richiesta di competenze tecniche ed esperti nella definizione dei dati di ingresso e nell'utilizzo del metodo.
- L'esempio di applicazione dei due metodi nel riferimento citato, in cui sono stati valutati più di cento edifici scolastici, ha permesso di identificare, tra le diverse variabili che descrivono gli edifici, quelle che hanno una maggiore influenza sui consumi energetici per riscaldamento, per la destinazione d'uso scolastica:
- volume riscaldato;
 - superficie disperdente;
 - taglia di potenza del generatore di calore;
 - trasmittanza termica degli elementi trasparenti dell'involucro.

Altri esempi di sviluppo di strumenti semplificati a supporto della pubblica amministrazione per la valutazione dei possibili risparmi di energia a fronte di interventi mirati di efficientamento dell'involucro edilizio o dei sistemi impiantistici, sono rintracciabili all'interno di progetti Europei. Si cita come esempio lo strumento E-TOOL, un semplice foglio di calcolo che analizza, su tutto il territorio Europeo le opportunità di risparmio energetico di alcune tipologie costruttive. I dati di input sono relativamente pochi. Vengono richiesti i consumi da bolletta energetica e le caratteristiche principali del fabbricato e dei sistemi impiantistici installati per il riscaldamento, il raffrescamento e la produzione di acqua calda sanitaria. Il fabbricato è caratterizzato da descrittori di tipo qualitativo e non numerici, così come le condizioni climatiche (caldo, medio, freddo). In base a questi semplici dati di input ed alla destinazione d'uso dell'edificio vengono ripartiti percentualmente i consumi energetici per riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, apparecchiature elettriche e acqua calda sanitaria. Lo strumento è in grado di restituire informazioni inerenti la fattibilità economica dell'intervento di retrofit valutato. In Figura 6 è riportata la metodologia implementata nello strumento.

Lo strumento è stato successivamente testato dai diversi Partner del progetto IEE all'interno del quale è stato costruito il modello di calcolo. I limiti condivisi dai vari "tester" nell'utilizzo dello strumento, sono: la difficoltà di recuperare dei benchmark di riferimento affidabili e la caratterizzazione troppo vincolata dell'edificio. Paesi e contesti climatici differenti hanno tecnologie costruttive diverse, pertanto uno strumento che non permette di caratterizzare le dispersione dell'edificio nel suo stato di fatto, viene visto come una barriera all'affidabilità dei risultati emessi dall'applicativo. In un caso, sebbene lo strumento richieda pochi dati di ingresso e con basso livello di dettaglio, il reperimento del dato stesso viene visto come impegnativo.

A parere degli scriventi la descrizione del fabbricato nel suo stato di fatto con dati geometrici e parametri fisici che caratterizzano la prestazione energetica dei singoli componenti edilizi è di assoluta importanza per lo sviluppo di queste metodologie. Pertanto, maggiore sarà il grado di precisione nella fase di raccolta dati, più precisi ed efficaci saranno gli output di queste tipologie di calcolo.

Altro aspetto che viene messo in evidenza dal consorzio che ha sviluppato lo strumento è come il comportamento e la gestione dell'edificio dell'occupante sia una delle principali variabili che influenzano e caratterizzano il consumo energetico dell'edificio. Tener conto del comportamento dell'occupante o del gestore dell'edificio risulta di estrema importanza in modelli che hanno come fine ultimo quello di valutare i risparmi di energia a fronte di interventi di efficienza energetica. A titolo di esempio si cita come la regolazione delle temperature degli ambienti interni, così come i periodi di funzionamento dell'impianto (giorno/notte), negli edifici scolastici esistenti, sia spesso motivo di discussione tra il gestore dell'edificio e la pubblica amministrazione in quanto, una cattiva regolazione genera nelle pubbliche amministrazione degli esborsi economici non giustificabili per la climatizzazione degli edifici.

Nella metodologia che verrà proposta in seguito sarà data particolare importanza alla gestione che l'occupante ha dell'edificio e dei diversi sistemi impiantistici.

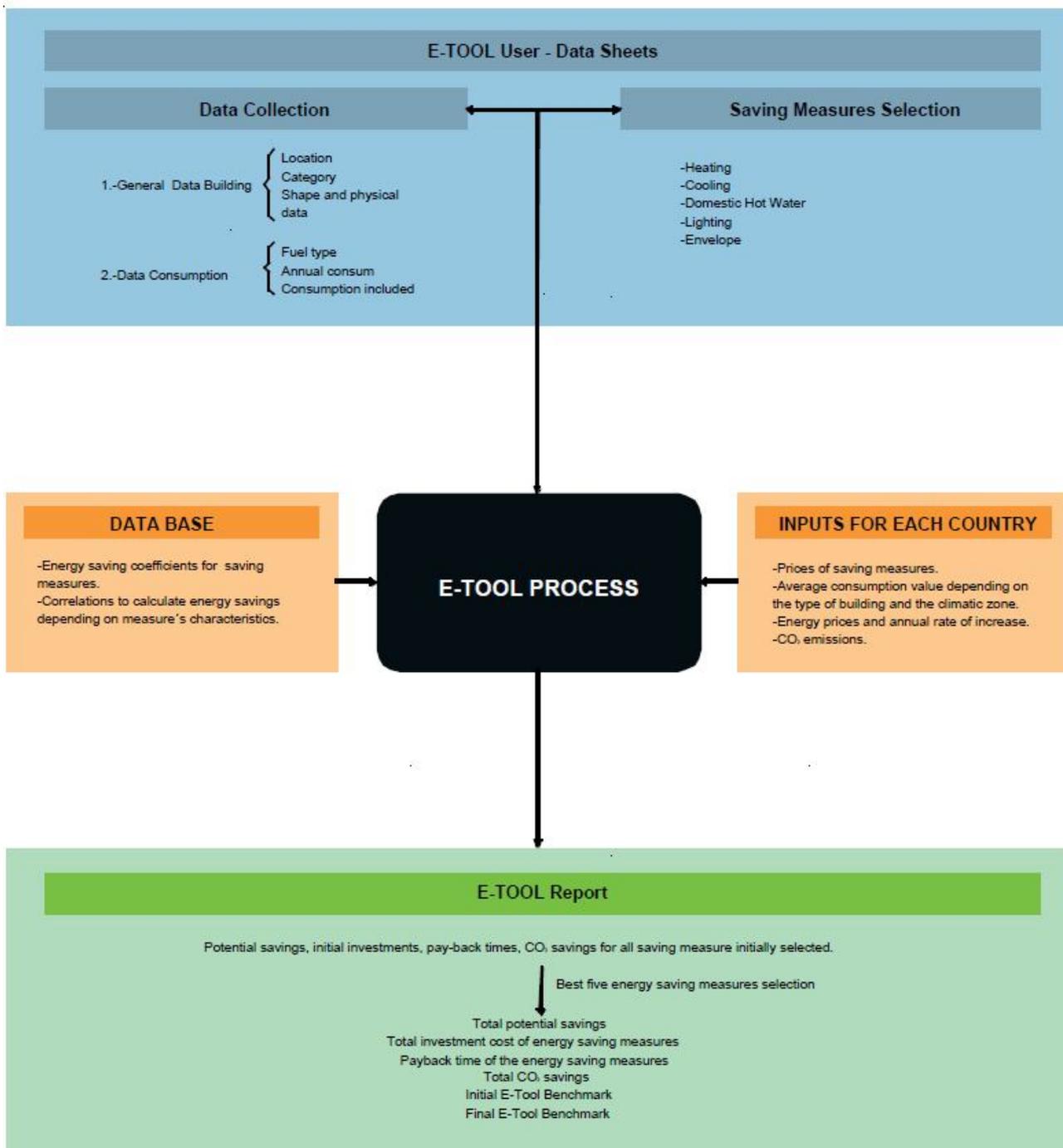


Figura 6: metodologia dello strumento E-TOOL [15]

3.2 Individuazione delle caratteristiche fisiche indispensabili per lo sviluppo di metodi semplificati di previsione dei risparmi.

Seppur nel presente rapporto vengono discussi metodi semplificati di prima approssimazione per la stima di risparmi energetici che possono essere ottenuti con interventi di efficienza da mettere in opera su edifici scolastici, indipendentemente dal metodo di calcolo applicato, la conoscenza di alcune grandi fisiche è da ritenersi indispensabile per il raggiungimento dell'obiettivo. Tali grandezze sono raggruppabili in due grandi famiglie: variabili che caratterizzano il clima esterno, caratteristiche geometriche e fisiche dell'involucro edilizio.

La conoscenza delle condizioni climatiche esterne risulta di strategica importanza per la verifica dei reali risparmi ottenuti a fronte di determinati interventi di efficienza.

Il semplice confronto con i consumi, da bolletta oppure misurati, non è sufficiente per valutare la bontà dell'intervento di riqualificazione energetica di un edificio. Le condizioni climatiche con le quali l'edificio è chiamato ad interagire possono variare di anno con anno. L'evoluzione del clima negli ultimi anni e le prospettive di incremento della temperatura globale sono aspetti che dovrebbero essere considerati nel valutare le diverse strategie di intervento edilizio, passive e non passive.

Come ripreso da Armani et al [22] e descritto in [30], mettere a confronto risultati ottenuti monitorando stagioni di riscaldamento e raffrescamento caratterizzate da condizioni climatiche esterne differenti può compromettere in modo consistente la valutazione dei risparmi energetici. Per tale motivo è necessario correggere i risultati dei monitoraggi sulla base del clima esterno.

La descrizione del clima esterno permetterà di proiettare nel tempo i dati misurati nella condizione di pre-retrofit, permettendo così un confronto diretto con i risultati del post retrofit. In questo modo si otterrà la prestazione dell'edificio a valle degli interventi di efficientamento, direttamente attraverso una misura strumentale e la prestazione dell'edificio prima degli interventi edilizi, calcolando un profilo di consumo corretto in base al clima esterno misurato più recente. Questo permetterà di quantificare il risparmio energetico come la differenza tra il consumo energetico dell'edificio riqualificato (Post-retrofit), possibilmente suddiviso nei suoi diversi usi finali ed il consumo "proiettato" dell'edificio misurato nel suo stato di fatto (Pre-retrofit).

I dati climatici minimi da conoscere, tramite misura diretta in campo, o diversamente tramite l'uso di dati misurati da centraline di rilevazione ambientale dislocate nei pressi del sito scolastico sono: la temperatura dell'aria, la radiazione solare. Queste due forzanti climatiche sono quelle che hanno un maggior peso sulla prestazione energetica dell'edificio e sulla stima dell'energia fornita per quegli usi finali che hanno una dipendenza dal clima esterno (riscaldamento e raffrescamento).

In assenza di dati misurati è opportuno appoggiarsi a file climatici. Sono disponibili file climatici differenti, per fonte, per modalità di costruzione, per periodo di costruzione della raccolta dati di parametri climatici sui quali sono costruiti. In questo caso è opportuna una attenta valutazione dei diversi file provenienti da fonti diverse. Prima di procedere con le valutazioni energetiche si suggerisce una analisi di più file climatici con lo scopo di selezionare quello di riferimento.

Per caratterizzare un contesto climatico o per parametrizzare i risultati di calcolo rispetto al clima, molto spesso si fa uso dei gradi giorno (GG). Nel paragrafo 3.2.1 vengono approfondite le modalità di definizione dei gradi giorno e come essi vengono utilizzati per ottenere informazioni sulla prestazione energetica o sui consumi dell'edificio.

La seconda famiglia di caratteristiche fisiche indispensabili è quella relativa all'involucro edilizio. Tali informazioni risultano altrettanto importanti al fine di quantificare i termini di dispersione e gli apporti interni attraverso l'involucro edilizio. Indipendentemente dalla metodologia di calcolo applicata, dati come il volume riscaldato, la superficie utile di pavimento, il coefficiente di dispersione termica dell'edificio, i valori di trasmittanza termica delle superfici che compongono la parte opaca e trasparente dell'involucro, le caratteristiche di trasmissione solare e visibile delle finestre, sono di estrema importanza nella corretta definizione della prestazione energetica dell'edificio, sia nel suo stato di fatto, sia in fase predittiva nelle valutazioni di interventi di retrofit. Più dettagliata sarà la loro definizione, minore sarà l'errore introdotto

nel calcolo. In alcuni casi, come si discuterà nel prosieguo, potrebbe essere utile distinguere parti dell'edificio in base alla funzione svolta nei singoli ambienti.

Nelle diverse metodologie, sia quelle già presenti in letteratura, sia quella che verrà proposta di seguito, oltre alle informazioni climatiche ad alla caratterizzazione fisica dell'edificio è necessario reperire informazioni in merito ai sistemi impiantistici installati nell'istituto scolastico oggetto di studio. Non solo quelli legati agli impianti di climatizzazione, ma anche quelli relativi ad altri sistemi, tra cui: ventilazione meccanica controllata, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione. Tutti questi canali di consumo potrebbero essere oggetto di manutenzione o sostituzione, per migliorarne l'efficienza del singolo sistema, migliorare le condizioni di comfort degli spazi interni, ridurre la richiesta energetica per il loro esercizio.

In ALLEGATO 1 è proposta una scheda di raccolta dati da sottoporre per ciascun istituto scolastico, di cui si vogliono valutare le potenzialità di risparmio energetico. Tale scheda rappresenta una prima proposta di raccolta dati strutturata per coloro che svilupperanno la piattaforma elettronica. Le informazioni da raccogliere possono essere più o meno numerose a seconda del livello di precisione che si vuole ottenere. Per questo motivo, a fianco di ogni voce presente in allegato 1 è stato assegnato un codice cromatico di priorità. Con il colore rosso sono selezionate le voci e le informazioni che sono indispensabili per l'applicazione del metodo. In colore arancio le informazioni che si consiglia comunque di reperire ma che non sono vincolanti per lo svolgimento della stima predittiva. In verde sono identificate le informazioni che possono supportare il valutatore a comprendere meglio lo stato dell'edificio e le sue modalità di uso e gestione, senza pregiudicare l'applicazione della procedura qualora difficilmente reperibili o omesse.

Nei paragrafi seguenti, per alcuni canali di consumo verranno esplicitate le principali informazioni che l'operatore che si accinge a fare le valutazioni dei risparmi dovrebbe come minimo conoscere.

3.2.1 Gradi giorno

I gradi giorno sono una variabile calcolata che molto spesso viene utilizzata per normalizzare i consumi energetici degli edifici legati alla climatizzazione invernale ed estiva. In generale si possono distinguere due tipologie di gradi giorno: gradi giorno convenzionali, gradi giorno reali. I primi vengono calcolati secondo le indicazioni riportate negli standard oppure definite dalla legislazione [16,17,18], rispetto ad un clima di riferimento. I gradi giorno reali invece sono calcolati rispetto alle condizioni climatiche che hanno caratterizzato la stagione di riscaldamento e/o di raffrescamento.

Ciascuna delle metodologie di calcolo impone le proprie assunzioni e semplificazioni da cui derivano gradi giorno differenti, per la stessa località e set di dati a disposizione.

I gradi giorno sono molte volte un parametro che viene utilizzato all'interno di analisi dei consumi di energia di un edificio attraverso l'applicazione di metodologie di regressione lineare al fine di valutare possibili azioni di risparmio energetico, oppure individuare la scarsa efficienza dell'impianto o eccessiva energia dispersa causate da malfunzionamenti o cattiva regolazione dei sistemi attivi e di controllo.

In letteratura, al fine di agevolare il confronto tra i consumi energetici di due differenti stagioni di riscaldamento, soprattutto nei casi in cui sono stati realizzati degli interventi con lo scopo di ridurre la domanda di energia consegnata e migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio, vengono utilizzati sia i gradi giorno convenzionali (di riferimento) che i gradi giorno reali secondo la relazione seguente:

$$kWh_{i,n} = \frac{kWh_{i,m}}{GG_{raeli}} \times GG_{conv}$$

Dove:

- $kWh_{i,n}$: rappresenta il consumo normalizzato dell'edificio per il servizio i (ad esempio per riscaldamento o per raffrescamento);
- $kWh_{i,m}$: rappresenta il consumo misurato dell'edificio per il servizio i (ad esempio per riscaldamento o per raffrescamento);

- GG_{reali} : sono i gradi giorno reali calcolati sulla base dell'andamento delle condizioni climatiche esterne nel periodo di misura per cui sono noti i consumi;
- GG_{reali} : sono i gradi giorno convenzionali calcolati sulla base di un clima di riferimento secondo gli standard o la legislazione vigente;

Questo approccio permette di poter quantificare in maniera quantitativa i risparmi energetici ottenuti a fronte degli interventi di efficienza di cui l'edificio ha beneficiato.

La metodologia di normalizzazione indicata sopra risulta applicabile ai soli servizi che hanno una dipendenza con le condizioni climatiche esterne, tipicamente il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici. Tale approccio impone la necessità di misurare il consumo energetico associato allo specifico sottosistema. Questo però può risultare di difficile applicazione in quanto i misuratori sono installati in punti in cui, in una struttura ad albero, sono collegati più usi finali. Si pensi ad esempio al consumo elettrico misurato subito a valle del contatore dell'energia elettrica. In quella misura sono inclusi tutti i consumi elettrici dell'edificio (illuminazione, ausiliari elettrici, macchine termiche e frigorifere, circolatori, ecc.). Anche nel caso in cui, ci sia la possibilità di effettuare misure in punti precisi del circuito tali per cui sia possibile monitorare l'energia fornita all'edificio, queste misure possono risultare molto spesso complicate. Si pensi per esempio ad un generatore a gas che serve contemporaneamente il servizio di riscaldamento e di acqua calda sanitaria. In questo caso non sarà possibile misurare a monte del generatore in quanto, anche se il vettore energetico è a servizio di quello specifico generatore non sarà possibile suddividere i consumi di energia per riscaldamento rispetto a quelli per la produzione di acqua calda sanitaria. Pure nel caso in cui si intercettasse l'impianto a valle del generatore, in aggiunta alla misura effettuata al contatore, contabilizzando in questo modo i consumi per ogni servizio, rimarrebbero da quantificare i consumi legati ai circolatori ed alle stazioni di pompaggio (che potrebbero in alcuni casi essere condivise e comunque alimentate da altro vettore energetico), i bruciatori, i ventilatori dei sistemi di evacuazione dei fumi, qualora presenti. Questa complessità legata alla misura in più punti dell'energia trasferita nei diversi sistemi impiantistici, per i diversi usi, può risultare un ostacolo, tale per cui, il proprietario o il gestore dell'edificio non è disposto ad affrontare.

Questo impone di effettuare ulteriori approfondimenti nell'individuare i consumi di energia che non hanno una dipendenza dalle condizioni climatiche esterne. In letteratura questa quantità di energia è definita come "baseload". Tale "baseload" è spesso considerato come una costante durante tutto l'anno di esercizio dell'edificio e potrebbe essere dedotto attraverso l'osservazione dei momenti in cui i servizi che hanno una dipendenza dalle condizioni climatiche esterne non sono in funzione, in quanto la regolazione dell'impianto prevede momenti di spegnimento (ad esempio per l'impianto per riscaldamento durante le ore notturne della stagione fredda), oppure di fermo totale dell'impianto (sempre nel caso del servizio di riscaldamento, ad esempio, nella stagione estiva).

Mantenendo l'obiettivo di determinare il consumo di "baseload", alcune metodologie prevedono di determinarne tale quota di energia attraverso una regressione lineare che metta in relazione il consumo mensile o settimanale con i gradi giorni calcolati nello stesso intervallo temporale [Figura 7].

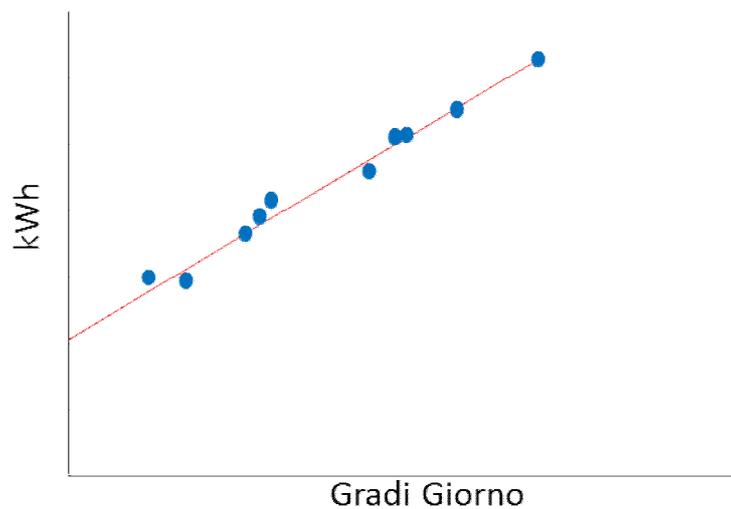


Figura 7: correlazione dei gradi giorni mensili o settimanali con i consumi di energia in kWh. Analisi di regressione lineare.

Mettendo in un grafico sull'asse delle ordinate i valori misurati dei consumi di energia, su base mensile o settimanale, per i servizi dipendenti dalle condizioni climatiche e sull'asse delle ascisse i gradi giorno reali calcolati per l'intervallo temporale per cui si hanno a disposizione i valori misurati, attraverso una analisi di regressione lineare è possibile stimare il consumo di baseload quando la retta di regressione intercetta l'asse delle ordinate, ovvero con gradi giorno pari a zero. La precisione del metodo è legata al numero di dati a disposizione. Per l'applicazione di questo metodo è consigliabile avere a disposizione almeno due o tre anni di monitoraggio.

Tutti questi approcci di normalizzazione dei consumi e di definizione del baseload richiedono una corretta quantificazione dei gradi giorno. Come ben noto il grado giorno è definito come la somma cumulata di tutti i giorni in cui la temperatura media giornaliera risulta inferiore ad una temperatura di riferimento (in riscaldamento). Tale temperatura di riferimento viene normalmente definita dal legislatore e non è univoca per tutti gli stati. Ad esempio in Italia secondo il DPR 412/1993, per la stagione di riscaldamento è assunta pari 20°C (temperatura di comfort ambientale), nel Regno unito si assume una temperatura di riferimento pari a 15,5 °C, negli Stati Uniti d' America è pari a 18 °C. E' evidente come l'individuazione di tale temperatura di riferimento risulti importante nel calcolo dei gradi giorno.

In alcuni testi scientifici tale valore di temperatura è indicato come la temperatura di bilancio.

La temperatura di bilancio rappresenta la temperatura dell'aria esterna per la quale sia necessario attivare un sistema di riscaldamento o di raffrescamento in quanto gli apporti interni e solari non sono in grado di coprire le dispersioni termiche per trasmissione e per ventilazione. Ad esempio la temperatura di bilancio imposta nel Regno Unito di 15,5 °C in riscaldamento è determinata ipotizzando una temperatura degli ambienti interni nell'intorno dei 19 °C ed il contributo degli apporti interni e degli apporti solari di circa 3,5 °C. Da tali considerazioni ne deriva che se la temperatura dell'aria esterna scende al di sotto dei 15,5 °C (19°C – 3,5 °C) ci sia la necessità di attivare un sistema attivo per coprire le dispersioni.

Kreider [14] definisce la temperatura di bilancio come il valore dell'aria esterna tale per cui, per uno specifico valore della temperatura interna, le dispersioni totali eguagliano gli apporti solari e interni.

$$K_{tot}(T_i - T_{bal}) = \dot{Q}_{gain}$$

Dove:

- K_{tot} : [W/K] è il coefficiente di dispersione per trasmissione e per ventilazione attraverso l'involucro edilizio;
- T_i : Temperatura dell'aria interna;
- T_{bal} : Temperatura di bilancio;
- \dot{Q}_{gain} : somma degli apporti interni e solari.

Calcolando in maniera opportuna gli apporti solari e gli apporti interni è possibile definire la temperatura di bilancio, ovvero la temperatura al di sopra della quale (per il caso invernale) non è necessario richiedere l'intervento di un impianto di climatizzazione.

$$T_{bal} = T_i - \frac{\dot{Q}_{gain}}{K_{tot}}$$

E' quindi possibile calcolare i gradi giorno di una specifica località come sommatoria di tutte le differenze positive tra la temperatura di bilancio e la temperatura dell'aria esterna. Questo calcolo risulta molto diverso dal considerare la temperatura dell'aria interna di set-point dell'impianto, ad esempio di 20 gradi centigradi in inverno, per il calcolo degradi giorno.

$$GG_h (T_{bal}) = \sum_{giorni} (T_{bal} - T_o)_+$$

Con $GG_h (T_{bal})$ si rappresenta il numero di gradi giorno in funzione della temperatura di bilancio, con T_o la temperatura media giornaliera dell'aria esterna ed con il simbolo "+" come pedice alle parentesi della sommatoria si richiede di considerare solo le differenze positive del calcolo.

Analogamente per la stagione fredda è possibile procedere con il calcolo dei gradi giorno estivi $GG_c (T_{bal})$ nel seguente modo:

$$GG_c (T_{bal}) = \sum_{giorni} (T_o - T_{bal})_+$$

La definizione di una corretta temperatura di bilancio rimane quindi di estrema importanza per la definizione dei rispettivi gradi giorno. Questa infatti può variare da edificio ad edificio in quanto il coefficiente di dispersione termica K_{tot} e gli apporti interni e solari \dot{Q}_{gain} variano da caso a caso.

In Figura 8 è mostrato un esempio di variazione del numero di gradi giorno in funzione della temperatura di bilancio per un caso studio sito nella città di New York [Figura 1].

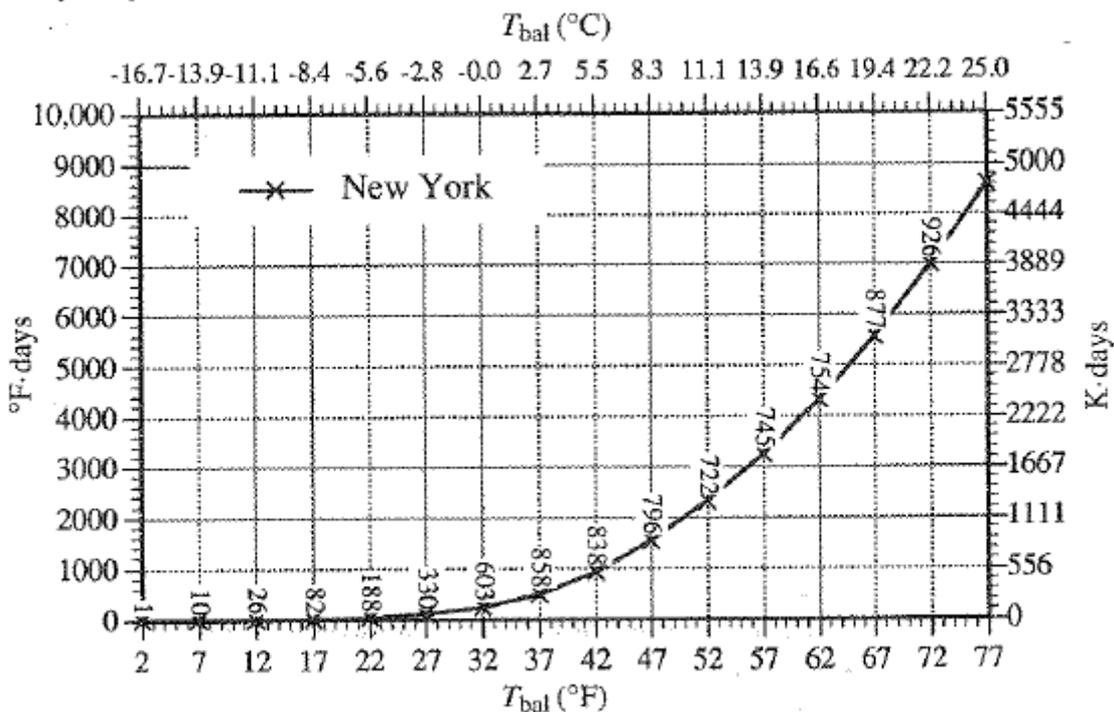


Figura 8: variazione dei gradi giorno invernali in funzione della temperatura di bilancio, per un particolare caso studio nelle città di New York [14].

In generale emerge come la definizione dei gradi giorno sia tutt'altro che scontata. La dipendenza dalla temperatura di bilancio implica che la loro quantificazione non può essere basata esclusivamente rispetto all'andamento della temperatura dell'aria esterna rispetto ad una temperatura di set point, ma devono essere chiari i termini di dispersione, guadagni e apporti gratuiti dell'edificio. Infatti nel caso di definizione dei gradi giorni estivi, strategie di ventilazione naturale (per esempio alternando momenti di apertura e chiusura delle finestre durante la giornata) modificano in maniera significativa il termine di dispersione per ventilazione contenuto all'interno del termine K_{tot} . La stessa cosa può avvenire anche durante la stagione invernale per gli edifici scolastici in cui è installato un impianto di ventilazione meccanica con portate di ventilazione che possono variare nella giornata in quanto dipendenti dal profilo di occupazione degli ambienti. Analoghe riflessioni possono essere estese al termine che caratterizza gli apporti interni \dot{Q}_{gain} : presenza o meno di studenti, attivazione di schermature solari, carichi termici variabili in funzione del funzionamento di ausiliari elettrici nei laboratori o in alcune aule didattiche, sale server, uffici amministrativi. Per queste ragioni, nel calcolo dei gradi giorni, oltre ad avere una buona conoscenza delle caratteristiche geometriche e delle prestazioni fisiche degli elementi che costituiscono l'involucro edilizio sarebbe opportuno avere una buona padronanza delle modalità di gestione ed uso dell'edificio. In quest'ottica è possibile identificare diverse fasce orarie all'interno della giornata "tipo" invernale ed estivo, allo scopo di quantificare più precisamente i gradi giorno reali da utilizzare nelle procedure di normalizzazione. In Figura 9 è mostrato l'andamento della temperatura di bilancio in un giorno tipo invernale al variare degli apporti interni legati all'uso dell'edificio. Senza necessariamente effettuare delle valutazioni su base oraria, il che renderebbe il calcolo dei gradi giorno più preciso ma più oneroso dal punto di vista dei calcoli, è possibile, in particolare per la destinazione d'uso scolastica, definire delle fasce temporali all'interno della giornata in cui risultano evidenti variazioni significative dei termini del bilancio energetico che hanno un effetto anche sulla T_{bal} .

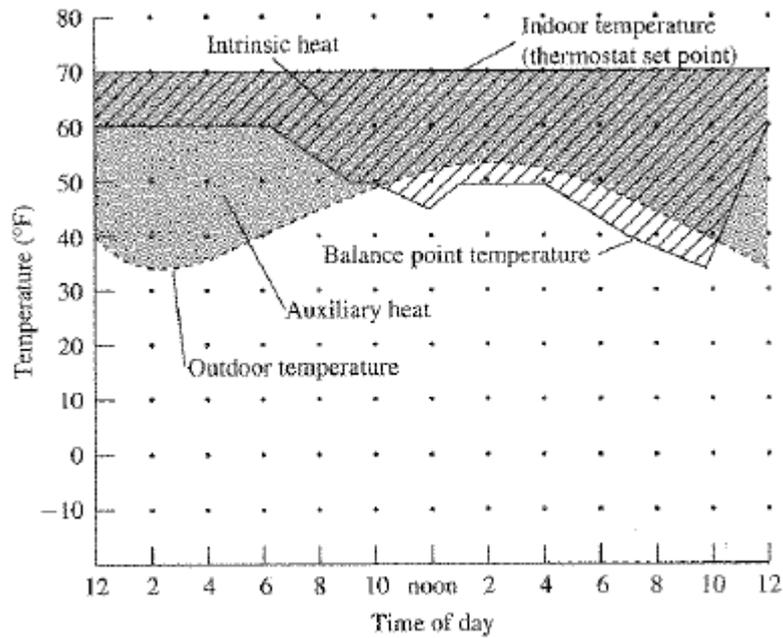


Figura 9: esempio di variazione della temperatura di bilancio in un edificio residenziale al variare degli apporti interni [19]

Ulteriori affinamenti sono possibili quantificando gli apporti solari, su base mensile, i quali hanno un influenza diretta sulla T_{bal} . Questo implicherebbe la necessità di suddividere l'anno solare in archi temporali più brevi, quantomeno su base mensile. Diversi autori hanno provato a definire delle equazioni di calcolo per la definizione dei gradi giorni che non siano riferiti ad una temperatura di riferimento imposta da normativa. Si citano ad esempio Erbs et al [20], Martinatis [21] per i quali si rimanda alle rispettive pubblicazioni per un approfondimento.

I fenomeni osservati nel caso di una valutazione discretizzata nel tempo delle temperature di bilancio rispetto alle caratteristiche ed alla gestione dell'edificio si presentano anche nel caso in cui si decida di definire i gradi giorni in modo più semplificato assumendo una temperatura di bilancio di riferimento per tutta la stagione di riscaldamento o di raffrescamento, in particolare quando si vuole implementare una analisi di regressione per la definizione del consumo di "baseload". In Figura 10 viene schematizzato come, in funzione della temperatura di bilancio assunta come riferimento, per uno stesso edificio, si possano ottenere dei valori di consumo di base differenti. Le temperature di bilancio risultanti possono derivare da differenti interpretazioni dei termini di dispersione/apporto termico degli componenti edilizi, oppure da diversi valori di set point della temperatura dell'aria interna.

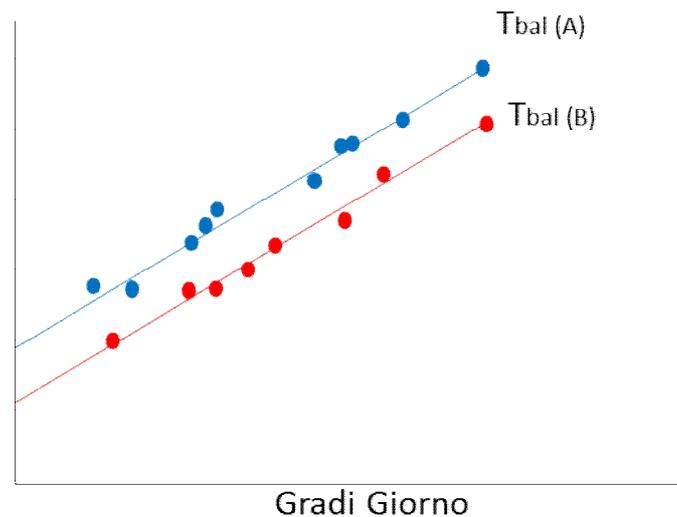


Figura 10: correlazione dei gradi giorni mensili o settimanali con i consumi di energia in kWh. Analisi di regressione lineare con due temperature di bilancio differenti (A) e (B).

Figura 1

Ulteriormente, metodi di valutazione che non discretizzano il calcolo dei gradi giorni, sulla base di archi temporali all'interno della giornata tipo, non permettono di considerare l'effetto che hanno sulla definizione dei consumi (di conseguenza sulla loro normalizzazione rispetto alle variabili climatiche) i momenti di spegnimento dell'impianto, oppure di attenuazioni notturne (ad esempio durante i momenti di non occupazione degli edifici scolastici, come può accadere durante i fine settimana e nei giorni festivi) rispetto ai valori di set point giornalieri.

Altra causa di possibile imprecisione nel calcolo della T_{bal} e dei conseguenti GG è la definizione dei periodi di attivazione degli impianti, quindi di generazione di una domanda di energia fornita. Mentre per il caso invernale, è ragionevole associare il calcolo dei gradi giorno per riscaldamento con il periodo di accensione e spegnimento dell'impianto, stabilito convenzionalmente da decreti legislativi, per la stagione estiva questa selezione temporale risulta di più difficile applicazione. L'assenza di un periodo di accensione degli impianti di climatizzazione non permette di identificare un arco temporale su cui fare dei calcoli e di conseguenza delle normalizzazione dei consumi. In quest'ottica, attività di monitoraggio che permettano di individuare con maggior precisione i momenti di accensione dei sistemi impiantistici potrebbero supportare il valutatore nel definire con maggior precisione le grandezze di interesse.

Alla luce di quanto osservato, emerge come la corretta definizione delle caratteristiche fisiche dell'involucro edilizio, la conoscenza delle strategie di ventilazione, dei profili di occupazione, delle gestione dell'edificio e dei periodi di funzionamento degli impianti (grazie anche ad una campagna di monitoraggio strumentale che può essere di aiuto nell'individuazione dei momenti di attivazione degli impianti termici, in particolar modo durante la stagione di raffrescamento), unitamente ad una discretizzazione temporale ragionata sulla giornata tipo, possano contribuire ad una miglior precisione nel calcolo dei gradi giorno e conseguentemente ad un affinamento del processo di normalizzazione.

3.3 Indicazione di una metodologia semplificata per analisi qualitative dei risparmi energetici conseguibili a fronte di interventi di efficientamento energetico di un edificio scolastico esistente.

La definizione di una procedura semplificata per la stima qualitativa dei risparmi energetici ottenibili a fronte di interventi di efficientamento energetico dell'edificio, o parte di edificio, non può non tenere in considerazione la fisica che caratterizza i meccanismi di scambio di energia e le interazioni che un edificio scolastico ha con le forzanti (climatiche) interne ed esterne.

Seppur nell'analisi della letteratura, siano state ritenute interessanti metodologie che effettuano delle elaborazioni matematiche e statistiche sulla base di un raccolta di dati che descrivono il sistema edificio-impianto (volume riscaldato, potenza del generatore, trasmittanza delle componenti trasparenti, ecc.) e il clima (gradi giorno), viste le perplessità sulla precisione e qualità dei dati che possono essere utilizzati per la costruzione dei database indispensabili per l'applicazione di suddetti metodi, unitamente al fatto che tali metodologie sembrerebbero meglio adattarsi ad una caratterizzazione degli edifici a livello locale (tecnologie costruttive simili ed analogo contesto climatico), si preferisce in questo rapporto proporre una metodologia semplificata più flessibile in grado di caratterizzare maggiormente l'involucro edilizio.

La metodologia proposta ha come obiettivo quello di stimare i risparmi energetici a seguito di azioni di intervento sull'edificio (singole o più interventi di efficienza valutati contemporaneamente), nonché restituire una indicazione dei risparmi che siano confrontabili con gli effettivi consumi che il gestore o l'amministratore dell'edificio scolastico deve sostenere per gli usi finali legati ai singoli servizi (riscaldamento, ventilazione, illuminazione, ecc.). La metodologia intende considerare il profilo di occupazione e le modalità di uso e conduzione dell'edificio. E' noto come la gestione dell'edificio da parte dell'occupante, ad esempio nell'impostazione dei set point di temperatura degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento, nella definizione dei periodi di accensione e spegnimento dei generatori, nell'implementazione delle modalità di ventilazione e delle strategie di attivazione delle schermature solari, possano modificare in maniera significativa il consumo di energia e quindi la quantità di energia fornita ai sistemi impiantistici necessaria al loro funzionamento.

L'influenza nella conduzione dell'edificio da parte dell'occupante, in particolare negli edifici caratterizzati da una occupazione irregolare, può significativamente incidere sui consumi energetici. Tali consumi spesso si discostano dalle valutazioni diagnostiche che implementano le ipotesi di calcolo da normativa. A mero titolo di esempio si cita la gestione di un edificio ad uso palestra, annesso o meno ad un edificio scolastico, dotato di un impianto di riscaldamento dedicato con possibilità di uso serale. Questa modalità di utilizzo dello spazio è spesso contraddistinta da una gestione manuale dell'impianto di riscaldamento da parte di chi detiene la gestione dell'edificio. In questi casi, l'attivazione di un impianto di riscaldamento avviene esclusivamente nei momenti in cui è previsto l'utilizzo dello spazio e nelle ore più prossime (ad esempio accensione 30 minuti prima della prima ora di occupazione e spegnimento al termine delle attività). Con questa tipologia di gestione manuale, sono frequenti i casi in cui l'impianto viene dimenticato acceso. E' chiaro come, metodologie di calcolo che prevedono una occupazione continua degli spazi sulle ventiquattro ore, in alcuni casi, siano troppo penalizzanti rispetto al reale uso dell'edificio.

Traducendo gli effetti che l'occupazione nell'edificio può avere sul bilancio energetico, oltre a quanto descritto sopra, la presenza o meno di persone genera, anche all'interno della singola giornata importanti oscillazioni sugli apporti interni. Questo accade in particolare in ambienti con alti livelli di affollamento come la scuola. Non solo, in caso di presenza di un impianto di ventilazione meccanica atto a soddisfare la richiesta di portata d'aria per garantire una adeguata qualità dell'aria all'interno degli ambienti, l'alternarsi di periodi di tempo in cui è prevista o meno l'occupazione degli spazi, può generare un effetto di variabilità sul termine di bilancio legato alle dispersioni per ventilazione con l'ambiente esterno. Ulteriormente, il funzionamento o meno dell'impianto di ventilazione meccanica ha un effetto diretto in termini di consumi elettrici legato al funzionamento dei ventilatori.

Per tali ragioni, con la metodologia semplificata proposta, si vuole cercare di valutare questi contributi variabili nel tempo sulla domanda di energia fornita all'edificio dovuti all'occupante, con la sua presenza fisica, la sua gestione degli spazi e le sue azioni.

La metodologia riprende il concetto di temperatura di bilancio “ T_{bal} ” espresso nel paragrafo precedente, ovvero la temperatura esterna al di sotto della quale (in riscaldamento) ed al di sopra della quale (in raffrescamento) è necessaria l’attivazione di un impianto di riscaldamento/raffrescamento per compensare le perdite/ingressi attraverso l’involucro edilizio e per garantire una idonea ventilazione degli ambienti interni. Si riprende di seguito l’equazione di definizione della temperatura di bilancio:

$$T_{bal,i} = T_{int,i} - \frac{\dot{Q}_{gain,i}}{K_{tot,i}}$$

dove

- $K_{tot,i}$: [W/K] è il coefficiente di dispersione per trasmissione e per ventilazione attraverso l’involucro edilizio nell’ i -esimo momento;
- $T_{int,i}$: Temperatura dell’aria interna nell’ i -esimo momento;
- $T_{bal,i}$: Temperatura di bilancio nell’ i -esimo momento;
- $\dot{Q}_{gain,i}$: somma degli apporti interni e solari nell’ i -esimo momento.

Tutti i termini che nell’equazione concorrono a definire la temperatura di bilancio, se applicati ad un edificio scolastico possono subire variazioni nel tempo. Questo comporta una variazione della temperatura di bilancio sia nelle ventiquattro ore, sia nei giorni, sia nei mesi.

La temperatura dell’aria interna T_i può assumere valori differenti nel tempo. Per limitare l’attivazione del sistema di generazione i gestori dell’edificio possono imporre momenti di spegnimento dell’impianto durante le ore notturne o di non occupazione dell’edificio (come nei giorni festivi) oppure attenuazioni sulla regolazione, impostando temperature dell’aria di soglia di minima e di massima, rispettivamente in inverno ed in estate, per evitare criticità nei momenti di ripresa dell’impianto nelle prime ore della mattina.

Gli apporti interni e solari \dot{Q}_{gain} , possono variare significativamente lungo l’anno.

Il coefficiente di dispersione per trasmissione e per ventilazione $K_{tot,i}$, può variare nell’arco della giornata in quanto in esso è inclusa la portata di ventilazione necessaria per garantire la salubrità dell’aria. L’impianto di ventilazione potrebbe, in alcuni casi, essere attivato solamente nei momenti in cui è prevista l’occupazione degli ambienti e lasciato spento quando l’edificio non ha persone al suo interno.

E’ quindi possibile definire il fabbisogno di energia termica (utile) $EP_{H,nd}$ in forma semplificata, all’istante i , considerando, ad esempio per il caso invernale, il prodotto tra il coefficiente di dispersione $K_{tot,i}$ che moltiplica la differenza di temperatura tra la temperatura di bilancio $T_{bal,i}$, ottenuta come sopra, e la temperatura dell’aria esterna $T_{o,i}$, solamente nei momenti in cui tale differenza assume valori positivi, ovvero quando la temperatura dell’aria esterna risulta inferiore alla temperatura di bilancio.

$$EP_{H,nd,i} = k_{tot,i} (T_{bal,i} - T_{o,i})_+$$

Analogamente l’equazione che definisce il fabbisogno di energia termica utile per raffrescamento nell’istante i , può essere di seguito così riscritta:

$$EP_{C,nd,i} = k_{tot,i} (T_{o,i} - T_{bal,i})_+$$

Dove con il termine “+” si intendono solamente gli istanti di tempo in cui la temperatura dell’aria esterna è maggiore della temperatura di bilancio.

In ottica di semplificazione del metodo di calcolo e dei dati di ingresso alla metodologia, gli istanti i di calcolo possono essere definiti in archi temporali di riferimento o rappresentativi, all’interno della giornata tipo. Questi archi temporali possono dipendere da come l’edificio viene gestito. Per un edificio ad uso scolastico è ragionevole differenziare i giorni scolastici dai giorni festivi e suddividere la giornata tipo in

intervalli più piccoli. Ad esempio dalle 07:00 alle 13:00, normalmente l'orario tipico di svolgimento delle lezioni, quindi con un importante afflusso di persone e con portate di ventilazione atte a garantire la salubrità dell'aria; dalle 13:00 alle 18:00 in cui possono esserci attività didattiche, oppure la scuola risulta occupata dai soli amministrativi, docenti e ausiliari; dalle 00:00 alle 07:00 e dalle 18:00 alle 24:00, quando la scuola non è utilizzata per la sua funzione (in questi momenti gli apporti sono ridotti al minimo e gli impianti potrebbero risultare spenti o soggetti a regolazioni differenti).

Tali archi temporali di riferimento potrebbero essere gestiti direttamente da colui che amministra la scuola al fine di affinare la stima dei risparmi sulla base della reale conduzione dell'edificio.

In questi archi temporali normalmente corrispondono condizioni climatiche esterne che variano nel tempo. Ricordando che la temperatura dell'aria esterna è un ingresso al metodo per il calcolo dell'energia termica (utile) per riscaldamento e per raffrescamento dell'edificio, sarebbe opportuno, senza la necessità di implementare un calcolo orario dei fabbisogni, definire il numero di ore in cui la temperatura dell'aria esterna ricade all'interno di un determinato intervallo. In quest'ottica, è possibile pensare ad una caratterizzazione del profilo di temperatura esterna, per singolo mese, per arco temporale di riferimento. L'applicazione del metodo "BIN" potrebbe essere utile per gli scopi del progetto e risponde alla necessità di caratterizzare con più precisione la temperatura dell'aria esterna considerando le sue oscillazioni per ogni mese e arco temporale di riferimento.

E' possibile quindi ridefinire l'equazione del bilancio per la stima del fabbisogno di energia termica utile nel seguente modo:

$$EP_{H,nd,i} = k_{tot,i} (T_{bal,i} - T_{o,j})_+ \times n_{BIN,i,j}$$

$$EP_{C,nd,i} = k_{tot,i} (T_{o,j} - T_{bal,i})_+ \times n_{BIN,i,j}$$

Dove con il pedice "i" si intende l'arco temporale di riferimento e con il termine "j" si identifica la temperatura dell'aria esterna per la quale è calcolato il numero di BIN nel mese di riferimento. Conseguentemente $n_{BIN,i,j}$ rappresenta il numero di BIN calcolati per ogni singolo mese, in funzione dell'arco temporale "i" e della temperatura dell'aria esterna "j".

In Figura 11 viene mostrato un quadro metodologico con esplicitati tutti gli ingressi, inclusa la definizione dei termini di bilancio per riscaldamento e per raffrescamento che dipendono dalle condizioni climatiche esterne.

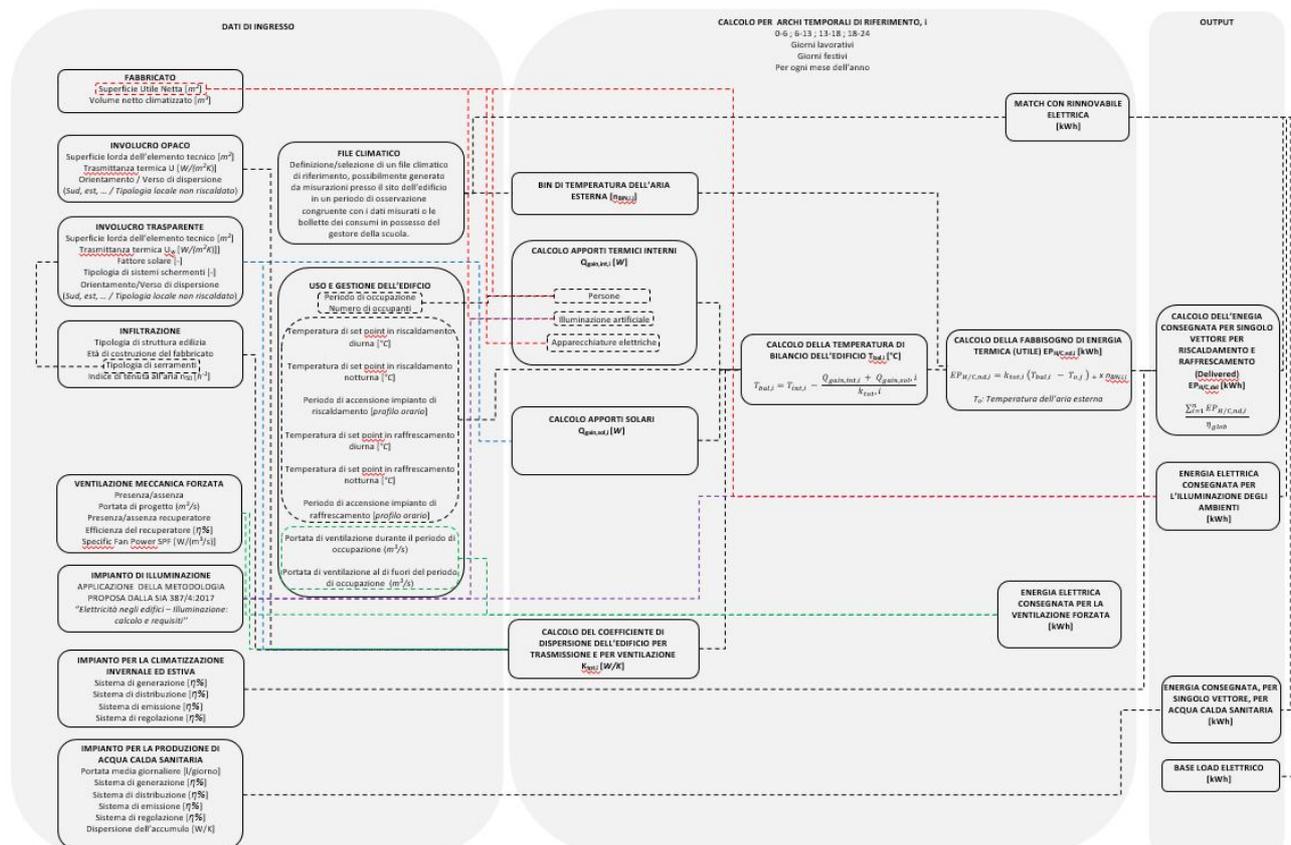


Figura 11: quadro metodologico

La metodologia proposta ha come obiettivo quello di definire un quadro metodologico che consenta di dare delle indicazioni rispetto ai risparmi di energia ottenibili che siano verosimilmente confrontabili con i consumi. Questo scopo impone di inserire all'interno del quadro metodologico le perdite dovute ai diversi sistemi impiantistici. Tali perdite sono nella maggior parte dei casi difficilmente valutabili in quanto non si ha piena conoscenza dell'architettura di impianto, delle lunghezze delle distribuzioni, delle reali efficienze dei sistemi di generazione, dei circolatori e degli organi di regolazione. Questo risulta complicato anche in caso di nuove installazione in quanto le informazioni tecniche fornite dai costruttori delle macchine sono spesso riferite a valori nominali. La loro traduzione in efficienze reali in esercizio, in fase di valutazione a progetto è spesso associata a dei coefficienti di rendimento forniti dalla normativa. Solo una importante e massiccia campagna di monitoraggio permetterebbe di avere conoscenza delle reali prestazioni dei singoli componenti di impianto. La valutazione della prestazione del sistema impiantistico e la quantificazione delle sue perdite è resa ancora più difficile sull'esistente. La mancanza di informazioni e la carenza di dati a disposizione implicano un minor grado di precisione nel calcolo. Per tali motivi, in questa fase, visti gli scopi del metodo proposto, per gli impianti di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, si suggerisce di utilizzare la procedura semplificata inclusa nella attuale normativa vigente assegnando un indice di rendimento a seconda della tipologia di impianto e singolo sottosistema (rendimento di emissione, di regolazione, di distribuzione, di accumulo termico e di generazione).

Nel caso del riscaldamento e del raffrescamento è possibile quindi riportare la domanda di energia consegnata (fornita) come la somma di tutti i fabbisogni di energia termica per riscaldamento o per raffrescamento calcolati in funzione della temperatura di bilancio, con un rendimento globale (η_{glob}) che considera la tipologia impiantistica presente o prevista nell'edificio, per il quale si vuole valutare l'effetto di selezionati e mirati singoli interventi di efficienza.

$$\frac{\sum_{i=1}^n EP_{H/C,nd,i}}{\eta_{glob}}$$

Il quadro metodologico proposto prende in considerazione tutti gli usi finali che normalmente hanno una maggiore incidenza sui costi di gestione dell'edificio. Oltre alla domanda di energia fornita di riscaldamento e raffrescamento, che sono maggiormente dipendenti dalle condizioni climatiche esterne e dalle modalità di uso e gestione dell'edificio, sono previsti dei canali di consumo associati all'impianto di ventilazione meccanica, al servizio di illuminazione artificiale degli ambienti, alla produzione di acqua calda sanitaria, al consumo elettrico diverso dai sistemi sopraelencati (baseload).

L'output finale della procedura sarà la quantificazione del risparmio in termini percentuali rispetto allo stato di fatto, per ogni canale di efficienza valutato.

Nei paragrafi seguenti, vengono approfondite, per alcuni usi finali, le equazioni di stima della domanda di energia fornita. Queste equazioni sono da intendersi come una possibile prima proposta da testare su edifici in cui sono già stati effettuati interventi di efficienza e per i quali sono noti i consumi pre e post retrofit.

3.3.1 Apporti termici interni

All'interno del bilancio energetico semplificato descritto, in cui i flussi di dispersione sono funzione di una temperatura di bilancio, a sua volta funzione di come l'edificio viene utilizzato e gestito, la caratterizzazione degli apporti interni può avvenire attraverso una definizione parametrica sulla base del numero di occupanti e della superficie utile netta dell'edificio.

Persone

L'apporto termico generato dall'occupazione, in questo metodo ipotizzato come carico totalmente sensibile, è strettamente legato al profilo di occupazione degli ambienti. In una scuola, il numero di studenti è molto maggiore rispetto al numero di amministrativi e degli ausiliari. Per questo motivo è ragionevole parametrizzare questo carico termico sulla base del numero di studenti iscritti nello specifico istituto. Per via delle assenze, normalmente non si ha la presenza contemporanea di tutti gli studenti iscritti, ma sono solitamente in un numero leggermente ridotto. In via del tutto semplificativa è ragionevole ipotizzare che il carico termico non generato per via delle assenze, venga compensato dagli insegnanti, dal personale amministrativo e dagli ausiliari. Questa ipotesi permette di semplificare il reperimento del dato di ingresso al calcolo richiedendo solamente il numero di studenti iscritti all'istituto scolastico.

Il calcolo del carico termico per ogni arco temporale associato alla presenza di persone può quindi essere così definito.

$$Q_{gain,pers,i} = N_{pers,i} \times W_{pers}$$

Dove:

$Q_{gain,pers,i}$: potenza termica immessa nell'edificio, associata alla presenza di persone, rappresentativa dell'intervallo temporale di riferimento selezionato;

$N_{pers,i}$: numero di studenti iscritti nell' intervallo temporale di riferimento selezionato;

W_{pers} : potenza termica immessa dal singolo studente, espressa come attività metabolica (Watt), qui ipotizzata come carico interamente sensibile;

Illuminazione artificiale

L'illuminazione artificiale all'interno degli edifici scolastici, in particolare in quelli esistenti, viene normalmente gestita direttamente dagli occupanti, sia all'interno delle aule, sia negli spazi comuni. La loro attivazione difficilmente è molto spesso legata alle esigenze didattiche ed alla disponibilità di luce naturale che le singole aule hanno nel corso della giornata. Questo significa che il loro utilizzo prevede una alternanza di momenti di accensione e spegnimento difficilmente prevedibili. Per questo motivo, il carico termico in ingresso agli spazi interni dovuto all'accensione dell'impianto di illuminazione, da intendersi come il totale del carico elettrico necessario al funzionamento dell'impianto che si trasforma interamente in calore può essere calcolato in via parametrica sulla base della tipologia principale dei corpi illuminanti installati in ambiente.

$$Q_{gain,ill,i} = \frac{E_L}{h_{occ}} \times S_u$$

Dove:

$Q_{gain,ill,i}$: potenza termica immessa nell'edificio, dovuta all'impianto di illuminazione, rappresentativa dell'intervallo temporale di riferimento selezionato.

E_L : energia consegnata specifica per l'illuminazione [kWh/(m²a)] calcolato attraverso la metodologia espressa nel paragrafo 3.3.5 per singolo arco temporale.

h_{occ} : numero di ore di occupazione dell'edificio.

S_u : superficie utile netta di pavimento.

Apparecchiature elettriche

In merito al carico termico generato dalle apparecchiature elettriche, le strade percorribili sono essenzialmente due. La prima consiste in un censimento dei principali dispositivi installati all'interno degli spazi climatizzati (PC, vending machine, server, ecc). In questo censimento devono essere escluse le dotazioni informatiche utilizzate a livello didattico, in quanto, seppur contraddistinte da un importante carico termico che le stesse immettono all'interno delle aule informatiche, il loro utilizzo è generalmente saltuario e legato ad esigenze didattiche che sono difficilmente prevedibili nelle valutazioni energetiche dell'edificio. La seconda strada, similmente a quanto proposto per l'apporto interno legato all'impianto di illuminazione, calcola tale contributo di calore attraverso una parametro che dipende dai metri quadri di superficie utile di pavimento. Tale parametro potrebbe essere generato da una analisi statistica presente in letteratura oppure ricavato da standard. In questo secondo caso il carico termico in ingresso all'edificio dovuto alla presenza di dispositivi e macchine elettriche può essere così definito:

$$Q_{gain,elett,i} = W_{elett,i} \times S_u$$

$Q_{gain,ill,i}$: potenza termica immessa nell'edificio, dovuta alla presenza di apparecchiature elettriche, rappresentativa dell'intervallo temporale di riferimento selezionato.

$W_{elett,i}$: potenza termica immessa nell'edificio per metro quadro di superficie di pavimento dovuta al funzionamento di apparecchiature elettriche. Questo parametro può risultare meno variabile nel tempo rispetto all'impianto di ventilazione in quanto apparecchiature come le vending machine o i server difficilmente vengono privati di alimentazione durante i giorni festivi o durante le ore notturne.

S_u : superficie utile netta di pavimento

E' quindi possibile definire l'apporto termico all'edificio per ogni intervallo temporale, espresso in termini di potenza, come somma di tutti i singoli contributi dovuti a persone, illuminazione artificiale, apparecchiature elettriche

$$Q_{gain,int,i} = Q_{gain,pers,i} + Q_{gain,ill,i} + Q_{gain,elett,i}$$

3.3.2 Apporti solari

Nel bilancio energetico sviluppato secondo la presente metodologia, gli apporti solari possono essere determinati sulla base del metodo indicato nella norma UNI TS 11300-1 [1]. Questo costituisce un riferimento completo, sul quale possono o meno essere applicate delle semplificazioni, in funzione del livello di approfondimento o di semplificazioni che si sceglierà nell'applicazione.

Per la determinazione degli apporti solari il metodo può essere sintetizzato dai seguenti passaggi di calcolo.

$$Q_{sol,i} = \left\{ \sum_k (F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k,i}) \right\} \cdot t$$

Dove

- $Q_{sol,i}$ apporto solare medio per arco temporale di riferimento.
- $F_{sh,ob,k}$ fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k -esima; si ritiene che tale fattore sia troppo legato alle caratteristiche geometriche dell'edificio e pertanto in prima approssimazione potrebbe essere trascurato.
- $A_{sol,k}$ area di captazione solare effettiva della superficie k -esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale.
- $I_{sol,k,i}$ irradianza solare giornaliera media mensile, sulla superficie k -esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, pesata in base alle ore di soleggiamento ricomprese nell'arco temporale di riferimento.
- t durata dell'arco temporale di riferimento.

Per ciascun componente di involucro finestrato si determina

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl,n} \cdot F_w \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p}$$

Dove

- $F_{sh,gl}$ fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili;
- $g_{gl,n}$ trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale;
- F_w fattore di esposizione (che la norma indica può essere assunto come 0,9);
- F_F frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;
- $A_{w,p}$ l'area proiettata totale del componente vetrato (l'area del vano finestra).

Per ciascun componente di involucro opaco si determina

$$A_{sol} = \alpha_{sol,c} \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c$$

Dove

- α_{sol} fattore di assorbimento solare del componente opaco;
- R_{se} resistenza termica superficiale esterna del componente opaco;
- U_c trasmittanza termica del componente opaco;
- A_c area proiettata del componente opaco.

La norma riporta riferimenti di dettaglio per determinare i valori di tutti i termini riportati sopra e in alternativa indica direttamente anche valori di riferimento rappresentativi. Questo può consentire l'applicazione del metodo anche nei casi in cui non si conoscano i valori reali dei dati di input.

Nel metodo di calcolo gli apporti solari sono determinati con bilanci energetici che tengono in considerazione l'esposizione ed gli archi temporali di riferimento.

Semplificazioni sono possibili in base al livello di approfondimento che si vorrà stabilire nell'applicazione del metodo del presente documento. Ad esempio in base a questo si potranno considerare o meno gli apporti solari dovuti alla radiazione solare incidente sulle superfici opache di involucro, trattandosi di un calcolo semplificato che non tiene conto della dinamica delle pareti e dello sfasamento temporale dell'ingresso dell'onda termica all'interno degli ambienti climatizzati.

I valori di input di irradiazione solare media per le diverse esposizioni può essere determinata dalla norma UNI 10349:2016-1 [31]. Il riferimento normativo indica anche il metodo per determinare i valori delle località non comprese nel documento. In questo modo è possibile la copertura di tutto il territorio nazionale.

3.3.3 Coefficiente di dispersione dell'edificio per trasmissione e per ventilazione

All'interno della metodologia proposta nel coefficiente di dispersione per trasmissione e per ventilazione dell'edificio (k_{tot}) sono inclusi diversi canali di dispersione che caratterizzano la prestazione energetica. Nello specifico: gli elementi opachi dell'edificio con la loro superficie (parametro geometrico) e la loro trasmittanza termica (parametro fisico); gli elementi trasparenti, quali finestre, portefinestre, vetrate anch'esse caratterizzate sulla base della propria geometria e trasmittanza termica; le dispersioni dovute allo scambio di massa d'aria con l'ambiente esterno attraverso le infiltrazioni e la ventilazione degli ambienti interni.

All'interno del coefficiente k_{tot} possono rientrare più interventi di efficienza energetica di cui si vuole stimare il contributo, ad esempio: la sostituzione delle finestre; l'isolamento termico di tutto o parte dell'edificio; l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica con recupero di calore, quest'ultimo per quanto riguarda il bilancio termico relativo a quel canale specifico. In funzione della tipologia di intervento che l'amministratore dell'edificio scolastico vorrà analizzare, al fine di ottenere una indicazione sui possibili risparmi energetici, il coefficiente k_{tot} assumerà valori differenti.

Anche se in un approccio semplificato, nella definizione del coefficiente di dispersione dell'edificio per trasmissione e per ventilazione si suggerisce, per quanto possibile, di rispettare la fisica sulla quale è costruito il bilancio energetico. Per far questo è necessario che quantomeno le singole superfici che formano l'involucro vengano correttamente caratterizzate con la propria superficie, verso di dispersione, trasmittanza termica. Questo comporterà un impegno maggiore nell'ingresso di dati necessari al calcolo, ma allo stesso tempo aumenta la precisione della stima.

Al fine di considerare i casi in cui le superfici edilizie che definiscono l'involucro edilizio che non danno direttamente verso l'esterno, ma verso ambienti non riscaldati (come sottotetti, locali tecnici, vespai, ecc.) il termine di dispersione che caratterizza la specifica superficie (trasparente oppure opaca) dovrà essere corretto con un coefficiente che tenga conto delle condizioni ambientali dell'ambiente non riscaldato. In questa fase possono essere utilizzati i fattori di correzione dello scambio termico tra ambienti climatizzato e non climatizzato o terreno ($b_{tr,x}$, $b_{tr,g}$) proposti dalla normativa vigente [1].

L'equazione che definisce il termine di dispersione per trasmissione all'interno del coefficiente k_{tot} per ogni intervallo di riferimento potrebbe assumere la seguente forma:

$$k_{t,i} = \sum_{z=1}^n A_z \times U_z \times b_{tr,x/g}$$

Con:

$k_{t,i}$: termine di dispersione per trasmissione nell'intervallo di riferimento i

A_z : superficie lorda dell'elemento opaco o trasparente z

U_z : trasmittanza termica dell'elemento opaco o trasparente z

$b_{tr,x/g}$: fattore di correzione dello scambio termico tra ambienti climatizzato e non climatizzato o terreno

Per quanto riguarda il termine di dispersione per ventilazione si suggerisce allo stato attuale di implementare le equazioni di calcolo presenti nella normativa vigente. Pertanto si rimanda direttamente agli standard in vigore.

3.3.4 Ventilazione meccanica forzata

Negli interventi di profonda riqualificazione e ristrutturazione degli edifici è cosa comune che i progettisti prevedano l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica forzata. Questa è una necessità che nasce dalla volontà di voler garantire alti livelli di qualità dell'aria negli istituti scolastici. Infatti, negli edifici privi di sistemi meccanizzati, in particolare durante la stagione invernale, è cosa comune riscontrare alti livelli di CO₂ all'interno delle aule didattiche, anche dopo pochi minuti di occupazione dei locali. La ventilazione degli ambienti scolastici esistenti risulta spesso insufficiente per contenere l'innalzamento dei livelli dei contaminanti interni [22;23].

Un intervento di miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio ed auspicabilmente della sua tenuta all'aria, se non accompagnata da una campagna di formazione nella gestione della ventilazione naturale degli ambienti attraverso l'apertura delle finestre potrebbe aggravare ulteriormente la qualità dell'aria all'interno dell'istituto scolastico. In questi casi, i progettisti prevedono l'installazione di un sistema di ventilazione forzata, con un sistema di recupero del calore per garantire la portata d'aria necessaria ad assicurare la salubrità degli ambienti.

L'installazione di questa tipologia di sistemi introduce un nuovo canale di consumo che deve essere preso in considerazione all'interno del bilancio energetico dell'edificio. Per questo motivo all'interno del quadro metodologico proposto è previsto un output che quantifichi il consumo dei ventilatori di questi sistemi impiantistici.

In un edificio scolastico le portate di ventilazione possono variare in funzione dell'occupazione dell'edificio. E' tipico il caso in cui l'impianto risulta attivo solo durante le ore giornaliere, mentre viene spento durante la notte ed i giorni festivi, a meno di logiche di raffrescamento notturno forzato durante la stagione calda quando le condizioni di temperatura e umidità dell'aria esterna sono favorevoli per asportare il calore accumulato dalle masse dell'edificio.

La suddivisione in archi temporali della metodologia proposta può essere di aiuto nel momento in cui la gestione dell'edificio prevede momenti in cui l'impianto risulta attivo e momenti in cui l'impianto rimane spento. Per ogni intervallo temporale di riferimento i , il consumo elettrico associato ai ventilatori del sistema impiantistico può essere di seguito così stimato:

$$W_{vmc,elett,i} = SPF_{tot} \times q_i \times n_{h,i}$$

Dove:

$W_{vmc,elett,i}$: energia fornita al sistema di ventilazione per l'intervallo temporale di riferimento i

SPF_{tot} : rappresenta l'assorbimento specifico della macchina di ventilazione parametrizzato sulla portata

q_i : portata di ventilazione di progetto o imposta dalla regolazione dell'utente per l'intervallo temporale di riferimento i

$n_{h,i}$: durata in ore dell'intervallo temporale di riferimento

3.3.5 Illuminazione artificiale

L'energia spesa per l'illuminazione degli ambienti interni ed esterni di un immobile rappresenta una componente non trascurabile nel bilancio energetico dell'edificio. All'interno di un rapporto dell'International Energy Agency (IEA) ripreso da Tanishima e Waide [25], è stato affermato che il 19% dell'energia prodotta a livello mondiale è consumata dagli impianti di illuminazione. Questo a causa anche dell'obsolescenza degli apparecchi illuminanti (con vetustà superiori a 20 anni), caratterizzati da basse efficienze. Phol et al [26] quantificano che oltre il 90% degli apparecchi illuminanti installati ricadono in questa condizione.

Da qui la necessità di ridurre la componente di energia consumata dall'impianto di illuminazione, al fine di migliorare la prestazione dell'edificio, ridurre i costi di gestione e manutenzione degli apparecchi illuminanti, ridurre i costi energetici. Questa riduzione non può però compromettere le condizioni di comfort visivo all'interno degli edifici.

Linhart e Scartezini [27] mostrano come oggi sia possibile raggiungere potenze di apparecchi illuminanti installati inferiori di 5 W/m^2 in edifici per uffici raggiungendo adeguate condizioni di benessere visivo. Li et al. [28] dimostrano come in un edificio scolastico sia possibile raggiungere riduzioni di consumi di energia associati all'illuminazione artificiale fino al 28% prevedendo l'installazione di apparecchi illuminanti ad alta efficienza e sistemi di dimmeraggio controllato. Gli stessi autori mostrano come un'ulteriore riduzione sia possibile attraverso uno sfruttamento prolungato nel tempo della luce naturale, contenendo al tempo stesso i carichi richiesti per la climatizzazione estiva grazie all'impiego di adeguati sistemi di schermatura solare.

La letteratura scientifica ribadisce l'importanza di effettuare interventi di efficienza su impianti di illuminazione, cercando, fin dove possibile e ragionevole, di sfruttare la luce naturale diurna. Valutare queste componenti risulta abbastanza complesso, soprattutto se si considera il contributo che la luce naturale ha negli spazi confinati in termini di riduzione dei consumi energetici e miglioramento del benessere visivo (quando sono evitati fenomeni di abbagliamento e contrasti di luminanza sulle superficie che possano arrecare disturbo alla corretta messa a fuoco e visibilità del compito visivo). Studiare la luce naturale negli spazi confinati, significa aumentare il dettaglio dell'analisi mediante una valutazione per singolo ambiente. Ogni ambiente è caratterizzato da un rapporto superficie trasparente/opaco differente, esposizioni diverse, colore e disposizione dei compiti visivi che possono variare da stanza a stanza.

Rispetto agli obiettivi del presente rapporto, l'analisi di edifici scolastici, comunemente caratterizzati da una "ripetitività" architettonica, soprattutto per gli ambienti didattici, si ritiene fattibile implementare delle logiche di omogeneizzazione delle superfici dell'edificio. In questa direzione, potrebbe essere necessario richiedere poche informazioni relative ad una aula didattica ed estendere il risultato a tutti gli spazi del fabbricato con la medesima funzione. Essi infatti sono caratterizzati frequentemente dallo stesso rapporto tra superficie trasparente/opaca e dai medesimi requisiti in termini di illuminamento. La restante parte del fabbricato, composta da spazi comuni, di circolazione e servizio, in questa prima fase potrebbe essere modellata utilizzando lo stesso tempo di accensione dei corpi illuminati degli spazi dedicati alla didattica ma riferiti ad un livello di illuminamento target coerente con la loro funzione e le loro necessità illuminotecniche.

Per raggiungere l'obiettivo è stata selezionata la procedura di calcolo semplificato proposta dalla SIA 387/4:2017 "Elettricità negli edifici – Illuminazione: calcolo e requisiti" [29].

La scelta è stata effettuata sulla base del numero di informazioni che viene richiesto all'operatore per fare una stima dell'energia fornita per l'illuminazione artificiale, dalla complessità del calcolo e dalla possibilità di prendere in considerazione il contributo della luce naturale. La procedura proposta dalla SIA 387/4:2017

permette di considerare tutti quei fattori utili per la definizione dei consumi per l'illuminazione artificiale limitando lo sforzo ed il livello di conoscenza dell'operatore che si accinge ad effettuare il calcolo. In Figura 12 è riportato il quadro metodologico proposto sulla base della procedura SIA 387/4:2017.

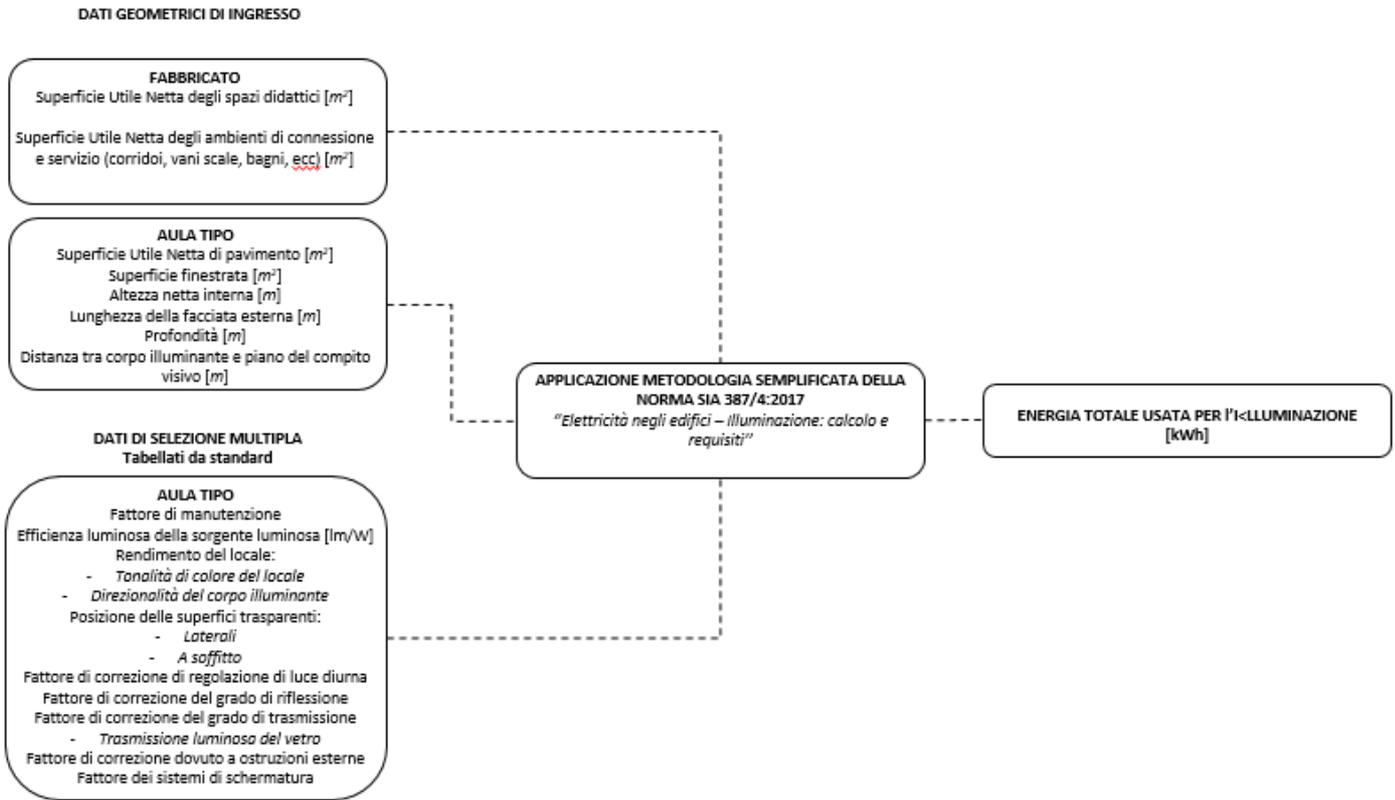


Figura 12: quadro metodologico del metodo semplificato proposta dalla SIA 387/4:2017

Il metodo selezionato permette di considerare i requisiti di illuminamento richiesti per il corretto svolgimento delle attività previste negli spazi interni oltre al contributo dell'illuminazione naturale. L'energia consegnata specifica per l'illuminazione (E_L) [kWh/(m²a)] è dato dal prodotto tra la potenza specifica dell'impianto di illuminazione (P_L) [W/(m²)] e le ore di pieno carico per tempi di utilizzo generali (t_L) [ore].

$$E_L = P_L \times t_L$$

Moltiplicando l'energia consegnata specifica per la superficie dell'edificio, o la porzione dell'edificio caratterizzata dal quel consumo specifico, si ottiene l'energia fornita al canale di consumo dell'illuminazione artificiale.

La potenza specifica (P_L) dell'intervento di efficientamento, può essere calcolata attraverso la seguente relazione

$$P_L = \frac{E_0}{MF \times \eta_v \times \eta_r}$$

Dove:

P_L : potenza specifica richiesta per l'illuminamento di uno spazio interno che rispetti determinati requisiti [$W/(m^2)$];

E_0 : livello di illuminamento richiesto per l'ambiente [lux];

MF: fattore di manutenzione dei corpi illuminanti, funzione del grado di pulizia dei locali e dell'intervallo temporale programmato per la manutenzione e pulizia degli apparecchi;

η_v : efficienza luminosa della sorgente luminosa (che dipende dalla tecnologia della sorgente luminosa) [lumen/W];

η_r : rendimento del locale (funzione dalla geometria del locale, dalla larghezza della facciata, dalla sua profondità, dal colore delle superfici interne che delimitano lo spazio, dalla distanza tra corpo illuminante e piano di lavoro sul quale si vogliono garantire livelli di illuminamento adeguati, dalla tipologia di distribuzione della luce del corpo illuminante).

La valutazione della potenza specifica P_L può essere effettuata su un locale campione scelto all'interno dell'istituto scolastico ed esteso con sufficiente approssimazione a tutto il fabbricato.

Mentre è chiaro come sia di più facile definizione il valore di potenza specifica P_L in fase di valutazione di un intervento di manutenzione e sostituzione del corpo illuminante, qualche problema può sorgere nella valutazione dello stato di fatto del sistema impiantistico. Ricordando che il risparmio energetico restituito dall'algoritmo di calcolo è una percentuale che rappresenta la riduzione dell'energia fornita per tutti gli usi a servizio del fabbricato, la corretta e quanto più precisa definizione degli stessi termini sullo stato in essere dell'edificio è di imprescindibile importanza per lo studio preliminare di fattibilità tecnica ed economica del singolo canale di intervento.

L'equazione sopra riportata difficilmente può correttamente quantificare la potenza specifica P_L dello stato di fatto, a meno di conoscere i reali livelli di illuminamento che l'impianto esistente è in grado di garantire. Tale informazione può essere recuperata attraverso una misurazione strumentale mediante l'utilizzo di un luxmetro. Questo strumento raramente è a disposizione di chi amministra o gestisce un edificio scolastico.

Per questo motivo, per la definizione della potenza specifica P_L dello stato di fatto si suggerisce di rilevare, per l'ambiente campione selezionato, contestualmente ai dati geometrici ed alle caratteristiche superficiali degli elementi che delimitano lo spazio, il numero e la potenza delle sorgenti luminose installate. In questa direzione si ritiene di poter ottenere delle stime più precise rispetto all'implementazione dell'equazione che considera il livello di illuminamento garantito (o da garantire) sul piano di lavoro.

Il secondo termine utile per il calcolo dell'energia consegnata specifica per l'illuminazione artificiale E_L è il numero di ore di utilizzo a pieno carico. Questo termine implementa una serie di equazioni in cui la maggior parte dei termini sono dei valori tabellati all'interno dello stesso standard. A puro titolo di esempio non esaustivo si citano: fattore di correzione in funzione della tipologia di regolazione del corpo illuminante, fattore di correzione che considera il grado di riflessione della radiazione visibile delle superfici che delimitano l'ambiente campione, il fattore di correzione dovuto alle ostruzioni esterne (funzione della tipologia di contesto urbano circostante), il fattore che considera la presenza o meno di sistemi schermatura solare (questo varia con la tipologia della tecnologia di schermatura).

Parallelamente alla sezione multipla che lo standard mette a disposizione, nel calcolo delle ore di piano carico è necessario inserire il coefficiente di trasmissione visibile del vetro, l'altezza del locale e la distanza tra l'architrave della finestra ed il soffitto. Le ultime due informazioni, di natura geometrica, possono essere ricavate dall'ambiente campione selezionato. Il coefficiente di trasmissione visibile del vetro può essere ricavato sulla base della selezione della tipologia di superficie trasparente installata o di futura installazione. Ricapitolando, il metodo proposto dalla norma SIA 387/4:2017 permette la definizione dell'energia consegnata per l'illuminazione artificiale di un edificio senza dover prendere in considerazione l'orientamento di ogni singolo spazio interno, senza richiedere calcoli complessi dei livelli di illuminazione naturale (in cui è richiesto l'utilizzo di idonei software di simulazione), considerando i livelli di illuminamento da garantire in caso di sostituzione delle sorgenti o dei corpi illuminanti.

Contemporaneamente propone un affinamento del calcolo delle ore di utilizzo a pieno carico del sistema impiantistico.

Inoltre, la famiglia di standard a cui appartiene la SIA 387/4:2017 è usualmente costruita sulla base di rilevazioni e/o dati misurati su casi reali.

Come introdotto all'inizio del presente paragrafo, al fine di limitare il numero di informazioni che l'operatore deve conoscere per l'esecuzione del calcolo, si suggerisce di prendere come ambiente di riferimento un'aula didattica. Questo introduce una imprecisione nel calcolo in quanto non si richiedono informazioni sugli spazi comuni, di circolazione e di servizio. Per limitare il possibile gap introdotto dalla semplificazione si propone di suddividere la superficie netta utile della scuola in due settori: gli "spazi didattici", "altri ambienti". Il tempo di ore a pieno carico (t_L) può essere calcolato per gli "spazi didattici" ed esteso anche agli "altri ambienti". Con la medesima distinzione sarà possibile calcolare la potenza specifica (P_L), sulla base dei rispettivi requisiti di illuminamento richiesti per le due categorie di ambiente (diversi in quanto destinati a funzioni differenti), oppure sulla base dell'osservazione dei corpi illuminanti e delle sorgenti luminose installate (per le valutazioni ante operam).

Come per gli altri canali di consumo, anche in merito all'illuminazione artificiale, è auspicabile una campagna di valutazione del metodo, mediante una analisi di sensitività su alcuni dei parametri in ingresso al calcolo per valutare ulteriori processi di ottimizzazione. In questa analisi è consigliato disporre di dati reali relativi ad impianti di illuminazione installati in edifici scolastici, di cui si conoscono le domande di energia fornita per il loro funzionamento.

3.4 Limiti e possibili sviluppi della metodologia

Come emerso dall'analisi bibliografica diverse sono le metodologie presenti in letteratura che permettono, attraverso l'ingresso di un numero ridotto di input di stimare la prestazione energetica di un edificio. A monte dell'applicazione dei metodi (analisi di regressione multipla, albero decisionale, ecc.) c'è sempre una accurata selezione delle variabili che sono necessarie per descrivere un particolare fenomeno fisico.

Diverse sono le pubblicazioni che mettono a confronto i diversi metodi e provano a quantificarne l'errore. Questo a testimonianza che tali metodologie sono tutt'ora oggetto di studio e la loro affidabilità è principalmente legata alla raccolta di dati a disposizione dell'operatore che esegue l'analisi. Questo implica il fatto che, applicazione di algoritmi informatici, piuttosto che metodi che si basano su analisi statistiche e matematiche necessitano di corposi database sui quali applicare le rispettive logiche di calcolo. Ad oggi risulta difficile immaginare un database nazionale condiviso di edifici scolastici, composto da un numero di record significativi e di cui si abbia il controllo della qualità del dato in esso riportato. La sua costruzione potrebbe essere un utile passaggio per permettere una più agevole e affidabile applicazione di suddette procedure.

In attesa di questo passaggio, nel presente rapporto si è voluto proporre un quadro metodologico semplificato per il calcolo delle prestazioni energetiche di un edificio. Nella sua costruzione si è voluto tener conto non solo degli usi finali dipendenti dalle variabili climatiche esterne, ma anche di tutti quegli usi necessari per il corretto e completo esercizio dell'edificio.

Questa direzione implica che, a differenza dei metodi di regressione multipla o ad albero decisionale, il numero di dati di ingresso aumenta considerevolmente, in quanto l'edificio viene quanto più descritto e modellato rispettando il più possibile la fisica che governa lo scambio di energia tra ambiente interno ed ambiente esterno, e non solo. Il calcolo viene ulteriormente articolato in quanto, come più volte ribadito all'interno del rapporto, si vuole contestualizzare il comportamento energetico dell'istituto scolastico sulla base del suo profilo di uso. Una scuola è caratterizzata da una importante variabilità di gestione che dipende dall'occupazione, dalla programmazione dei sistemi impiantistici, da come gli ambienti vengono utilizzati. L'obiettivo è migliorare la stima dei risparmi energetici conseguibili a fronte di determinati interventi di efficientamento energetico che siano verosimili e confrontabili con i consumi reali.

Questo sforzo metodologico implica che l'operatore che utilizzerà la futura piattaforma, qualora quest'ultima venga implementata secondo le logiche proposte nel presente rapporto, dovrà avere un livello di preparazione tecnica e scientifica adeguati allo strumento. I dati di ingresso sono, come per tutti i metodi, descrittori fisici importanti per la precisione e corretta quantificazione dei risparmi.

In questa attività, una possibile barriera nell'applicazione della metodologia è costituita dalla carenza di informazioni a disposizione dell'operatore per la corretta definizione delle caratteristiche fisiche di involucro e di impianto, soprattutto sugli edifici esistenti (trasmissione termica dei componenti opachi e trasparenti, proprietà ottiche e termiche degli elementi trasparenti, ecc.). Inoltre l'operatore dovrà avere piena conoscenza delle modalità e dei profili di uso e gestione dell'edificio, o quantomeno la sensibilità nell'ipotizzare tali profili qualora queste informazioni siano di difficile reperimento.

Non sono state volutamente introdotte semplificazioni nella definizione geometrica delle superfici disperdenti dell'edificio in quanto si ritiene che la corretta definizione dell'involucro edilizio sia di sostanziale importanza nella quantificazione dei termini di dispersione e degli apporti solari. Nel metodo non sono considerati il contributo dei ponti termici e la capacità di accumulo delle masse dell'edificio.

Un'altra semplificazione introdotta è quella relativa alla definizione delle efficienze di impianto. Queste sono ipotizzate, almeno in questa prima fase di proposta, mediante l'uso di rendimenti nominali. Questi rendimenti variano in funzione della tipologia del sistema di regolazione, distribuzione, emissione e generazione. Solo un complesso e dettagliato monitoraggio dei singoli sottosistemi impiantistici può dare informazioni sull'effettiva prestazione del sistema impiantistico. Ulteriormente, in questa fase, si è ritenuto poco coerente proporre l'implementazione di complessi algoritmi di calcolo per ciascuna tipologia impiantistica.

Per tali ragioni, è auspicabile proporre una fase di test in cui la metodologia proposta viene applicata ad uno o più casi studio per verificarne la precisione e lo scostamento rispetto ai reali risparmi dell'edificio. Per far ciò è necessario avere a disposizione casi studio in cui siano stati monitorati i consumi prima e dopo l'intervento di efficienza, oltre a tutte le informazioni tecniche che definiscono e caratterizzano tale intervento.

Durante questa fase di test del metodo è importante prevedere una analisi di sensitività su alcuni dei dati di ingresso richiesti. Questa attività permette di individuare eventuali ulteriori semplificazioni della procedura migliorando l'applicabilità del calcolo da parte di un operatore esterno.

Rimangono ancora aperti i canali di integrazione delle rinnovabili, quantomeno quelli associati all'installazione di impianti fotovoltaici. Anche la quantificazione del baseload è da approfondire. Nei baseload sono inclusi i consumi elettrici di base che ha l'edificio, non legati agli impianti di climatizzazione, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione artificiale, indipendenti dal clima esterno e dall'effetto dell'occupante (vending machine, postazioni informatiche, server, sistemi di emergenza, ecc.). In alcuni casi il baseload rappresenta una quota non trascurabile dell'energia elettrica fornita dall'edificio. Inoltre conoscere il baseload permette di individuare eventuali malfunzionamenti e consumi indesiderati generati da inefficienze, guasti, obsolescenza o errata regolazione dei componenti di impianto.

4 Conclusioni

La definizione di procedure semplificate per la stima dei risparmi energetici di un edificio scolastico a fronte di determinati canali di intervento di efficientamento energetico non è cosa semplice. È ben nota la complessità delle equazioni che governano il bilancio energetico dell'edificio. Così come sono note le oggettive difficoltà nel reperire informazioni sulla caratterizzazione fisica dei componenti edilizi, in particolare in un edificio esistente. Determinare la prestazione energetica di un edificio non implica automaticamente avere una indicazione dei suoi consumi. Molto spesso i consumi sono legati a dinamiche poco rappresentate all'interno dei bilanci energetici definiti dagli standard. L'effetto dell'occupante che ha sulla gestione e conduzione dell'edificio può portare a risultati completamente diversi da quelli ricavabili attraverso l'applicazione delle procedure definite dalle norme. Nell'ottica di stimare risparmi energetici che siano quanto più possibile coerenti con i valori reali non è possibile non considerare l'occupante e come la presenza dell'occupante alteri il comportamento dell'edificio, non solo su base stagionale ma anche su base giornaliera e sub giornaliera.

In letteratura sono presenti metodologie di stima che calcolano la prestazione energetica dell'edificio sulla base di pochi dati di ingresso. La maggior parte di questi metodi si concentrano sulla quantificazione delle prestazioni energetiche per quegli usi finali che sono influenzati dalle condizioni climatiche esterne (tipicamente la domanda di energia per riscaldamento). Tali metodi sono ancora oggi in valutazione e soggetti a possibili miglioramenti. La loro precisione è legata al numero ed alla qualità del database di ingresso. Maggiore sarà il numero di record e la qualità del dato di ingresso, migliore sarà l'affidabilità e la stima del risultato finale.

Ad oggi sembrerebbe che non siano a disposizione database nazionali pubblici, sufficientemente popolati e dove la qualità del dato registrato sia stata validata da un ente/soggetto competente. L'assenza di questo database rende più difficile l'applicazione di metodi statistici e di algoritmi informatici. La creazione di questa raccolta dati potrebbe essere un utile supporto nell'ottica di applicare in futuro tale tipologie di calcolo.

Per gli scopi del presente rapporto è stato proposto un quadro metodologico, che unitamente ad una scheda di raccolta dati, permetterebbe di ottenere una stima dei risparmi energetici a seguito di interventi di riqualificazione parziale o totale di un edificio scolastico. Prima dell'applicazione su larga scala del quadro metodologico presentato sarà necessaria una fase di validazione di ogni singolo canale di uso finale. Sarebbe opportuno che la fase di test sia applicata ad una serie di casi reali di cui si hanno a disposizione tutte le informazioni inerenti l'edificio scolastico e le sue prestazioni a monte ed a valle di un intervento di efficientamento energetico.

Nella definizione del quadro metodologico si è tenuto conto delle variabilità di occupazione e delle modalità di gestione e conduzioni che caratterizzano un edificio scolastico nel tempo. Si ritiene che tale ulteriore sforzo nella definizione della struttura del metodo aumenti la qualità e la precisione nella modellazione dell'edificio nell'ottica di avvicinarsi il più possibile alla definizione di risparmi energetici coerenti con lo specifico edificio.

5 Riferimenti bibliografici

1. UNI/TS 11300-1, "Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale".
2. UNI/TS 11300-2, "Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria".
3. UNI EN ISO 13790, "Prestazione energetica degli edifici: Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento".
4. UNI EN 15193, "Prestazione energetica degli edifici Requisiti energetici per illuminazione".
5. Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia e successive modifiche ed integrazioni.
6. Decreto interministeriale 26 giugno 2015, "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici" e relative allegati.
7. M.A. Piette, L.W. Wall, B.L. Gardien, "Measured Performance", ASHRAE J. (January 1986), 72-78
8. D. Marchio, A. Rabl, "Energy-Efficient Gas-Heated Housing in France: Predicted and Observed Performance", Energy and Building, 17 (1991), 131-139.
9. S.P. Corgnati, F. Ariaudo, L. Rollino, "definizione di un indice semplificato per la previsione dei consumi per il riscaldamento di un patrimonio edilizio esistente a destinazione d'uso prevalentemente scolastica", III Congresso Nazionale AIGE Parma (2009).
10. F. Ariaudo, S.P. Corgnati, M. Filippi, "Heating consumption assessment and forecast of existing buildings: investigation on Italian school building", Proceedings of the 5th IBPC, Kyoto (2012), 929-936.
11. A. Capazzoli, D. Grassi, F. Causone, "Estimation models of heating energy consumption in schools for local authorities planning", Energy and Buildings 105 (2015), 302-313.
12. Z. Yu, F. Haghighat, B.C.M. Fung, H. Yoshino, "A decision tree method for building energy demand modeling", Energy and Buildings 42 (2010), 1637-1646.
13. L. Magnier, F. Haghighat, "Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network", 45 (2010), 739-746.
14. J.F. Kreider, P.S. Curtiss, A. Rabl, "Heating and Cooling of Building", Mc Graw Hill Editore, 2002
15. E-TOOL Handbook, user's manual for energy rating of existing building, IEE Project. www.e-tool.org
16. UNI EN ISO 15927-6, "Hygrothermal performance of building – Calculation and presentation of climatic data – part 6: Accumulated temperature difference (degree-days)"
17. Decreto Ministeriale 10 marzo 1977, "Determinazione delle zone climatiche e dei valori minimi e massimi dei relativi coefficienti volumici globali di dispersione termica"
18. Decreto del Presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993, "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10."
19. J.D.N. Nisson, G. Dutt, "the Superinsulated Home Book", Wiley, New York (1985)
20. D.G. Erbs, S.A. Klein, W.A. Beckman, "Estimation of Degree-Days and Ambient Temperature Bin Data from Monthly-Average Temperature", ASHRAE J., June (1983), 60-65.
21. V. Martinaitis, "Analytic calculation of degree-days for the regulated heating season", Energy and Building, 28 (1998), 185-189.
22. R. Armani, L. Pagliano, M. Pietrobon, S. Erba, "Definizione di indicatori prestazionali energetico-ambientali per la caratterizzazione degli edifici scolastici", Enea, Par2016
23. Progetto Air@School, Associazione Culturale Energia di Classe

24. M. Zinzi, A. Mangione, G. Fasano, "Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici.", Enea, Par2013
25. P. Waide, S. Tanishima, "Light's labour's lost: policies for energy efficient lighting", OECD/IEA (2006), Paris.
26. W. Pohl, M. Werner, "Lighting, comfort and energy and evaluation of the recommendations of EN 15251", Intell Energy Eur (2010).
27. F. Linhart, JL. Scartezzini, "Evening office lighting – visula comfort vs. energy efficiency vs. performance?", Build Environ, 46(5) (2011), 981-989.
28. DHW. Li, KL Cheung, SL Wong, TNT Lam, "An analysis of energy-efficient light fitting and lighting controls", Appl Energy, 87(2) (2010), 558-567.
29. SIA 387/4:2017, "Elettricità negli edifici – Illuminazione: calcolo e requisiti".
30. Ashrae's guideline 14-2002 for measurement of energy and demand savings: how to determine what was really saved by the retrofit.
31. UNI 10349-1:2016, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata"

6 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

eERG è il Gruppo di ricerca sull'efficienza negli usi finali dell'energia, attivo dal 1996 presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano. L'approccio interdisciplinare di eERG connette ricerca in nuove tecnologie e in fisica degli edifici, analisi economica e delle politiche energetiche, audit e progettazione d'interventi, e comprende: ricerca scientifica e tecnologica svolta in partnership con gruppi accademici e agenzie europee e statunitensi; trasferimento dei risultati verso l'applicazione, attraverso cooperazione con l'industria, istituzioni italiane ed europee, enti locali; didattica universitaria e post-universitaria e attività di formazione e divulgazione.

eERG è stata ed è attualmente impegnata in attività di ricerca sui edifici Passive House e nearly Zero Energy, partecipando a diversi progetti di ricerca europei e internazionali, occupandosi di monitoraggio di edifici a energia zero, supporto all'ottimizzazione dei controlli per impianti ed edifici, simulazione energetica dinamica, supporto alla progettazione, applicazione di tecniche di ottimizzazione per la progettazione.

Il gruppo, grazie alla sua dotazione strumentale, è in grado di effettuare lo studio e l'analisi delle condizioni di benessere degli ambienti confinati (benessere igro-termico, benessere visivo, qualità dell'aria ed efficienza dei sistemi di ventilazione meccanica incluso la rilevazione di inquinanti come TVOC, formaldeide, CO₂, SO₂, NO₂, O₃, particolati).

Per maggiori informazioni si invita a consultare il sito internet del gruppo all'indirizzo: www.eerg.it.

Il direttore di eERG, **Lorenzo Pagliano**, laureato in Fisica *cum laude*, Dottore di Ricerca in Energetica, è stato Visiting Researcher presso il Lawrence Berkeley Laboratory (California, USA). Sue aree di ricerca sono gli edifici a bassa energia, il comfort termico e l'analisi delle politiche energetiche. Tiene il corso di Fisica dell'Edificio presso la facoltà di Ingegneria Edile e Architettura è Direttore del Master RIDEF, è membro del Comitato editoriale della rivista Energy Efficiency (Springer) e Advances in Building Energy Research, è membro del Consiglio Direttivo dello European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE).

Marco Pietrobon, laureatosi a pieni voti in Ingegneria Edile presso il Politecnico di Milano, si occupa di simulazioni termo-energetiche di edifici e di monitoraggio in situ delle prestazioni energetiche di edifici e impianti e delle condizioni di comfort degli ambienti interni. Nell'ambito di progetti di ricerca europei e di consulenza ha approfondito tematiche e soluzioni per edifici a zero energia e passive house. Si occupa anche della valutazione di strumenti politici a sostegno dell'efficienza energetica in edilizia.

Roberto Armani, laureato in Ingegneria Edile presso il Politecnico di Milano nel 2007. Da sempre svolge l'attività della libera professione specializzandosi in efficienza energetica degli edifici, in acustica ambientale ed architettonica. Dal 2009 collabora con il gruppo di ricerca eERG diretto dal Professor Lorenzo Pagliano lavorando su progetti europei, occupandosi di misure di comfort degli ambienti interni, di simulazione energetica in regime dinamico degli edifici e di cost optimal design negli interventi edilizi (nuovi o ristrutturati).

Silvia Erba, PhD in Ingegneria dei Sistemi Edilizi, svolge attività di ricerca presso il Politecnico di Milano dal 2012, prima collaborando con il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito e dal 2015 con il gruppo di ricerca eERG presso il Dipartimento di Energia. Le aree di ricerca sono edifici a energia quasi zero, studio del comportamento termofisico di edifici storici e di nuova costruzione, comfort termico e simulazioni energetiche in regime dinamico. Esperienze nel campo della diagnostica e delle indagini non distruttive, in particolare termografia all'infrarosso.

7 ALLEGATO 1: SCHEDA DI INDAGINE E DI RACCOLTA DATI PER EDIFICI SCOLASTICI

Allegato 1

SCHEMA DI INDAGINE E DI RACCOLTA DATI PER EDIFICI SCOLASTICI

LEGENDA

-  Campo indispensabile per l'implementazione della procedura.
-  Campo consigliato per analisi e verifiche di maggior dettaglio.
-  Campo facoltativo. L'omessa compilazione non compromette l'applicabilità del metodo.

I – DATI GENERALI

-  Nome Azienda/Organizzazione:
-  Numero di unità immobiliari:
-  Regione:
-  Comune:
-  Provincia:
-  Indirizzo:
-  CAP:
-  Coordinate GIS
-  Posizione dell'immobile rispetto al contesto urbano (in città/ in periferia/ isolato o aperta campagna)
-  Dati catastali:
-  Zona climatica e GG reali:
-  Zona climatica e GG convenzionali:

Anno di costruzione:
Se non si conosce l'anno indicare il periodo presumibile:

- Ante 1945
- 1946-1980
- 1981-1991
- 1992- 2004
- Post 2005

Numero di studenti iscritti

Orario didattico (ora di ingresso e uscita degli studenti)

Ci sono lezioni nelle ore pomeridiane, se si per quanti studenti (% rispetto al numero di iscritti)

Stato di conservazione complessivo dell'edificio

- ottimo
- buono
- mediocre
- cattivo

Struttura edificio:

- Muratura portante
- Misto cemento armato e muratura
- Struttura in cemento armato e pannelli prefabbricati
- Acciaio e muratura
- Acciaio e pannelli prefabbricati
- Blocchi cavi di calcestruzzo
- Blocchi in calcestruzzo cellulare autoclavato
- Legno

In caso di palestra e auditorium collegate all'edificio scolastico, ma servite da impianti dedicati o da medesimo impianto adeguatamente partizionato e monitorato, le schede seguenti andrebbero distinte per le tre destinazioni 'uso: scuola, palestra, auditorium.

II – CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E DIMENSIONALI

Numero di piani totali:

Numero di piani fuori terra:

- Piano (semi)interrato climatizzato
 - Piano (semi)interrato non climatizzato
 - Edificio totalmente su pilotis
 - Edificio parzialmente su pilotis
- Percentuale su pilotis (%):

Numero di corpi scala:

Posizione del corpo scala i-esimo: Interno - Esterno - Di Sicurezza (cancellare quelli non corretti)

Superficie utile riscaldata (m²):

Superficie utile riscaldata con set-point 20°C(m²):

Superficie utile riscaldata con set-point inferiori per zone comuni (m²) (specificare set point di temperatura):

Superficie utile del piano tipo (m²):

Superficie utile raffrescata (m²):

Superficie utile dedicata a spazi didattici (m²):

Volume lordo riscaldato (m³):

Volume lordo riscaldato con set-point 20°C(m²):

Volume lordo riscaldato con set-point inferiori per zone comuni (m²) (specificare set point di temperatura):

Volume lordo raffrescato (m³):

Volume lordo dedicato a spazi didattici (m²):

Volume netto riscaldato (m³):

Volume netto riscaldato con set-point 20°C(m²):

Volume netto riscaldato con set-point inferiori per zone comuni (m²) (specificare set point di temperatura):

Volume netto raffrescato (m³):

Volume netto dedicato a spazi didattici (m²):

Superficie disperdente totale (m²):

II – DATI ENERGETICI

Servizi Energetici presenti:

- Climatizzazione invernale
- Climatizzazione estiva
- Ventilazione meccanica
- Produzione ACS
- Illuminazione artificiale
- Trasporto di persone o cose

Attestato Prestazione Energetica:

- SI NO

In caso di risposta affermativa indicare:

Indice della prestazione energetica globale non rinnovabile (kWh/m²a):

Indice della prestazione energetica globale rinnovabile (kWh/m²a):

Emissioni di CO₂ (kg/m²a):

Classe energetica:

Fonti energetiche utilizzate e uso in condizioni standard (con indicazione dell'unità di misura). Per ogni fonte energetica indicare i servizi e gli usi che alimenta (ad esempio: illuminazione, riscaldamento, ventilazione, ecc):

- Energia elettrica da rete:
- Gas naturale:
- GPL:
- Carbone:
- Gasolio e olio combustibile:
- Biomasse solide:
- Biomasse liquide:
- Biomasse gassose:
- Solare fotovoltaico:
- Solare termico:
- Eolico:

- Teleriscaldamento:
- Teleraffrescamento:
- Altro (specificare):

Dati di consumo reali (possibilmente per un periodo di almeno tre anni):

Ripetere i quadri che seguono per ogni anno considerato

USI ELETTRICI

- Uso di energia elettrica totale* (kWh/a):
- Energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile i-esima (kWh/a):
- Energia elettrica esportata da fonte rinnovabile i-esima (kWh/a):
- Energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile i-esima e utilizzata sul posto (kWh/a):
- Energia elettrica importata da rete totale (kWh/a):
- Uso di energia elettrica per climatizzazione invernale (kWh/a):
- Uso di energia elettrica per climatizzazione estiva (kWh/a):
- Uso di energia elettrica per ventilazione meccanica (kWh/a):
- Uso di energia elettrica per illuminazione artificiale (kWh/a):
- Uso di energia elettrica per trasporto di persone o cose (kWh/a):
- Uso di energia elettrica per lavastoviglie (kWh/a):
- Uso di energia elettrica per lavatrice (kWh/a):
- Costo medio annuale (€):

USI TERMICI

- Uso di energia termica totale prodotta da fonte i-esima (quantità in unità di misura pertinente):
- Uso di energia termica prodotta da fonte i-esima per climatizzazione invernale (quantità in unità di misura pertinente):
- Uso di energia termica prodotta da fonte i-esima per produzione di acqua calda sanitaria (quantità in unità di misura pertinente):
- Uso di energia termica prodotta da fonte i-esima per ventilazione meccanica (quantità in unità di misura pertinente):
- Uso di energia termica prodotta da fonte i-esima per uso cucina (quantità in unità di misura pertinente):
- Energia termica totale prodotta da fonte rinnovabile i-esima (kWh/a):
- Energia termica rinnovabile da fonte i-esima per climatizzazione invernale (kWh/a):
- Energia termica rinnovabile da fonte i-esima per produzione di acqua calda sanitaria (kWh/a):
- Uso di energia termica rinnovabile da fonte i-esima per ventilazione meccanica (kWh/a):

-  Energia termica rinnovabile da fonte i-esima per uso cucina (kWh/a):
-  Gradi Giorno
-  Costo medio annuale (€):

ACQUA

-  Consumo medio annuo (m³):
-  Consumo per acqua calda sanitaria (m³):
-  Consumo per cucina (m³)
-  Consumo per irrigazione verde (se presente) (m³)
-  Costo medio annuale (€):

III – DATI DI INVOLUCRO

[Si prevedono diverse modalità di input, alle quali è possibile associare analisi energetiche con minore o maggiore livello di accuratezza. Scelto il livello di inserimento dati, è necessario cancellare le modalità non selezionate]

Livello 0

<input type="checkbox"/>	Superficie disperdente totale (m):
<input type="checkbox"/>	Descrizione qualitativa di*:
<input type="checkbox"/>	muri esterni
<input type="checkbox"/>	solaio di base
<input type="checkbox"/>	copertura
<input type="checkbox"/>	serramenti

*indicare presunte stratigrafie, eventuale presenza di isolante termico, se possibile stima della trasmittanza termica

INVOLUCRO OPACO

Livello 1

<input type="checkbox"/>	Superficie disperdente totale (m ²):
<input type="checkbox"/>	Superficie disperdente verso esterno (m ²):
<input type="checkbox"/>	Superficie disperdente verso terreno (m ²):
<input type="checkbox"/>	Superficie disperdente verso solaio di base non riscaldato (m ²):
<input type="checkbox"/>	Superficie disperdente verso sottotetto non riscaldato (m ²):
<input type="checkbox"/>	Superficie disperdente verso ambienti non riscaldati (vani scale, locali tecnici, ecc) (m ²):
<input type="checkbox"/>	Trasmittanza termica muro esterno (W/m ² K)
<input type="checkbox"/>	Trasmittanza termica solaio di base (W/m ² K)
<input type="checkbox"/>	Trasmittanza termica copertura (W/m ² K)
<input type="checkbox"/>	Trasmittanza termica superfici verso ambienti non riscaldati (vani scale, locali tecnici, ecc) (W/m ² K) :

Livello 2

Codice	Descrizione	U (W/m ² K)	Orientamento	Superficie (m ²)	Confina con*
1					
...					
...					
n					

*1 aria esterna, 2 vano non riscaldato, 3 sottotetto non riscaldato, terreno, altro (specificare)

INVOLUCRO TRASPARENTE

Livello 1

Superficie disperdente totale (m ²):
Trasmittanza termica serramenti (W/m ² K):
Descrizione dei serramenti:
Telaio:
<input type="checkbox"/> Legno, <input type="checkbox"/> Alluminio, <input type="checkbox"/> Altro metallo, <input type="checkbox"/> PVC, <input type="checkbox"/> Altro (specificare)
Sistema trasparente:
<input type="checkbox"/> Vetro singolo, <input type="checkbox"/> Doppio vetro, <input type="checkbox"/> Doppio vetro basso emissivo, <input type="checkbox"/> Triplo vetro, <input type="checkbox"/> Altro (spec.)
Sistema di schermatura solare principale:
<input type="checkbox"/> Tenda, <input type="checkbox"/> Tapparella, <input type="checkbox"/> Persiana, <input type="checkbox"/> Lamelle rangisole, <input type="checkbox"/> Altro (specificare)
Posizione della schermatura rispetto al vetro
<input type="checkbox"/> Interna all'ambiente, <input type="checkbox"/> Esterna, <input type="checkbox"/> Nell'intercapedine del vetrocamera, <input type="checkbox"/> Altro (specificare)
Presenza di aggetti fissi o sporti che generano ombre portate sulle superfici trasparenti
Sì <input type="checkbox"/>
No <input type="checkbox"/>

Livello 2

Codice	Descrizione (caratteristiche parte opaca e trasparente)	U (W/m ² K)	g (%)	τ (%)	Orientamento	Superfici e (m ²)
1						
....						
....						
n						

IV – Impianto termico

Impianto per:

1. Riscaldamento
2. Riscaldamento + ACS

[Se la risposta è 1, la sottoscheda IV va compilata separatamente per l'impianto di produzione ACS, con titolo IVbis- Impianto produzione ACS, se esistente]

Tipo di caldaia utilizzata (se più di una indicare per ognuna):

- Ha più di 15 anni di esercizio
Due stelle **
Tre stelle ***
Quattro stelle ****

Anno di installazione:

Rendimento di combustione (%):

[Riportare il dato come indicato sul libretto di impianto o centrale, o sul libretto di uso e manutenzione della caldaia.]

Combustibile utilizzato:

- Gas metano
Gasolio
GPL
Carbone
Altro (specificare):

Potenza della caldaia [kWt]:

[Riportare il dato come indicato sulla targhetta della caldaia, sul libretto di impianto o centrale, o sul libretto di uso e manutenzione della caldaia.]

Interventi di manutenzione negli ultimi tre anni, descrizione e costo:

Contatore di calore

Sì

No

Regolazione climatica della temperatura?

Sì

No

Terminali di emissione del calore:

Termosifoni

- numero totale:

Pannelli radianti

Ventilconvettori (Fan-Coil)

- numero totale:

- potenza termica totale complessiva (kWt):

- potenza frigorifera totale complessiva (kWf):

- anno di installazione:

Altro (specificare):

Circolatori/pompe

Pompa di ricircolo Sì

No

Potenza del circolatore [kWe]:

[Riportare il dato come indicato sulla targhetta della pompa, sul libretto di impianto o centrale. Ripetere il campo per ogni tipologia di circolatore asservito all'impianto termico]

Numero di pompe delle stesse caratteristiche:

Sono presenti degli accumuli termici?

Sì

No

Se sono presenti degli accumuli termici, sono coibentati?

Sì

No

Capacità di accumulo in litri :

V – Altri impianti a integrazione dell'impianto di riscaldamento

[In caso di impianto dedicato a produzione ACS, la sottoscheda V va compilata separatamente per tale impianto, con titolo Vbis- Altri impianti a integrazione dell'impianto di riscaldamento ACS]

Ulteriore impianto di produzione di acqua calda/riscaldamento integrato alla/e caldaia/e

Sì

No

- **Se sì**, quale tipologia di impianto è:

Cogenerativo

Potenza elettrica (kWe)

Potenza termica (kWt):

Pompa di calore

Potenza elettrica (kWe)

Potenza termica (kWt):

COP:

Biomasse

Potenza elettrica (kWe):

Potenza termica (kWt):

Geotermico

Potenza elettrica (kWe)

Potenza termica (kWt):

COP:

Solare termico

Superficie netta (m²):

Tipo installazione (tetto piano, falda, ecc):

Inclinazione rispetto all'orizzontale (°):

Orientamento: N S E O NE NO SE SO

Accumulo (litri):

Fluido di scambio:

Acqua

Glicole

Altro (specificare):

E' presente un impianto di ventilazione meccanica?

Sì

No

Numero di ore/giorno di utilizzo:

SFP Specific fan Power (da scheda tecnica)

Potenza assorbita dai ventilatori (da scheda tecnica)

Portata di ventilazione durante le ore di occupazione (m³/h)

Portata di ventilazione nelle ore notturne o nei giorni festivi (m³/h)

Presenza di un recuperatore di calore

Se presente un recuperatore di calore indicare l'efficienza di recupero (%)

VI – Gestione idrica

Sono presenti:

- | | | |
|---|--|--------------------------|
|  | - Regolatori di flusso per rubinetti | |
| | Sì | <input type="checkbox"/> |
|  | No | <input type="checkbox"/> |
| | - Impianto di recupero delle acque piovane | |
|  | Sì | <input type="checkbox"/> |
| | No | <input type="checkbox"/> |
|  | - Impianto di recupero delle acque grigie | |
| | Sì | <input type="checkbox"/> |
|  | No | <input type="checkbox"/> |

VII – Impianti elettrici

IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE

 **Livello 1. Dato aggregato per tutto l'edificio**

 **Livello 2. Dato disaggregato per zone omogenee per servizio di illuminazione. In questo caso le informazioni richieste devono essere fornite per ogni zona, che deve essere indicata in modo univoco (e.g. zona corridoi, palestre). Quantomeno suddividere le superfici didattiche da tutti gli altri spazi dell'edificio**

Per ogni tipologia di corpo illuminante (lampada+plafoniera) installato indicare:

- | | |
|---|--|
|  | Numero: |
|  | Tipo (incandescenza, alogena, led, etc.): |
|  | Task visivo° (lx) |
|  | Potenza totale* (kW): |
|  | Classe energetica (se disponibile) oppure efficacia luminosa (lm/W): |



Anno di produzione:

Illuminazione interna/esterna

Numero di ore/giorno di utilizzo:

° Non necessario in caso di livello 1

*includere la potenza assorbita da eventuali reattori

Per un'aula didattica di riferimento:



Numero:

Tipo (incandescenza, alogena, led, etc.):

Task visivo° (lx)

Potenza totale* (kW):

Classe energetica (se conosciuta):

Anno di produzione:

Numero di ore/giorno di utilizzo:

Altezza netta interna dell'aula

Larghezza della parete ospitante le finestre

Profondità dell'aula

Distanza tra architrave della finestra e soffitto

Distanza tra altezza del corpo illuminante e altezza banchi

Frequenza di manutenzione e pulizia (anni)

Tonalità di colore delle superfici interne (chiaro, medio, pastello, scuro)

Tipologia di schermatura solare applicata alle finestre (tenda interna, tenda esterna, veneziane interne/esterne, altro...)

Presenza di finestre a parete (si/no)

Presenza di finestre a soffitto (si/no)

Assenza di finestre (si/no)

Sensori di presenza

Sensori di autospegnimento

Regolazione automatica del flusso luminoso

ASCENSORI

 Numero:

Ascensore i-esimo:



Tipologia:



Potenza (kW):



Classe energetica (se conosciuta):



Anno di produzione:



Numero di ore/giorno di utilizzo:

MOTORI ELETTRICI

 Numero:

Motore i-esimo:



Tipologia:



Potenza (kW):



Classe energetica (se conosciuta):



Anno di produzione:



Numero di ore/giorno di utilizzo:

FORNI ELETTRICI

 Numero:

Forno i-esimo:



Tipologia:



Potenza (kW):



Classe energetica (se conosciuta/disponibile):



Anno di produzione:



Numero di ore/giorno di utilizzo:

FRIGORIFERI

 Numero:

Frigorifero i-esimo:

 Tipologia:

 Potenza (kW):

 Classe energetica (se conosciuta/disponibile):

 Anno di produzione:

LAVATRICI

 Numero:

Lavatrice i-esima:

 Tipologia:

 Potenza (kW):

 Classe energetica (se conosciuta):

 Anno di produzione:

 Numero di lavaggi a settimana:

LAVASTOVIGLIE

 Numero:

Lavastoviglie i-esima:

 Tipologia:

 Potenza (kW):

 Classe energetica (se conosciuta):

 Anno di produzione:

 Numero di lavaggi a settimana:

VENDING MACHINE

 Numero:

Vending machine i-esima:

 Tipologia:

 Potenza (kW):

 Classe energetica (se conosciuta):

 Anno di produzione:

 Dimensioni (larghezza x profondità x altezza):

SERVER

 Numero:

Server i-esimo:

 Tipologia:

 Potenza (kW):

POSTAZIONI INFORMATICHE AMMINISTRATIVE (PC)

 Numero:

 Numero di ore/giorno di utilizzo:

POSTAZIONI INFORMATICHE PER SCOPI DIDATTICI (PC)

 Numero:

 Numero di ore/settimana di utilizzo:

IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVA

[Campo da ripetere per ogni sistema di climatizzazione indipendente]

- numero totale di unità:
- superficie climatizzata:
- potenza complessiva (kW):
- anno di installazione:
- numero di ore/giorno di utilizzo:
- Potenza elettrica (kWe)
- Potenza frigorifera (kWt):
- EER:

VII – Impianti di gestione automatica/intelligente

- Tipologia di sistema BEMS presente
- Intelligenza distribuita
- PLC
- Misto

- Tipologia Distribuzione
- Tipologia sensori -attuatori
- Tipologia Controllo per riscaldamento
 - Zona
 - Stanza
 - Edificio

- Tipologia Controllo per raffrescamento
 - Zona
 - Stanza
 - Edificio

- Temperature di set point degli impianti

- Temperatura di set point impostata in riscaldamento (°C)
- Temperatura effettivamente misura negli ambienti in riscaldamento(°C)
- Ora di accensione dell'impianto (°C)
- Ora di spegnimento dell'impianto (°C)
- L'impianto di riscaldamento funziona anche di notte e nei giorni festivi (si/no)
- E' presente una attenuazione di notte e nei giorni festivi (si/no)
- Temperatura di set point impostata in riscaldamento in attenuazione notturna o nei giorni festivi (°C)
- Temperatura di set point impostata in raffrescamento (°C)
- Temperatura effettivamente misura negli ambienti in raffrescamento (°C)
- Numero di ore medie giornaliere di attivazione dell'impianto di raffrescamento

III – ALTRI IMPIANTI PER PRODUZIONE DA FONTI RINNOVABILI

Solare termico

- Superficie netta (m²):
- Tipo installazione (tetto piano, falda, ecc):
- Inclinazione rispetto all'orizzontale (°):
- Orientamento: N S E O NE NO SE SO
- Accumulo (litri):
- Fluido di scambio:
- Acqua
- Glicole
- Altro (specificare):

Impianto fotovoltaico

- Potenza totale (kWp):
- Produzione totale (kWh/anno):

[Nel caso di impianto realizzati da gruppi di collettori differenti per: esposizione, orientamento e materiali, le voci seguenti dovrebbero essere disaggregate per gruppi omogenei]

- Superficie netta (m²):
- Tipo installazione (tetto piano, falda, ecc):
- Inclinazione rispetto all'orizzontale (°):
- Orientamento: N S E O NE NO SE SO
- Tecnologia:
 - Silicio monocristallino
 - Silicio policristallino
 - Silicio amorfo
 - Altro (specificare):

- Impianto eolico
- Potenza totale (kW):
- Produzione totale (kWh/anno):

[Nel caso di impianto realizzati più aerogeneratori, indicare i dati per ciascuno di essi]

- Altro (specificare):
- Descrizione della tecnologia:
- Potenza (kW):
- Produzione (kWh/anno):

- Superfici solarizzabili:
 - Superfici disponibili per l'installazione di tecnologie di fonti rinnovabili:
 - Sì
 - No

- **Se sì**, indicare:
 - In copertura m² (circa):
 - In facciata m² (circa):
 - A terra m² (circa):

B. MONITORAGGIO PARAMETRI PER PRESTAZIONI ENERGETICHE E AMBIENTALI

I – IMPIANTI TERMICI

 Livello 0
Consumo di gas al contatore - lettura oraria (dato aggregato per tutti gli usi termici: riscaldamento, ACS, usi cucina).

 Livello 1
Livello 0 + monitoraggio usi termici sulle linee dedicate a riscaldamento e ACS, ovvero una delle due.

 Livello 2
Livello 1 + monitoraggio degli usi termici per riscaldamento e ACS sui circuiti a servizio di singole zone termiche.

III – IMPIANTI ELETTRICI

 Livello 0
Consumo di elettricità al contatore - lettura oraria (o con risoluzione temporale maggiore) (dato aggregato per tutti gli usi elettrici).

 Livello 1.
Usi di elettricità disaggregati per servizio illuminazione, ausiliari elettrici di impianti termici e forza motrice - lettura oraria (o con risoluzione temporale maggiore) (dato aggregato per tutti gli usi elettrici).

 Livello 2.
Usi di elettricità disaggregati per tutti i servizi energetici - lettura oraria (o con risoluzione temporale maggiore) (illuminazione, forza motrice, ausiliari elettrici (pompe, ventilatori, fan coils), grandi elettrodomestici, movimentazione).

III – IMPIANTI DA FONTI RINNOVABILI

-  Livello 0
Produzione elettrica/termica al contatore dell'impianto. (dato aggregato per tutti gli usi elettrici).
-  Frazione utilizzata dall'edificio e componente ceduta alla rete.

-  Livello 1.
Livello 0 + monitoraggio dell'impianto cui si integra l'energia prodotta da rinnovabile.

III – COMFORT E QUALITA' AMBIENTALE INDOOR

-  Livello 0
Misure spot delle grandezze principali (temperatura e umidità relativa dell'aria, concentrazione di CO₂) in ambienti tipo (aule, laboratori, uffici).

-  Livello 1
Misure ed elaborazioni spot delle grandezze e parametri principali (temperatura, velocità e umidità relativa dell'aria, temperatura media radiante, voto medio previsto, percentuale di insoddisfatti, concentrazione di CO₂, altri gas presenti) in ambienti tipo (aule, laboratori, uffici).

-  Livello 2.
Livello 0 o livello 1 con monitoraggio in continuo.