

# Simulazione energetica dinamica a supporto dell'efficientamento energetico dell'edilizia pubblica

## Dynamic energy simulation in support of energy efficiency in public buildings

MARCO PICCO – MARCO MARENGO

*Dipartimento di Ingegneria, Università degli studi di Bergamo, Dalmine, Italia*

### RIASSUNTO

L'articolo in esame si propone di analizzare un caso studio di applicazione di strumenti di simulazione energetica dinamica nell'ambito del processo di efficientamento energetico di un edificio pubblico esistente adibito ad uso scolastico. In particolare verranno analizzati interventi inerenti l'involucro, le potenze massime necessarie e i generatori installati.

Lo studio avrà inizio mediante la modellazione di tale edificio, una struttura omni-comprendiva caratterizzata da scarse prestazioni energetiche situata in un comune del nord Italia e costruita nei primi del '900 e successivamente ampliata e destinata a polo scolastico e funzioni accessorie, tramite strumenti di simulazione dinamica energetica al fine di identificare un caso baseline e i relativi consumi energetici.

Il modello così identificato verrà impiegato al fine di valutare l'effettiva fattibilità energetica ed economica di interventi di efficientamento energetico rivolti ad involucro ed impianto. Effetti dovuti alla posizione geografica, utilizzo dei locali, comfort e regolamentazione nazionale verranno tenuti in considerazione.

Obiettivo finale di questo lavoro è dimostrare l'effettiva utilità dell'applicazione di strumenti di simulazione dinamica in fase di diagnosi energetica degli edifici e studio di fattibilità di possibili interventi di miglioramento fornendo inoltre un caso di riferimento da poter in seguito riproporre per quanto riguarda edifici pubblici adibiti ad attività scolastica.

### SUMMARY

The present paper proposes to analyze a case study of application of dynamic energy simulation tools as part of the energy efficiency improvement process of an existing public building employed for scholastic use. Particularly, interventions regarding the envelope, the maximum power required and existing generators will be analyzed.

The study will begin with the modeling of such a building, a structure characterized by poor energy performances located in a municipality of northern Italy, built in the early '900 and later enlarged and destined as school center with other ancillary functions,

through dynamic energy simulation tools in order to identify a baseline case and the related energy consumption.

The model thus identified will be used in order to assess the actual energy and economic feasibility of energy efficiency measures aimed at the envelope and systems. Effects due to the geographical location, intended use, comfort and national regulations is taken into account.

The final objective of this work is to demonstrate the usefulness of the application of dynamic simulation tools in the building's energy audit and the feasibility study of possible improvements while also providing a reference case able to be subsequently referenced with regard to the energy efficiency of public school buildings.

Parole chiave: Diagnosi energetica, efficientamento energetico, interventi di riqualificazione energetica.

Key words: Energy Diagnosis, Energy Efficiency, Energy Refurbishment.

## **1. INTRODUZIONE**

Lo spreco di grandi quantità di energia è una pratica irrazionale e, sfortunatamente, ampiamente diffusa. In Italia, ad esempio, le perdite di calore derivanti dalla conversione termoelettrica ammontano a più di 22 MTEP/anno, circa il 53% dell'energia primaria utilizzata. Le perdite legate a industria, utilizzo domestico, trasporti, agricoltura e bunkerraggio marittimo raggiungono un totale di più di 34 MTEP/anno. Se consideriamo poi lo spreco di energia termica negli edifici e le energie rinnovabili disponibili al fine del riscaldamento e raffrescamento diviene evidente che, tra perdite, sprechi e furti rinnovabili abbiamo a che fare con rilevanti quantità di energia termica con un enorme, ed ancora sottovalutato, potenziale (Molocchi, 2011).

Il processo di simulazione energetica consiste nella implementazione di un modello di calcolo computazionale, un edificio virtuale in grado di rappresentare l'edificio reale, al fine ultimo di predire il comportamento energetico dell'edificio reale ad esempio identificandone i consumi o le condizioni di comfort interne ai locali.

La particolarità della simulazione energetica dinamica consiste nello svolgere una analisi tempo-dipendente, in cui cioè dati d'ingresso e risultati sono espressi in funzione del tempo, consentendo quindi di stimare l'effettivo comportamento termodinamico dell'edificio.

La simulazione energetica gioca un ruolo ancora marginale nella tipica implementazione di tecnologie volte al risparmio energetico, principalmente a causa della mancanza di controllo circa quando e come una determinata analisi debba essere commissionata e la mancanza di scenari d'analisi legati allo specifico contesto, obbligando spesso i progettisti a ricorrere al proprio istinto ed esperienza nell'esecuzione delle scelte progettuali (de Wilde et al., 1999).

Nel caso di elementi legati al risparmio energetico, il processo di scelta intuitivo sembra presentare ulteriori svantaggi: generalmente infatti l'efficienza di tali componenti non può essere studiata a pieno in modo isolato. Essi sono infatti dipendenti dalle caratteristiche stesse dell'edificio, in cui le interazioni con il singolo componente possono presentare effetti sostanziali sulle caratteristiche del componente stesso. L'effetto delle

condizioni climatiche esterne e del comportamento degli occupanti aggiunge ulteriormente alla complessità del problema e rende quasi impossibile predire le prestazioni dell'edificio senza ricorrere a strumenti di calcolo computazionale (de Wilde et al. 2001).

E' quindi essenziale supportare decisioni di progetto energeticamente efficienti con l'aiuto di analisi energetiche in grado di giustificare la scelta di tali interventi. Vari studi sono disponibili a testimonianza dell'impatto di tali strumenti nel processo di valutazione di interventi specifici di efficientamento di varie tipologie di edifici, quali ad esempio cliniche ospedaliere (Picco e Marengo, 2012), il presente articolo vuole promuovere l'applicazione di tali strumenti all'ambito dell'edilizia pubblica.

A questo scopo il caso studio qui proposto vuole dimostrare come l'implementazione di una simulazione energetica dinamica possa supportare il processo di scelta di intervento nella riqualificazione energetica e, in particolar modo con riguardo al settore dell'edilizia pubblica, predirne accuratamente i risultati al fine di garantire la buona riuscita dei singoli interventi.

## 2. DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO

L'edificio scelto a caso studio per la presente trattazione è costituito da un polo scolastico situato nel comune di San Pellegrino Terme in provincia di Bergamo (Italia) e consiste in una struttura realizzata nel 1910 circa e successivamente modificata nei primi anni '70 al fine di sopraelevare l'edificio portandolo da tre a quattro piani. Più recentemente l'edificio è stato interessato da interventi di rifacimento delle facciate e della copertura ai quali non è stato però associato alcun intervento di riqualificazione energetica della struttura.

All'interno del polo scolastico sono presenti varie funzioni concomitanti, in particolare le funzioni principali sono ricoperte dalla scuola primaria e scuola secondaria di primo grado, dotate di diverse funzioni accessorie quali uffici personale, laboratori locali adibiti a mensa e un piccolo locale palestra situato all'interno dell'edificio.



Figura 1 – Vista aerea dell'edificio in esame. Da GoogleMaps.

Affiancate ad esse sono quindi presenti una serie di funzioni secondarie non attinenti all'attività scolastica quali un ufficio della protezione civile e alcuni locali destinati alle attività del corpo musicale del comune. All'interno della struttura è inoltre presente una scuola dell'infanzia che non è tuttavia esame della presente analisi in quanto indipendente, sia da un punto di vista funzionale che impiantistico, dalle altre funzioni sopraccitate. La Figura 1 mostra una panoramica aerea della struttura e del contesto urbano in cui è inserita.

L'edificio è caratterizzato da una pianta irregolare e uno sviluppo verticale su quattro piani, di cui uno seminterrato verso il fronte stradale, più un piano sottotetto inutilizzato. L'edificio è inoltre caratterizzato da una altezza massima di circa 18.5 m e una impronta in pianta di circa 932 m<sup>2</sup> per un totale di circa 3570 m<sup>2</sup> di superficie.

In funzione del periodo di costruzione dell'edificio e dei successivi ampliamenti, nonché delle documentazioni disponibili e di sopralluoghi mirati è stato possibile ricostruire la struttura dell'edificio e le caratteristiche delle varie stratigrafie che lo compongono. La struttura dell'edificio è realizzata in muratura portante piena con solai misti in latero-cemento tipici del periodo di realizzazione. In particolare per quanto concerne le murature verticali sono presenti all'interno della struttura spessori variabili tra 30cm e 70cm di muratura piena intonacata su ambo i lati risultanti in trasmittanze variabili tra 1.61 e 0.85 W/(m<sup>2</sup> K) ed una scarsa resistenza alle infiltrazioni d'aria.

Similmente, anche gli orizzontamenti presentano caratteristiche tipiche del periodo di realizzazione con spessori variabili tra 15 cm e 40 cm e valori di trasmittanza termica che oscillano tra gli 0.79 e 1.14 W/(m<sup>2</sup> K). La copertura è invece realizzata in legno con manto di copertura in coppi per una trasmittanza di 2.44 W/(m<sup>2</sup> K). Non essendo stato effettuato, nel corso degli anni, alcun intervento di efficientamento energetico mirato non è presente alcun isolamento termico delle superfici opache dell'edificio.

Per quanto concerne invece le superfici trasparenti l'edificio è dotato di serramenti in doppio vetro standard 3-13-3 e telaio in alluminio su tutta la sua estensione ad eccezione delle finestre asserventi i locali tecnici caratterizzate da vetri singoli dello spessore di 3mm e telaio in metallo.

L'edificio è inoltre caratterizzato da un sistema impiantistico di tipo tradizionale ad acqua calda con radiatori ad alta temperatura quali terminali nei vari locali e una centrale termica composta da una caldaia della potenza di 610 kW per un rendimento medio stagionale stimato attorno al 70%. Non è invece presente all'interno della struttura alcun sistema di climatizzazione estiva e/o ventilazione meccanica.

Il lavoro prosegue con la definizione degli interventi di efficientamento energetico in seguito analizzati. Tali interventi vengono individuati in modo da essere facilmente generalizzabili per la loro estensione ad altri edifici simili situati in climi freddi italiani, vengono quindi esclusi interventi mirati alle peculiarità specifiche dell'edificio o l'utilizzo di tecnologie innovative. Per l'esecuzione delle successive analisi, come ipotesi semplificativa, i materiali considerati vengono caratterizzati da valori di conducibilità termica di progetto pari a valori medi di conducibilità termica dichiarata dal produttore, considerando tale scelta come accettabile per il periodo invernale in funzione di quanto previsto dalla normativa UNI EN ISO 10456 (UNI, 2008).

Viene innanzitutto analizzata la realizzazione di un isolamento termico in pannelli di polistirene espanso, conducibilità 0.034 W/(m K), sulle superfici verticali opache dell'edificio secondo tre diversi spessori (4-8-12 cm) al fine di individuare la scelta otti-

male, prendendo quindi a riferimento le murature dallo spessore di 70cm e trasmittanza  $0.79 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  si raggiungono rispettivamente  $0.410-0.278-0.209 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  di trasmittanza termica post-intervento. Viene inoltre valutata la realizzazione di un isolamento termico orizzontale del sottotetto per uno spessore di 8 cm in pannelli di lana di roccia, conducibilità  $0.04 \text{ W}/(\text{m K})$ , per una trasmittanza termica risultante del solaio sottotetto pari a  $0.274 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Si indaga infine la sostituzione dei serramenti esistenti con serramenti ad alta efficienza con vetri doppi e tripli basso emissivi caratterizzati da Argon come gas inerte, per una trasmittanza termica rispettivamente di 1.2 e  $0.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , anche in questo caso al fine di individuare la scelta ottimale. Viene infine analizzata la sostituzione della caldaia esistente con un sistema composto da tre caldaie modulanti di nuova generazione da alta efficienza con potenza massima di 280kW e rendimento medio pari al 95%.

### 3. DESCRIZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE

Al fine di valutare in modo corretto il comportamento termodinamico dell'edificio e l'impatto dei singoli interventi sullo stesso si procede alla realizzazione di una simulazione energetica in regime dinamico mediante l'utilizzo di software appositi.

In particolare vengono utilizzati per la presente analisi il software EnergyPlus, uno strumento per esecuzione di simulazioni energetiche dinamiche gratuito ed open-source sviluppato in ambito universitario statunitense, e il software SketchUp unitamente all'apposita plugin OpenStudio in grado di mettere in comunicazione i due strumenti per un'agevole gestione del modello geometrico dell'edificio.

Il modello geometrico viene quindi sviluppato partendo dalla documentazione disponibile, planimetrie e sezioni, e grazie all'esecuzione di alcuni sopralluoghi al fine di identificare compiutamente tutte le caratteristiche geometriche dell'edificio ritenute rilevanti. Una immagine del modello geometrico tridimensionale viene riportata in Figura 2 al fine di esempio.



*Figura 2 – Modello geometrico tridimensionale dell'edificio*

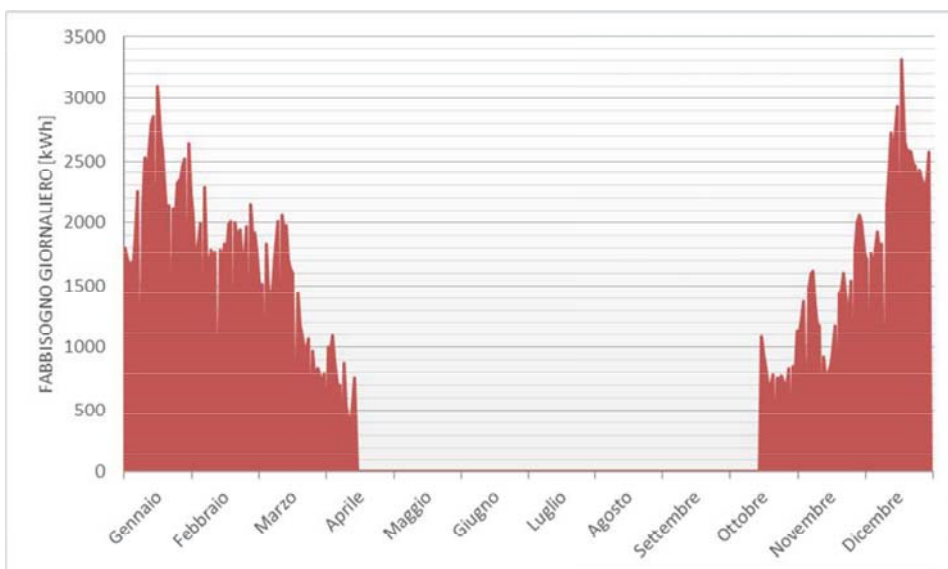
Ne risulta un modello geometrico del volume approssimativo di  $15420 \text{ m}^3$  con  $4065 \text{ m}^2$  di superficie verticale disperdente e un totale di 1241 superfici di calcolo a cia-

scuna delle quali è attribuita la corrispondente stratigrafia. Il modello è caratterizzato da 74 zone termiche, di cui 71 riscaldate, identificate secondo il principio della uniformità delle condizioni d'uso dei locali, delle temperature interne registrate e dei carichi interni presenti, cercando di minimizzare il numero di zone ma al tempo stesso incidendo il meno possibile sul comportamento termodinamico del modello. Per ciascuna di queste zone la simulazione sarà in grado di restituire i risultati desiderati su base oraria, in particolare in termini di condizioni interne e fabbisogni energetici richiesti.

In aggiunta ad esse vengono modellate una serie di superfici oscuranti tali da rappresentare l'impatto di ombreggiamento generato sull'edificio da corpi esterni quali ad esempio gli edifici circostanti.

Ciascuna zona termica individuata è quindi caratterizzata tramite profili temporali in termini di occupazione, carichi interni, infiltrazioni e ventilazione risultando nella identificazione di 27 tipologie di zone a caratteristiche omogenee. Ciascun valore viene identificato comparando i valori suggeriti dalle normative vigenti, indicazioni riportate nella documentazione esistente e ove possibile i valori specifici ricavati mediante sopralluogo.

I setpoint di temperatura vengono definiti unitariamente per l'intero edificio e fissati a 20°C per il periodo invernale. Viene inoltre definito il profilo temporale dei setpoint di modo da rappresentare il reale funzionamento dell'impianto.



*Figura 3 – Fabbisogni termici giornalieri stimati dell'edificio*

La simulazione viene quindi eseguita sull'arco temporale di un anno solare mediante l'impiego dei dati climatici forniti dal database IGDG per la località di Bergamo, ritenuti adeguati al fine dello svolgimento delle presenti analisi.

Sono inoltre disponibili per l'edificio in esame le bollette relative al consumo di gas naturale per un intero anno solare grazie alle quali è stato possibile validare la bontà dei risultati ottenuti.

Tra i risultati principali forniti dalla simulazione si ottiene il fabbisogno termico annuo dell'edificio ai fini del riscaldamento invernale pari a 263 MWh che, in funzione dell'impianto esistente, corrispondono a consumi annui di 39197 m<sup>3</sup> di gas metano per una produzione totale di 82 tCO<sub>2</sub> equivalente. In Figura 3 è riportato l'andamento annuale dei fabbisogni giornalieri di energia termica ai fini del riscaldamento per la simulazione in esame.

#### 4. SIMULAZIONE DEGLI INTERVENTI

Basandosi sul modello simulativo di riferimento precedentemente creato, che costituisce il caso base di questo studio, vengono quindi analizzati i vari interventi ipotizzati applicando modifiche mirate tali da rappresentare ciascun singolo intervento.

In Tabella I sono riportati i risultati delle simulazioni inerenti i singoli interventi sull'involucro oggetto della presente analisi.

**Tabella I – Variazioni sui fabbisogni dell'edificio interventi singoli**

<b>INTERVENTI</b>	<b>FABBISOGNI [kWh]</b>	<b>Δ FABBISOGNI [kWh]</b>	<b>Δ FABBISOGNI [%]</b>
Isolamento verticale 4 cm	213291	-49982	-18.98
Isolamento verticale 8 cm	203252	-60021	-22.80
Isolamento verticale 12 cm	197517	-65755	-24.98
Isolamento sottotetto	254831	-8441	-3.21
Vetri doppi basso-emissivi	250250	-13022	-4.95
Vetri tripli basso-emissivi	250857	-12415	-4.72

E' possibile notare come la realizzazione di un isolamento delle superfici opache verticali abbia un impatto significativo sulla riduzione dei consumi dell'edificio per ciascuno degli spessori analizzati, in funzione sia delle precedenti, scarse, caratteristiche delle murature sia dell'estensione dell'intervento. E' inoltre utile notare come incrementi consecutivi dello spessore dello strato isolante non corrispondano a riduzioni lineari dei consumi, rendendo l'utilizzo di elevati spessori di isolante via via meno efficienti. L'isolamento del sottotetto con uno strato di lana di roccia porta a risultati meno marcati in quanto le superfici interessate non risultano a diretto contatto con l'ambiente esterno ma sono invece rivolte verso una zona a temperatura intermedia, il sottotetto.

Agli interventi relativi alla sostituzione dei serramenti corrispondono riduzioni dei consumi inferiori (4.95%-4.72%) a causa della discreta qualità dei serramenti a vetro doppio già presenti nella struttura. E' inoltre interessante notare come nel caso in esame l'installazione di vetri tripli porti un peggioramento delle prestazioni energetiche della struttura rispetto ai vetri doppi basso-emissivi in quanto la riduzione di trasmittanza ottenuta non riesce a controbilanciare la perdita di apporti gratuiti da irraggiamento generata dai tripli vetri.



In base ai risultati qui ottenuti in termini di riduzione dei consumi ed ai successivi risultati in termini di valutazione economica si decide di procedere con gli interventi di isolamento a cappotto dell'edificio per uno spessore di 12cm, isolamento del sottotetto e sostituzione dei serramenti con vetri doppi basso-emissivi. La realizzazione aggregata di tali interventi porta inoltre ad una ulteriore riduzione dei consumi grazie, ad esempio, alla riduzione delle infiltrazioni d'aria incontrollate. La combinazione di tali interventi viene individuata in Tabella II alla voce "Totale Involucro". Viene inoltre analizzata l'ipotesi di sostituzione del generatore esistente con una caldaia di nuova generazione nonché la combinazione degli interventi effettuati su involucro e generatore.

La riduzione di consumi derivante dalla sostituzione della caldaia viene applicata a valle degli interventi sull'involucro. Come atteso questo intervento porta ad una riduzione dei consumi direttamente comparabile all'incremento di efficienza media della stessa, avendo mantenuto la stessa tipologia di generatore.

**Tabella II – Variazioni sui consumi dell'edificio interventi combinati**

<b>INTERVENTI</b>	<b>CONSUMI [kWh]</b>	<b>Δ CONSUMI [kWh]</b>	<b>Δ CONSUMI [%]</b>
Totale Involucro	186987	-189115	-50.28
Sostituzione Caldaia	137780	-49207	-26.32
<b>TOTALE</b>	<b>137780</b>	<b>-238323</b>	<b>-64.92</b>

Il totale di tutti gli interventi realizzati porta, oltre alla riduzione dei consumi sopracitati, anche una relativa riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente pari a 52.2 tCO<sub>2</sub>/anno, di cui 41.4 t attribuibili agli interventi sull'involucro e 10.8 t alla successiva sostituzione della caldaia, pari al 63.4% della produzione di CO<sub>2</sub> per la climatizzazione invernale precedente all'intervento.

Grazie alla realizzazione della simulazione energetica è inoltre possibile valutare come gli interventi analizzati comportino un significativo incremento delle condizioni di comfort interne all'edificio in particolare grazie ad una maggiore uniformità delle temperature radianti delle pareti. Prendendo in esame una delle aule scolastiche è possibile valutare un aumento medio della temperatura operativa pari a 1.4°C durante le ore di occupazione nonché un incremento della temperatura operativa minima pari a 2.1°C.

## 5. ANALISI ECONOMICA

Al fine di effettuare una valutazione economica dei singoli interventi vengono analizzati alcuni valori caratteristici indici della profittabilità di un intervento, in seguito riportati e definiti.

Il VAN, che indica la variazione di ricchezza ottenibile dalla realizzazione dell'investimento, ossia la sommatoria dei flussi di cassa che verranno generati dall'investimento stesso attualizzati ad oggi.

$$VAN = -R_0 + \sum_{t=1}^T R_t / (1 + r)^t \quad (1)$$



Ciascun investimento è inoltre associato ad un TIR, che rappresenta la redditività dell'investimento e matematicamente si calcola ricavando il tasso di interesse tale per cui si ottiene un VAN nullo.

$$VAN = \sum_{t=0}^T R_t / (1 + TIR)^t = 0 \quad (2)$$

Un altro parametro essenziale della valutazione economica è il PB, o tempo di ritorno, che rappresenta il numero di anni che il nostro investimento impiega a ripagare il suo costo iniziale e generare quindi ricchezza.

$$PB = \min t : \sum_{t=1}^T R_t / (1 + r)^t > 0 \quad (3)$$

Al fine di portare a termine una valutazione economica è necessario fissare un orizzonte temporale, in questo caso fissato a 25 anni, e individuare un costo opportunità del capitale, in questo caso identificato nel 3.5%.

Tutte le analisi vengono svolte prendendo a riferimento lo scenario di evoluzione BAU HG ipotizzato da ENEA che prevede un incremento annuo del prezzo del gas naturale pari all'8% e dell'elettricità pari al 6%.

Per l'analisi dei singoli interventi non viene considerato alcun tipo di incentivo, tuttavia per l'analisi dell'intervento nel suo complesso, identificata come "TOTALE" in Tabella IV vengono considerati gli incentivi ottenibili mediante il c.d. "Conto termico" (D.M. 28 dicembre, 2012) da parte delle amministrazioni pubbliche per interventi di incremento dell'efficienza energetica.

Viene inoltre preso a riferimento un prezzo del gas metano per l'anno zero pari a 0.9 €/m<sup>3</sup>.

In tabella III è possibile leggere i risultati dell'analisi economica per ciascun singolo intervento. In particolare sono riportati i costi d'investimento stimati di ciascun intervento e i tre indicatori economici sopra indicati.

**Tabella III – Valutazione economica interventi singoli**

INTERVENTI	COSTO [€]	VAN [€]	TIR [%]	PB [ANNI]
Isolamento verticale 4 cm	159300	123171	7.78	18
Isolamento verticale 8 cm	180540	158665	8.26	17
Isolamento verticale 12 cm	201780	169833	8.09	17
Isolamento sottotetto	23300	24406	8.99	16
Vetri doppi basso-emissivi	62480	11110	4.64	23
Vetri tripli basso-emissivi	115920	-45755	0.29	34

E' utile notare come tutti gli interventi analizzati ad eccezione dei serramenti a triplo vetro risultino in un VAN positivo e siano quindi in grado, nella durata del periodo di analisi, di generare ricchezza, al tempo stesso tutti gli interventi risultano in un valore di TIR superiore al costo opportunità del capitale inizialmente ipotizzato. Come già notato in fase di analisi dei fabbisogni l'installazione di serramenti a triplo vetro risulta eco-

nomicamente svantaggiosa rispetto ai vetri doppi basso-emissivi e non è in grado di ripagarsi nel periodo di analisi, generando quindi un VAN negativo e un TIR inferiore al costo opportunità del capitale che ne sconsigliano quindi l'impiego.

Per quanto riguarda l'isolamento delle superfici verticali opache è interessante notare come la soluzione ottimale sia l'installazione di un isolamento da 8 cm, caratterizzata da indicatori economici più favorevoli rispetto agli altri due casi, tuttavia gli indicatori economici per isolamento da 12 cm risultano simili, si decide quindi di procedere con questa scelta per il seguito delle analisi. Ulteriori incrementi dello stato isolante porterebbero ad un progressivo allontanarsi dalle condizioni economiche ottimali.

In Tabella IV è invece possibile confrontare i risultati ottenuti nel caso di combinazione degli interventi eseguiti sull'involucro con quelli ottenuti dall'intervento di sostituzione della caldaia esistente. E' infine riportato il risultato derivante dall'esecuzione unitaria degli interventi previsti su involucro e impianto.

**Tabella IV – Valutazione economica interventi combinati**

INTERVENTI	COSTO [€]	VAN [€]	TIR [%]	PB [ANNI]
Totale Involucro	287560	460592	11.19	13
Sostituzione Caldaia	24100	170566	26.81	5
TOTALE	311660	743730	16.12	8

E' utile notare come l'intervento di sostituzione della caldaia presenti risultati sensibilmente favorevoli dal punto di vista economico rispetto agli interventi eseguiti sull'involucro, risultando in valori di VAN e TIR pari rispettivamente a 170566 € e 26.81% ma soprattutto denotando un tempo di ritorno notevolmente inferiore, pari a 5 anni rispetto ai 13 anni degli interventi rivolti all'involucro. Motivo di tale differenza è da ricercarsi in parte nelle scarse prestazioni della caldaia che si va a sostituire in questo specifico caso studio, tuttavia è comunemente noto come interventi mirati di tipo impiantistico abbiano tipicamente una incidenza maggiore sui consumi dell'edificio ed in particolare siano caratterizzati da un rapporto costi/benefici più elevato.

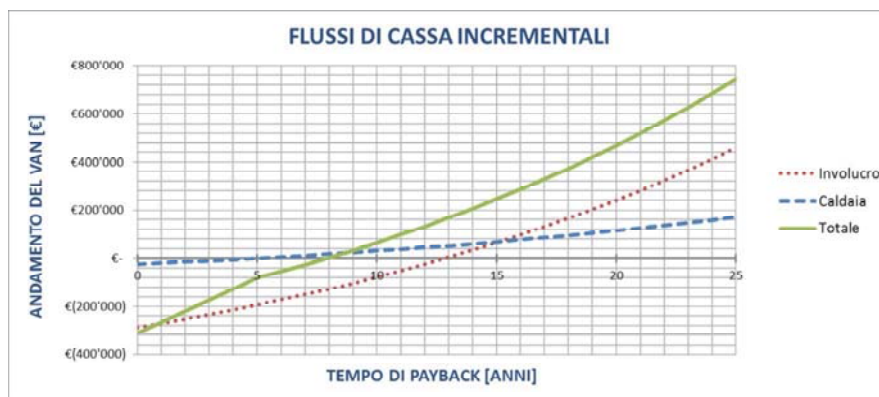


Figura 4– Rappresentazione grafica dei risultati dell'analisi economica sui vari interventi

In Figura 4 è infine riportata una rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dal punto di vista economico al fine di agevolare la comparazione delle due tipologie di intervento e dell'intervento globale compreso di incentivazione.

## CONCLUSIONI

Questo articolo propone una serie di analisi e soluzioni concrete volte al raggiungimento della sostenibilità energetica di edifici esistenti con il supporto di strumenti di simulazione energetica, concentrando la propria attenzione su edifici pubblici.

Gli interventi considerati sono stati volutamente selezionati al fine di poter essere facilmente generalizzati per l'applicazione ad edifici simili a quello oggetto dell'analisi tuttavia è raccomandabile l'esecuzione di analisi specifiche caso per caso al fine di garantire i migliori risultati.

Attraverso l'applicazione degli interventi sull'involucro considerati è possibile ottenere una riduzione totale dei consumi di riscaldamento pari al 50.28%, equivalente a 19710 m<sup>3</sup>/anno di gas naturale. La sostituzione della caldaia preesistente con un sistema di caldaie ad alta efficienza porta ad una ulteriore riduzione dei consumi di 49207 kWh, pari a 5128 m<sup>3</sup>/anno di metano.

Il risultato finale dell'analisi è quindi una riduzione totale dei consumi dell'edificio pari a 238324 kWh per un totale di 24838 m<sup>3</sup>/anno di metano risparmiati. Ciò equivale inoltre ad una riduzione della produzione di CO<sub>2</sub> equivalente pari a 52.2 tonnellate, che corrisponde a circa il 63.4% della produzione di CO<sub>2</sub> equivalente dell'edificio ai fini della climatizzazione degli ambienti.

La totalità degli interventi selezionati porta inoltre, nelle condizioni analizzate, ad un miglioramento delle condizioni di comfort interno all'edificio per il periodo invernale a discapito di un marginale decremento delle condizioni di comfort per il periodo estivo, che risultano tuttavia ininfluenti nel caso in esame data la sua natura scolastica.

Tutti gli investimenti applicati sono inoltre da considerare economicamente favorevoli, generando un VAN positivo nel corso della loro vita utile e restituendo un valore del TIR superiore al costo del capitale preso in considerazione. In particolare l'applicazione della totalità interventi ritenuti maggiormente favorevoli per ciascuna categoria analizzata porta ad un VAN pari a 743730 € con relativo TIR del 16.12% a fronte di un costo d'investimento iniziale pari a 311660 € che denota un tempo di ritorno dell'investimento pari a 8 anni. L'investimento analizzato è quindi da considerarsi altamente favorevole dal punto di vista economico, ancor più considerando la natura pubblica dell'edificio e quindi la riduzione dei costi di esercizio dello stesso.

Si ritiene inoltre di aver provato, attraverso la comparazione di diversi spessori di isolante nonché di tipologie di serramenti, come l'applicazione di strumenti di simulazione energetica possa essere di supporto alla realizzazione di interventi di efficientamento energetico, consentendo una valutazione dettagliata dei singoli interventi nonché delle loro combinazioni ed aiutando ad individuare le scelte ottimali dal punto di vista energetico ed economico nella realizzazione dei vari interventi specialmente nel caso esse possano risultare di difficile previsione.

Ciononostante è necessario sottolineare l'importanza dell'esecuzione di un'analisi energetica corretta e dettagliata, necessaria per garantire l'utilità e la valenza dei risultati ottenuti, sia in termini di riduzione dei consumi che dal punto di vista economico.

## **SIMBOLOGIA**

<i>VAN</i>	Valore attualizzato netto, €
<i>TIR</i>	Tasso interno di rendimento, %.
<i>PB</i>	Payback o Tempo di ritorno dell'investimento, anni.
$C_t$	Flussi di cassa netti all'anno $t$ , €
<i>T</i>	Numero totale di anni interessati dall'investimento, anni.
<i>r</i>	Costo del capitale, %.

## **BIBLIOGRAFIA**

- D.M. 28 dicembre 2012. 2012. Incentivazione della produzione di energia termica da fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni. Roma: Ministero dello sviluppo economico.
- de Wilde P., Augenbroe G., van der Voorden M. 1999. Invocation of Building Simulation Tools in Building Design Practice. Proceedings of Building simulation 1999.
- de Wilde P., Augenbroe G., van der Voorden M., Brouwer J., Kaan H. 2001. The need for computational support in energy efficient projects in the Netherlands. Proceedings of Building Simulation 2001, 513-520.
- Molocchi, A. 2011. To better exploit the mine of heat. Nuova Energia, 6-2011, 82-88.
- Picco M., Marengo M. 2012. Energy simulation for energy efficiency improvements of an existing clinic in north Italy. Proceedings of the 2012 Building Simulation and Optimization Conference, 401-408.
- UNI. 2008. Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto. UNI EN ISO 10456. Milano: Ente Italiano di unificazione

## **RICONOSCIMENTI**

Si ringrazia l'Ing. Marina Bendoni, laureanda presso l'Università degli Studi di Bergamo, per l'impegno profuso, sotto la supervisione degli autori del presente articolo, nella implementazione delle simulazioni energetiche qui presentate.