



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

## Analisi e valutazioni energetico – ambientali di un edificio-tipo riqualificato secondo il target NZEB

*S. Ferrari, V. Zanotto*



Dipartimento di Scienza e Tecnologie dell'Ambiente Costruito – BEST

POLITECNICO DI MILANO

Report RdS/2012/108

ANALISI E VALUTAZIONI ENERGETICO – AMBIENTALI DI UN EDIFICIO-TIPO RIQUALIFICATO SECONDO IL TARGET NZEB

S. Ferrari, V. Zanotto (Politecnico di Milano, Dip.to BEST)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

## Indice

<b>Sommario</b> .....	<b>4</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>5</b>
<b>Riqualificazione di un edificio del terziario secondo il target NZEB</b> .....	<b>6</b>
<i>Descrizione del caso studio</i> .....	6
Tipologia edilizia .....	7
Il modello di simulazione energetica .....	10
Carichi termici, profili di utilizzo e portate d'aria di rinnovo .....	11
Caratteristiche costruttive .....	13
Impianti meccanici .....	14
<i>Strategie di retrofit</i> .....	16
Involucro edilizio .....	16
Impianti .....	17
<i>Risultati delle simulazioni</i> .....	19
<i>Energia da fonti rinnovabili prodotta in loco</i> .....	20
<i>Valutazioni economiche</i> .....	23
Costi degli interventi .....	24
Analisi energetico-economiche a confronto .....	25
VAN e tempo di ritorno degli investimenti .....	27
<i>Bilanci di energia primaria e di GHG</i> .....	30
<i>Considerazioni integrative riferite agli aspetti LCA</i> .....	32
<b>Conclusioni</b> .....	<b>34</b>
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	<b>35</b>
<b>Appendice 1</b> .....	<b>36</b>
<i>Grafici delle principali simulazioni</i> .....	36
Bilanci energetici dello Stato Di Fatto .....	37
Risultati della simulazione degli interventi .....	39
<b>Appendice 2</b> .....	<b>45</b>
<i>Energia incorporata ed emissioni GHG relativi agli interventi sull'involucro (a cura di M. Lavagna e M. Paleari)</i> .....	45
Chiusura verticale opaca: isolamento a cappotto .....	45
Copertura in lamiera .....	46
Chiusura verticale trasparente .....	46
<b>Appendice 3</b> .....	<b>48</b>

## Sommario

Il presente lavoro ha mosso dall'ipotesi di riqualificare un edificio rappresentativo del terziario, studiandone gli scenari di implementazione al fine di prefigurare gli effetti di un possibile adeguamento ai requisiti NZEB. L'edificio scelto come caso di studio è tra quelli costituenti il Campus Città Studi del Politecnico di Milano. Le diverse ipotesi di retrofit lato involucro e impianti, che implementerebbero la prevista manutenzione straordinaria del rivestimento delle facciate, sono state considerate in termini di energia, di costi e di emissioni ad effetto serra.

Gli esiti dello studio dimostrano che, dal punto di vista delle prestazioni energetico-ambientali, intervenendo sull'esistente con soluzioni tecnologiche diffuse e consolidate è possibile ridurre i fabbisogni di energia primaria (e le emissioni ad effetto serra associate) all'ordine del 40% rispetto a quelli attuali e che ricorrendo a fonti di energia rinnovabile prodotta in loco (in questo caso tramite un sistema fotovoltaico) il bilancio può attestare un consumo energetico prossimo allo zero.

Le analisi condotte dal punto di vista economico hanno però evidenziato delle criticità connesse all'implementazione di alcune soluzioni: per l'edificio esaminato, la sostituzione delle finestre, l'aumento dei livelli di isolamento dell'involucro edilizio oltre gli standard attuali e l'installazione dell'impianto di ventilazione con recupero termico non sarebbero economicamente vantaggiose. L'International Energy Agency, infatti, ha di recente avviato programmi dedicati a concertare le metodologie di ottimizzazione degli interventi in funzione dei costi a livello internazionale e alcune assunzioni procedurali in corso di definizione nell'ambito dell'Annex 56 "Cost Effective Energy and GHG Optimization in Building Renovation" sono state recepite nello svolgere il presente studio. Tra queste, il riferimento all'analisi dell'Embodied Energy e GHG delle soluzioni di retrofit: le valutazioni LCA, condotte sugli interventi previsti per migliorare le prestazioni isolanti dell'involucro dell'edificio in esame, hanno rivelato impatti non trascurabili, fino ad attestare dispendi energetici (ed emissioni di gas serra) ammortizzabili, con i risparmi ottenibili in fase di gestione, in oltre 60 anni di vita utile post-intervento.

Da un lato, dunque, i possibili sviluppi della ricerca auspicherebbero una partecipazione attiva ai lavori dell'Annex 56 della IEA, per approfondire il tema dell'ottimizzazione delle strategie di retrofit di concerto con gli approcci in corso di definizione a livello internazionale.

Dall'altro lato, e per la Ricerca del Sistema Elettrico Nazionale più in generale, potrebbe essere di grande interesse condurre elaborazioni di Benchmark reali, a partire dai dati di consumo elettrico registrati in un parco edifici del terziario consistente quale è quello del Politecnico di Milano.

Presso il Politecnico di Milano, infatti, è stato avviato a inizio dell'anno corrente un programma di monitoraggio dei consumi elettrici per i 57 corpi di fabbrica costituenti l'Ateneo (incluso quello oggetto del presente studio): il software di lettura e archiviazione dei dati è attualmente in fase di beta-testing e, con gli interventi correttivi in atto, a fine anno disporremo di una lettura affidabile dei dati di consumo in tempo reale e dello storico del primo anno di archiviazione per tutti gli edifici d'Ateneo (si potranno anche calibrare con maggior dettaglio i risultati dell'indagine svolta in questo studio).

## Introduzione

L'attività riportata nel presente rapporto tecnico è stata svolta nell'ambito della definizione di criteri e soluzioni di progettazione per edifici ad energia quasi zero (Nearly Zero Energy Buildings).

In base a quanto riportato nel testo della Direttiva 2010/31/UE, l'"edificio ad energia quasi zero" è un edificio ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili.

In particolare, la Direttiva stabilisce che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero e che a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero

Inoltre, la stessa Direttiva prevede che, considerato il lungo ciclo di ristrutturazione degli edifici esistenti, non solo gli edifici di nuova costruzione ma anche gli edifici esistenti che subiscono una "ristrutturazione importante" dovrebbero essere assoggettati a requisiti minimi di prestazione energetica.

Considerato che il parco edifici esistente è responsabile del 40% del consumo globale di energia nell'Unione e che è sulla riqualificazione dell'esistente che il settore delle costruzioni è ormai da tempo prevalentemente rivolto, il presente studio ha voluto affrontare il tema del target NZEB in caso di retrofit.

A tale scopo è stato individuato quale caso-studio un edificio del terziario facente parte del Campus Città Studi del Politecnico di Milano.

La valutazione delle prestazioni energetiche (e delle relative emissioni di gas serra) conseguibili in seguito all'abbinamento dei diversi interventi di retrofit ipotizzati è stata affiancata dall'analisi dei costi a questi associati, così come previsto dal testo della Direttiva 2010/31/UE: "i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi dovrebbero essere fissati in modo da conseguire un equilibrio ottimale in funzione dei costi tra gli investimenti necessari e i risparmi energetici realizzati nel ciclo di vita di un edificio, fatto salvo il diritto degli Stati membri di fissare requisiti minimi più efficienti sotto il profilo energetico dei livelli di efficienza energetica ottimali in funzione dei costi".

Gli esiti dello studio possono dunque costituire un contributo alla "definizione di politiche e all'adozione di misure, quali la fissazione di obiettivi, finalizzate a incentivare la trasformazione degli edifici ristrutturati in edifici a energia quasi zero".

Infine, un approfondimento d'analisi sull'LCA dei principali interventi ha consentito di evidenziare una problematica assodata ma ancora in fase di sviluppo presso la comunità scientifica internazionale e a livello di implementazione legislativa: il contrappeso degli effetti energetico-ambientali riconducibili ai processi di realizzazione delle tecnologie da adottare per migliorare le prestazioni dell'edificio.

## Riqualificazione di un edificio del terziario secondo il target NZEB

### *Descrizione del caso studio*

L'oggetto dell'analisi è l'Edificio 12 del Campus Leonardo del Politecnico di Milano, sito in via Bonardi 3 a Milano. L'edificio ospita gli uffici di alcuni dipartimenti e la sua costruzione risale agli anni '60.

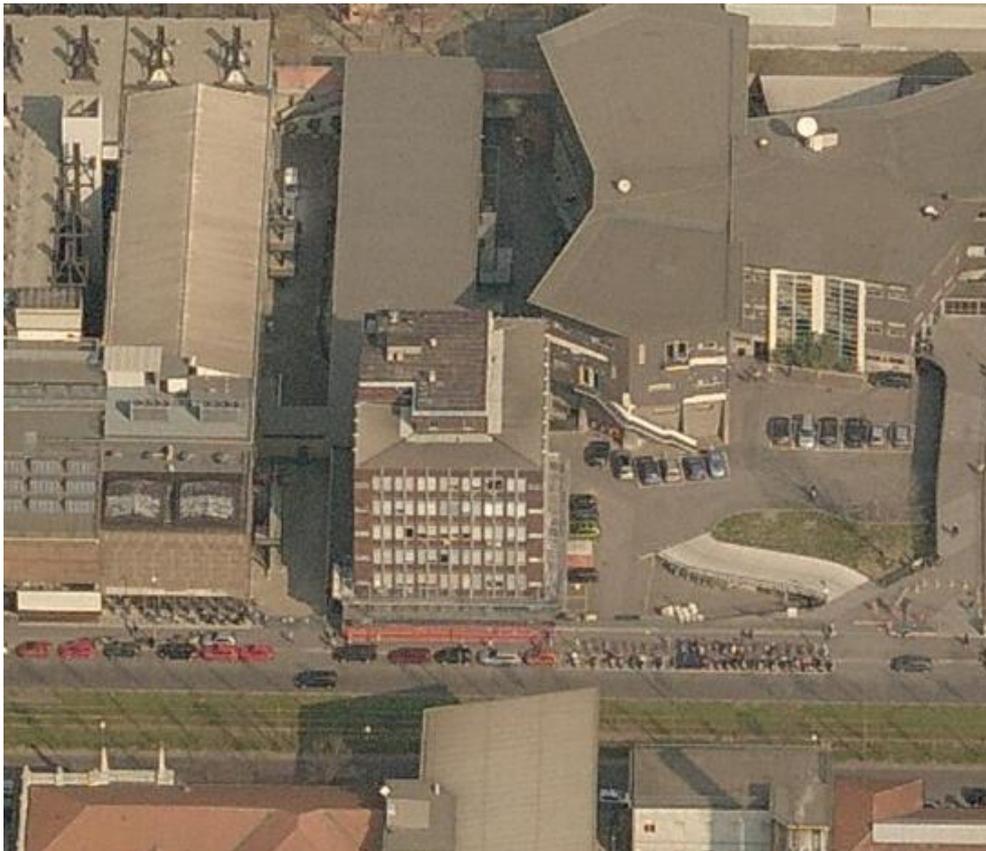
L'edificio, a prevalente uso uffici-dipartimentali, sarà sottoposto a manutenzione straordinaria poiché il rivestimento in piastrelle di gres delle facciate è soggetto a distaccamenti.



**Figura 1. Foto delle facciate Sud e Ovest (a sinistra) e della facciata Est (sinistra) dell'edificio in esame.**



**Figura 2. Foto della facciata Nord dell'edificio in esame.**



**Figura 3. Foto aerea dell'edificio inserito nel contesto del Campus Leonardo lungo Via Bonardi.**

### Tipologia edilizia

L'edificio presenta una tipologia a torre, costituita da un volume di distribuzione verticale non climatizzato, un piano seminterrato, sei piani fuori terra ad uso uffici ed un piano accessorio in copertura.

Il piano seminterrato è attualmente dedicato a centro stampa d'ateneo, praticamente un open-space climatizzato ad altezza semidoppia, con un lato controterra per due terzi dell'altezza, e include locali di servizio e magazzini controterra non climatizzati.

Il piano accessorio in copertura contiene locali ad uso residenziale, che sono climatizzati tramite impianti autonomi controllati in modo indipendente rispetto al resto dell'edificio<sup>1</sup>.

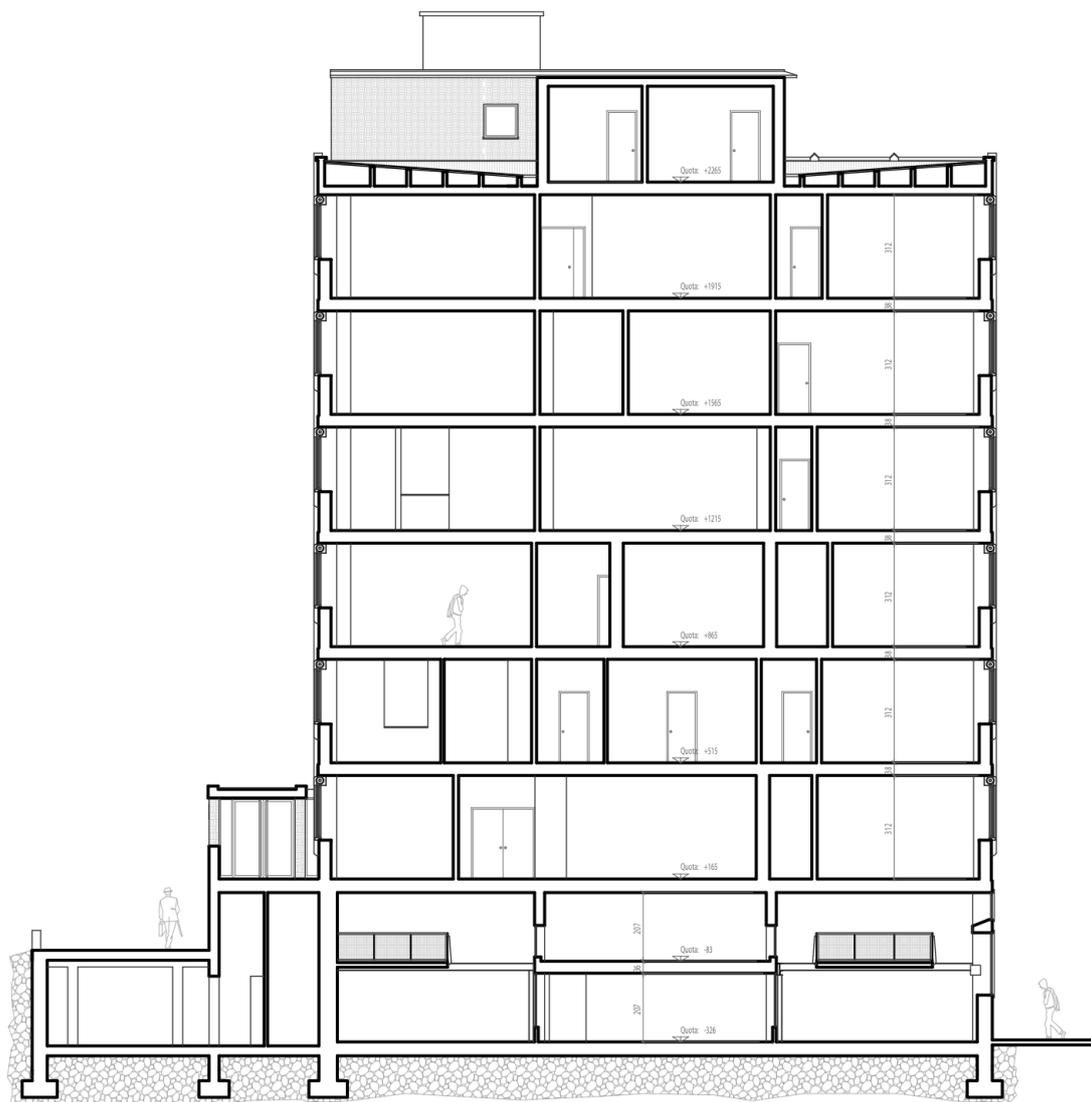
**Tabella 1. Dimensioni dell'edificio.**

<i>Caratteristiche edificio</i>	<i>Superficie di impronta</i> 510 m <sup>2</sup>	<i>Altezza totale</i> 27 m	<i>Volume lordo</i> 13'770 m <sup>3</sup>
<i>Superficie d'involucro</i>	<i>Superficie totale</i> [m <sup>2</sup> ]	<i>Superficie finestrata</i> [m <sup>2</sup> ]	<i>Superficie opaca</i> [m <sup>2</sup> ]
Pavimento contro terra	510	-	510
Pareti contro terra	80	-	80
Facciata Nord	456	121	335
Facciata Sud	468	155	313
Facciata Est	655	216	439
Facciata Ovest	534	134	400
Copertura	310	-	310
<b>Totale</b>	<b>3'013</b>	<b>626</b>	<b>2'387</b>

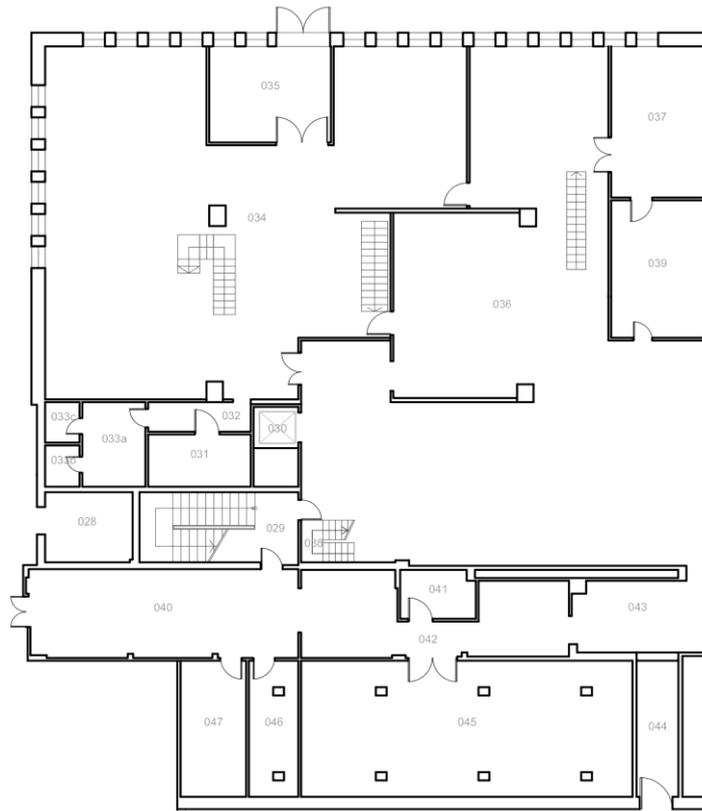
<sup>1</sup> Per tale motivo, e per rendere replicabili i risultati del presente studio ad analoghi edifici del terziario, i fabbisogni e i consumi energetici relativi alla residenza accessoria, anche se contemplati nei modelli di simulazione, non sono stati riportati negli esiti di bilancio.

**Tabella 2. Dati geometrici dei locali che costituiscono l'edificio.**

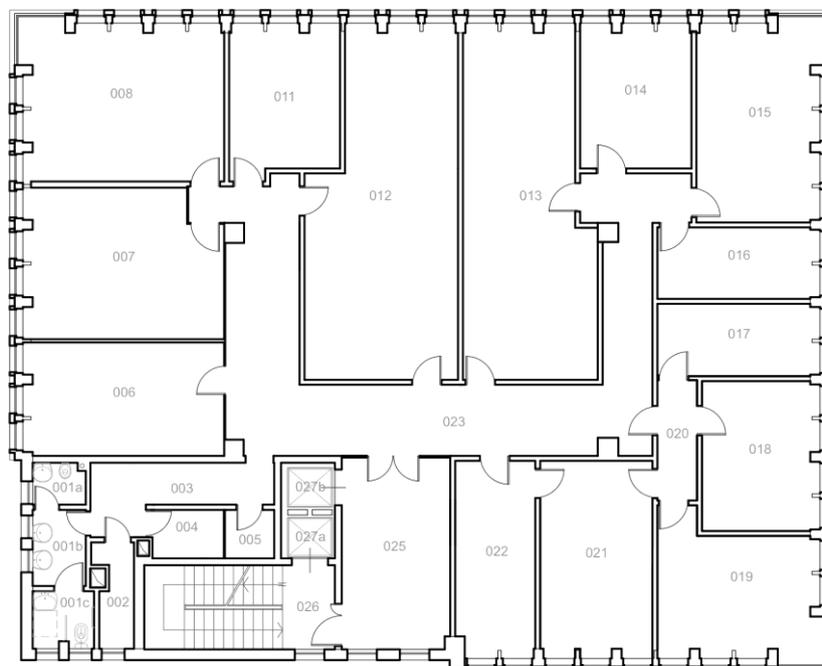
	Quantità	Superficie utile [m <sup>2</sup> ]	Altezza di interpiano [m]	Volume netto [m <sup>3</sup> ]
Centro stampa	1	370	4.5	1'665
Piani ad uso ufficio	6	370	3.1	1'147
Uffici	90	21 (media)	3.1	65 (medio)
Distribuzione	6	56	3.1	176
Corpo scala	1	600	2.8	1'675
Totale edificio per uso terziario		3'196	-	9'773
Locali residenziali		134	2.9	389



**Figura 4. Sezione trasversale dell'edificio.**



**Figura 5. Pianta del piano adibito a centro stampa.**



**Figura 6. Pianta del piano-tipo adibito ad uffici.**

### Il modello di simulazione energetica

Le valutazioni delle prestazioni energetiche sono state effettuate tramite l'utilizzo del software TRNSYS [1], ricorrendo al file TRY (Test Reference Year) dei climatici orari dell'anno-tipo di Milano presente in libreria. Il modello geometrico dell'edificio simulato, schematizzato tridimensionalmente della figura seguente, è stato strutturato secondo le principali funzioni individuate nel fabbricato.

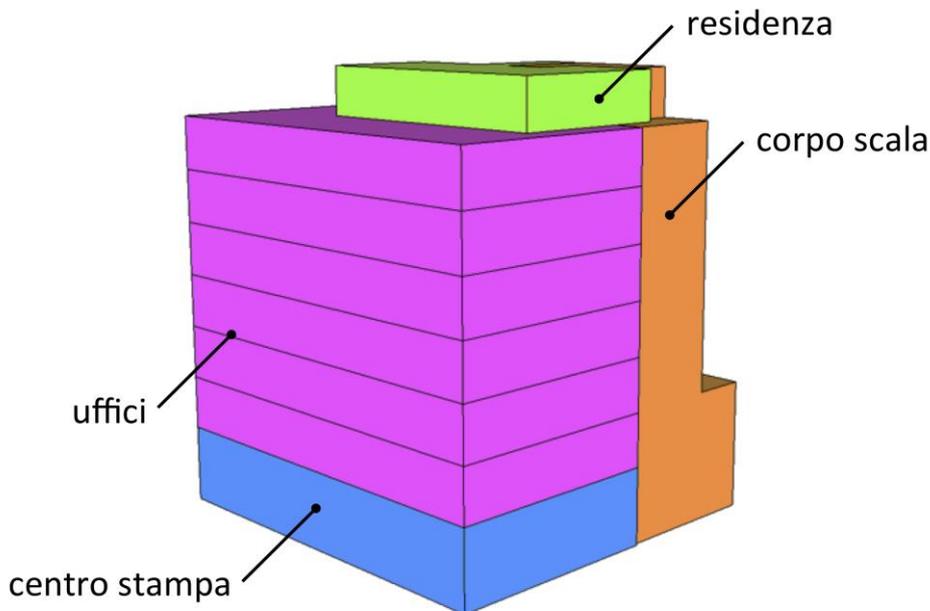


Figura 7. Schema tridimensionale dell'edificio in esame.

Ciascuno dei sei piani fuori terra adibiti ad uffici dipartimentali è stato modellato tramite l'accorpamento delle stanze in otto zone termiche, distinte per esposizione e per interfaccia di scambio termico, servite dal corridoio di distribuzione non climatizzato. Per ridurre la mole dei dati di input e la complessità di lettura degli output, i servizi igienici confinanti con il corpo scala (buffer non climatizzato) sono stati a questo assimilati.

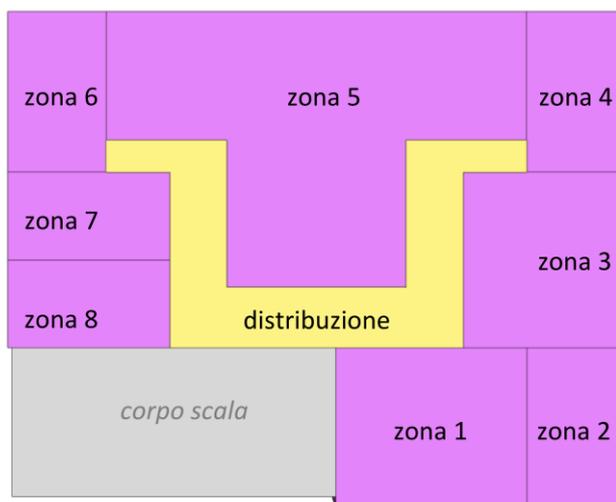


Figura 8. Schema di suddivisione dei piani adibiti ad uffici nelle diverse zone termiche.

## Carichi termici, profili di utilizzo e portate d'aria di rinnovo

### Locali ad uso ufficio

Ai fini del presente studio la densità di occupazione è stata definita in accordo con la norma UNI 10339 [2], che considera  $0.06 \text{ persone/m}^2$  (corrispondente a 19 persone/piano, del tutto coerente con il numero e le taglie degli ambienti presenti nel piano-tipo), mentre le apparecchiature elettriche sono state definite in base a quanto previsto dalla specifica tecnica UNI TS 11300-1 [3] per valutazioni adattate all'utenza, che considera un carico elettrico massimo di  $15 \text{ W/m}^2$  (tale dato risulta sottostimare le potenze mediamente rilevate negli ambienti del caso-studio, ma è stato assunto in coerenza con il consumo elettrico di picco effettivo, che non coincide con la potenza effettivamente installata).

Poiché il software di simulazione richiede di definire gli apporti interni in modo disaggregato, distinguendo tra le diverse fonti (luci ed altre apparecchiature) al fine di considerarne le diverse componenti radiative e convettive, il valore complessivo dei carichi è stato suddiviso tramite una pesatura desunta dal quaderno tecnico svizzero SIA 2024 [4]. Sono stati dunque assegnati  $9 \text{ W/m}^2$  di apporti dovuti all'illuminazione artificiale e  $6 \text{ W/m}^2$  dovuti alle altre apparecchiature elettriche, oltre a  $5 \text{ W/m}^2$  dovuti alla presenza di persone.

Per quanto riguarda il profilo di occupazione, considerato un accesso realistico agli uffici dal lunedì al venerdì dalle 09:00 alle 20:00, sono stati individuati tre intervalli di tempo caratterizzati da una diversa intensità di utilizzo: dalle 09:00 alle 11:00 al 70%, dalle 11:00 alle 18:00 al 100%, e dalle 18:00 alle 20:00 al 40%. Per le ore prive di occupazione sono stati considerati quali valori di stand-by delle apparecchiature elettriche  $1 \text{ W/m}^2$  e per l'illuminazione la sola accensione delle luci notturne di sicurezza ( $1 \text{ W/m}^2$ ).

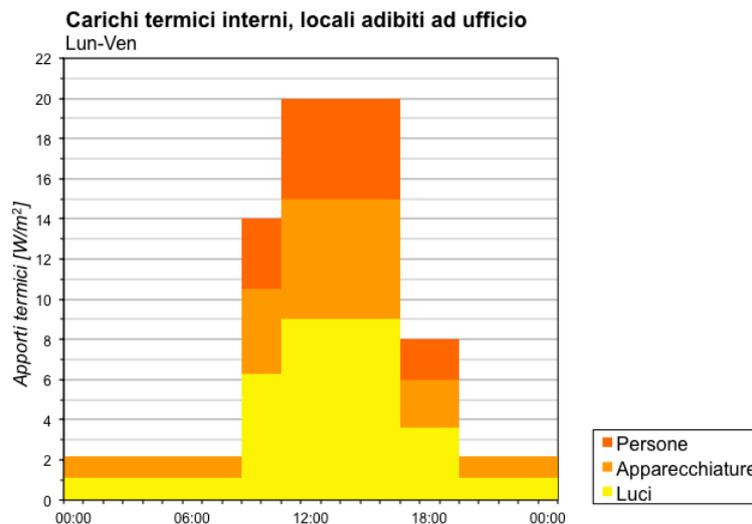


Figura 9. Profilo orario dei carichi termici interni complessivi nei locali ad uso uffici (lunedì-venerdì).

I flussi d'aria impostati del bilancio termico dell'edificio, che è ventilato naturalmente, sono stati definiti in base alle indicazioni di qualità dell'aria della norma UNI 10339, che considera  $11 \text{ m}^3/(\text{s persona})$ . Il tasso di ricambio d'aria risultante è pari a  $0.76 \text{ vol/h}$ , quindi a  $750 \text{ m}^3/\text{h}$  per piano a piena occupazione, modulati secondo i profili precedentemente descritti. Inoltre è stato applicato un tasso di infiltrazione d'aria attraverso l'involucro pari a  $0.20 \text{ vol/h}$ .

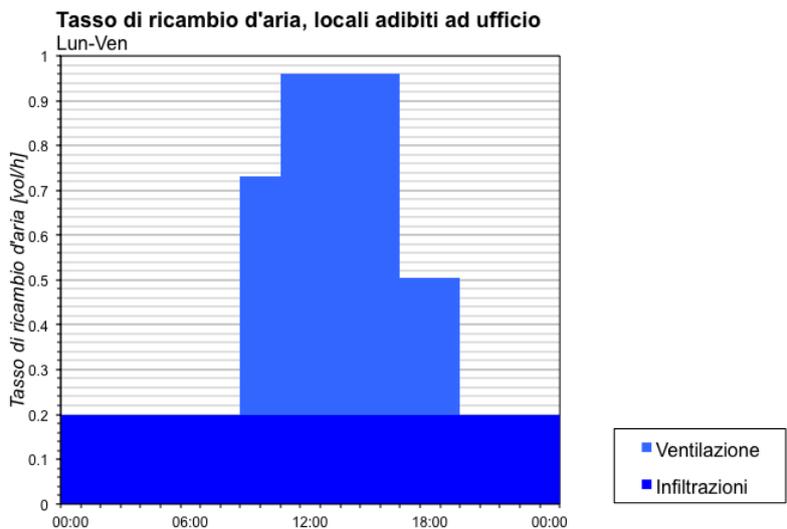


Figura 10. Profilo orario del tasso di ricambio d’aria nei locali ad uso uffici (lunedì-venerdì).

*Centro stampa*

La densità di occupazione del centro stampa è stata considerata analoga a quella dei locali ad uso uffici (in questo caso determinata dagli addetti e dalla presenza degli studenti che usufruiscono del servizio), con 0.06 persone/m<sup>2</sup> durante le ore di apertura (dalle 08:00 alle 19:00), ma assegnando un’incidenza percentuale maggiormente variabile nel tempo e con picchi corrispondenti alle ore della giornata di maggior affluenza (pausa pranzo e fine lezioni).

Anche in questo caso il carico elettrico dovuto alle apparecchiature è stato assegnato pari a 15 W/m<sup>2</sup>, suddivisi in 10 W/m<sup>2</sup> di illuminazione artificiale e 5 W/m<sup>2</sup> di apparecchiature elettriche (rispetto agli uffici dei piani superiori, il numero di apparecchiature inferiore è compensato dal maggior assorbimento delle macchine utilizzate per stampe e plottaggi). Durante le ore in cui il centro stampa rimane chiuso sono stati considerati valori in stand-by delle apparecchiature e di attivazione delle luci notturne per il 10% dei carichi elettrici totali (1.5 W/m<sup>2</sup>).

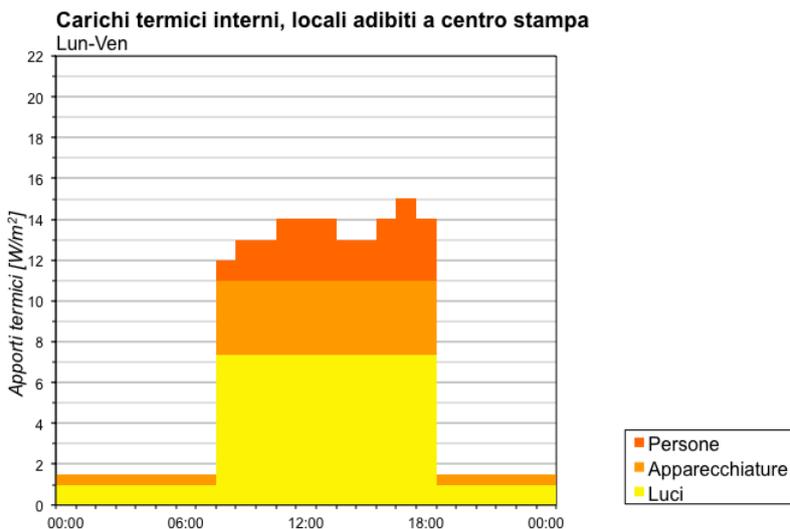
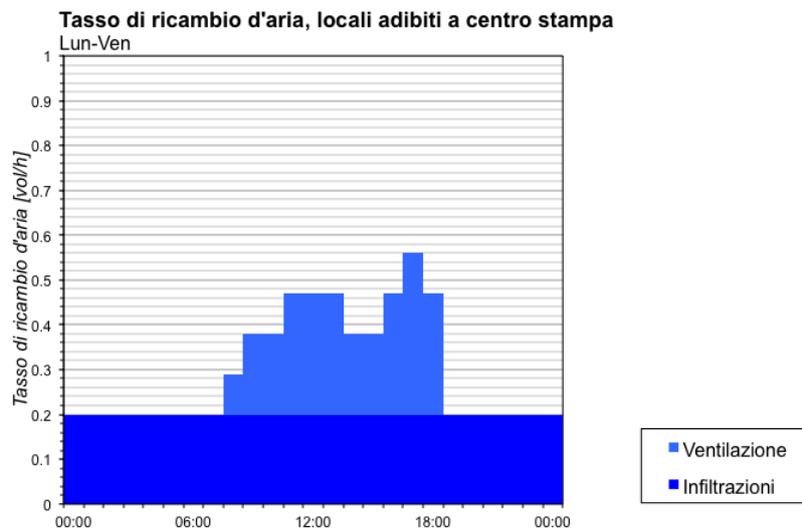


Figura 11. Profilo orario dei carichi termici interni complessivi nei locali del centro stampa (lunedì – venerdì).

Coerentemente con la densità di occupazione, i flussi d’aria sono stati definiti in 750 m<sup>3</sup>/h di tasso nominale di ricambio, pari a 0.45 vol/h (il piano seminterrato ha un’altezza netta maggiore di quella dei piani superiori), modulato in base al profilo orario di occupazione come mostrato in figura.



**Figura 12. Profilo orario del tasso di ricambio d'aria nei locali del centro stampa (lunedì – venerdì).**

#### *Locali di servizio e distribuzione*

Per quanto riguarda i locali di servizio e distribuzione (volumi non climatizzati ma contemplati nel modello di simulazione energetica in quanto buffers per le zone climatizzate), in accordo con quanto definito nella specifica tecnica UNI TS 11300-1 per valutazioni adattate all'utenza, è stata impostata una densità di  $8 \text{ W/m}^2$  per illuminazione artificiale, attiva dalle 8:00 alle 20:00. Durante le restanti ore è stato impostato un carico per luci notturne pari a  $1 \text{ W/m}^2$ . I ricambi d'aria sono stati assegnati in termini di infiltrazioni, pari a  $0.20 \text{ vol/h}$ .

#### Caratteristiche costruttive

Le caratteristiche costruttive dell'edificio sono state desunte da dati d'archivio, con particolare riferimento ad una relazione relativa ad un'indagine empirica volta alla ricerca delle cause di distacco del rivestimento in gres.

Le pareti perimetrali dell'edificio a contatto con l'ambiente esterno sono costituite da blocchi di cemento a fori verticali, mentre le pareti contro terra sono costituite da muri in calcestruzzo.



**Figura 13. Foto del rivestimento in gres delle facciate dell'edificio tratte dall'indagine diagnostica.**

L'edificio presenta due tipi di copertura, entrambe prive di isolamento e poggiate su solai in laterocemento: la copertura dei locali ad uso uffici ha il manto in lamiera inclinata su muricci, mentre il volume residenziale e il corpo scala presentano una copertura piana con guaina catramata.

**Tabella 3. Caratteristiche termofisiche degli elementi costruttivi dell'edificio in esame.**

	U [W/(m <sup>2</sup> K)]	Ms [kg/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/(m <sup>2</sup> K)]
Pareti perimetrali	1.34	270	233
Pareti contro terra	2.30	606	532
Copertura (locali sesto piano)	1.54	436	371
Copertura (locali settimo piano - residenziale)	1.62	460	395
Solaio contro terra	0.88	434	366
Solai intermedi	1.39	470	400
Tramezzi interni	1.60	106	100
Finestre	5.13	-	-

Le finestre dell'edificio, costituite da vetro singolo e telaio in alluminio privo di taglio termico, sono dotate di veneziane mobili esterne, ad esclusione di quelle d'angolo, contemplate nel modello di simulazione tramite un fattore di ombreggiamento di 0.30. La strategia di utilizzo manuale delle veneziane, è stata modellata impostando quale soglia di attivazione il valore di radiazione solare diretta incidente sulla superficie vetrata pari a 100 W/m<sup>2</sup>.

#### Impianti meccanici

Per modellare le prestazioni degli impianti, si è fatto riferimento alle modalità di valutazione dei rendimenti e dei consumi elettrici dovuti agli ausiliari suggeriti dalla specifica tecnica UNI TS 11300-2/3 [5,6], a partire dalle caratteristiche degli impianti effettivamente installati.

La climatizzazione è infatti effettuata tramite ventilconvettori (un terminale per ufficio, 15 per piano, con portata d'aria di 200-400 m<sup>3</sup>/h per un assorbimento elettrico di ventilazione medio di 50W), dedicati a riscaldamento o raffrescamento (impianto a due tubi), con regolazione specifica per i singoli ambienti, alimentati da un sistema di distribuzione verticale a colonne montanti non isolate (a favore di sicurezza, calcolate portata e prevalenza necessarie per servire l'edificio per una potenza complessiva di 6250W, ai fini della determinazione degli assorbimenti di pompaggio è stato assunto il fattore della specifica tecnica 0.6 W<sub>el</sub>/W<sub>idr</sub>, relativo a pompe con potenze idrauliche >=1000W).

I rendimenti termici considerati a valle della fornitura di centrale sono riportati nella tabella che segue.

**Tabella 4. Rendimenti di riferimento per le componenti di emissione, regolazione e distribuzione degli impianti.**

	Stagione invernale	Stagione estiva
Rendimento di emissione	0.940	0.980
Rendimento di regolazione	0.940	0.940
Rendimento di distribuzione	0.955	0.990

L'edificio è collegato al sistema di teleriscaldamento che serve l'intero Campus d'Ateneo, costituito da generatori in cascata con un rendimento medio pari a 0.93, da un anello di distribuzione con rendimento medio di 0.90 e da uno scambiatore di calore tra dorsale di distribuzione e derivazione all'edificio con rendimento medio di 0.95: il rendimento globale del sistema di fornitura termica alla base dell'edificio è stato dunque considerato pari a 0.80.

La generazione frigorifera è effettuata tramite un refrigeratore ad aria MTA Phoenix (Mod. PH 0443 SSF) con potenza frigorifera nominale pari a 425 kW<sub>f</sub>, installato quattro anni addietro, che serve anche la stecca di un corpo di fabbrica a due piani adiacente l'edificio in oggetto di indagine. Sulla base della scheda tecnica (Figura 14) e secondo quanto indicato nella specifica tecnica UNI TS 11300-3 è stata definita, e tradotta in input nel modello di simulazione energetica, la curva di efficienza riportata in Figura 15.

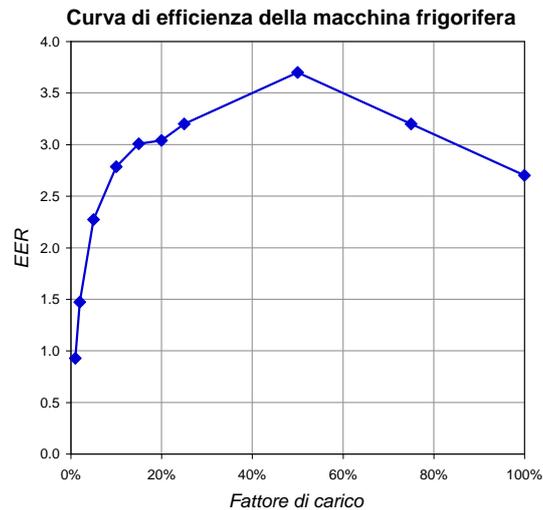
tu (°C)	Temperatura aria esterna - External air temperature ta °C																		t max. (*) (°C)
	30			35			38			40			43			45			
	Pf (kW)	Pa (kW)	Fw (m³/h)	Pf (kW)	Pa (kW)	Fw (m³/h)	Pf (kW)	Pa (kW)	Fw (m³/h)	Pf (kW)	Pa (kW)	Fw (m³/h)	Pf (kW)	Pa (kW)	Fw (m³/h)	Pf (kW)	Pa (kW)	Fw (m³/h)	
5	431	140	74	397	154	68	375	164	65	359	171	62	334	182	57	316	190	54	45
6	445	143	77	411	157	71	388	167	67	372	174	64	346	185	60	329	194	57	45
7	459	145	79	425	160	73	402	170	69	385	178	66	359	189	62				44
8	474	148	81	438	164	75	415	174	71	398	181	68	372	193	64				43
9	488	151	84	452	167	78	428	177	74	411	185	71	385	197	66				43
10	503	154	87	467	170	80	442	181	76	425	188	73							42

tu: temperatura acqua uscita evaporatore *evaporator outlet water temperature*;  
**Pf**: potenza frigorifera *cooling capacity*;  
**Pa**: potenza assorbita dai compressori *power absorbed by the compressors*;  
**Fw**: portata d'acqua ( $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) *water flow rate ( $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ )*.  
 È permessa l'interpolazione dei valori ma non la loro estrapolazione. *Interpolation is allowed, extrapolation is not permitted.*  
 Per la determinazioni di Pf, Pa e Fw per  $\Delta T$  diversi da  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  vedere la tabella "Coefficienti correttivi per  $\Delta T$  diversi da  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ". *To calculate Pf, Pa and Fw for  $\Delta T \neq 5 \text{ }^\circ\text{C}$  to examine the table "Correction factors for  $\Delta T \neq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ".*

(\*): Temperatura massima aria esterna. Se la temperatura aria esterna è superiore a t max. il refrigeratore non si blocca ma interviene il sistema "unloading" di parzializzazione. *Maximum external air temperature. When the external air temperature is higher than the t max. the chiller doesn't stop but the "unloading" system capacity control is activated.*



**Figura 14. Caratteristiche tecniche per il refrigeratore Phoenix modello PH 0443 SSF installato nell'edificio in esame (Fonte: scheda tecnica del produttore MTA Spa).**



**Figura 15. Curva di efficienza della macchina frigorifera dell'edificio in esame, ricavata secondo quanto indicato nella specifica tecnica UNI TS 11300-3 a partire dai dati della scheda tecnica.**

La stagione di riscaldamento segue quanto prescritto dal DPR 412 [7], con periodo compreso tra il 15 Ottobre al 15 Aprile, ed in modo complementare è stabilito il periodo di possibile richiesta di raffrescamento (dal 15 Aprile al 15 Ottobre). La distribuzione termica/frigorifera è stata simulata attivabile sull'intero edificio durante il periodo di occupazione, dal lunedì al venerdì dalle 08:00 alle 20:00.

## Strategie di retrofit

### Involucro edilizio

Al fine di ridurre la domanda di energia, in primo luogo è stato contemplato il miglioramento delle prestazioni isolanti dell'involucro edilizio<sup>2</sup>. Come strategia di base si è proceduto ipotizzando di adeguare le trasmittanze di involucro ai requisiti in vigore secondo Deliberazione della Giunta regionale lombarda (DGR) nr. 8/8745 del 22 Dicembre 2008. Tali limiti per la città di Milano (zona climatica E) sono pari a 0.34 W/(m<sup>2</sup> K) per le strutture opache verticali, a 0.30 W/(m<sup>2</sup> K) per gli elementi di copertura, a 0.33 W/(m<sup>2</sup> K) per i solai contro terra e a 2.2 W/(m<sup>2</sup> K) per le superfici finestrate.

Nel caso dell'edificio in esame, si è deciso di ipotizzare l'aggiunta di uno strato di isolante (polistirene) sulle pareti perimetrali (su cui posare il nuovo rivestimento in gres, previa rimozione di quello esistente ammalorato) e sugli elementi di copertura (all'estradosso della soletta sotto-falda), e tramite la sostituzione delle finestre<sup>3</sup>.

Al fine di condurre un'analisi di sensitività volta ad indagare gli effetti di livelli di isolamento dell'involucro più restrittivi di quelli vigenti<sup>4</sup>, sono stati considerati due ulteriori livelli che traducono valori di trasmittanza inferiori del 30% e del 50% rispettivamente.

Per soddisfare i requisiti DGR 8/8745, lo spessore d'isolante considerato è pari a 10 cm e le finestre, dotate di telaio in alluminio a taglio termico (trasmittanza pari a 2.10 W/m<sup>2</sup> K), hanno una vetrocamera con trasmittanza pari a 2.05 W/m<sup>2</sup> K. L'aumento dello spessore d'isolante (di 5 cm e 10 cm) ed elementi vetrati più performanti (vetrocamera doppia basso-emissiva e tripla basso-emissiva) hanno consentito di raggiungere i due obiettivi maggiormente restrittivi.

**Tabella 5. Caratteristiche termofisiche degli elementi di involucro per il livello base d'intervento (int. DGR).**

	U [W/(m <sup>2</sup> K)]	Ms [kg/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/(m <sup>2</sup> K)]
Pareti perimetrali	0.28	273	237
Copertura locali ad uso uffici	0.29	440	376
Copertura locali residenziali	0.29	463	400
Finestre	2.06	-	-

Nel livello d'intervento con trasmittanze inferiori del 30% rispetto ai requisiti DGR 8/8745, lo spessore di isolante è pari a 15 cm e l'elemento vetrato è costituito da una vetrocamera doppia con una lastra basso-emissiva e argon intercapedine.

<sup>2</sup> La prevista sostituzione del rivestimento ammalorato, in realtà, non implicherebbe l'adeguamento dell'involucro alle trasmittanze limite in vigore, quanto meno per quanto riguarda gli elementi finestrati (potrebbe essere contemplato il solo adeguamento, con tolleranza del 30% rispetto ai valori vigenti, della sola parte opaca). In ogni caso tale eventualità è stata considerata, sia per interesse di studio sia in attesa di definire quanto previsto dall'articolo 2 comma 10 della Direttiva 2010/31/UE, che prevede di assoggettare al rispetto del target NZEB i casi di ristrutturazione di edifici quando:

- a) il costo complessivo della ristrutturazione per quanto riguarda l'involucro dell'edificio o i sistemi tecnici per l'edilizia supera il 25 % del valore dell'edificio, escluso il valore del terreno sul quale questo è situato; oppure
- b) la ristrutturazione riguarda più del 25 % della superficie dell'involucro dell'edificio; gli Stati membri possono scegliere di applicare l'opzione di cui alla lettera a) o quella di cui alla lettera b);

<sup>3</sup> Gli interventi di retrofit sull'involucro edilizio sono stati contemplati per tutte le superfici dell'edificio, incluse quelle che delimitano il corpo scala non climatizzato.

<sup>4</sup> Secondo la Direttiva 2010/31/UE "è necessario istituire misure volte ad aumentare il numero di edifici che non solo rispettano i requisiti minimi vigenti, ma presentano una prestazione energetica ancora più elevata".

**Tabella 6. Caratteristiche termofisiche degli elementi di involucro per trasmittanze inferiori del 30% (int. DGR-30%).**

	U [W/(m <sup>2</sup> K)]	Ms [kg/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/(m <sup>2</sup> K)]
Pareti perimetrali	0.20	275	239
Copertura locali ad uso uffici	0.20	441	378
Copertura locali residenziali	0.20	465	402
Finestre	1.56	-	-

Nel livello d'intervento con trasmittanze inferiori del 50% rispetto ai requisiti DGR 8/8745, lo spessore di isolante è pari a 20 cm e l'elemento vetrato è costituito da una vetrocamera tripla con due lastre basso-emissive e krypton in intercapedine.

**Tabella 7. Caratteristiche termofisiche degli elementi di involucro per trasmittanze inferiori del 50% (int. DGR-50%).**

	U [W/(m <sup>2</sup> K)]	Ms [kg/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/(m <sup>2</sup> K)]
Pareti perimetrali	0.15	276	241
Copertura locali ad uso uffici	0.16	442	380
Copertura locali residenziali	0.16	466	404
Finestre	1.07	-	-

## Impianti

Lato impianti, sono stati ipotizzati i diversi interventi nel seguito descritti.

### *Impianti di generazione (int. GEOT)*

I sistemi di generazione esistenti sono stati sostituiti da una pompa di calore geotermica ad acqua di falda, caratterizzata da un COP stagionale invernale di 4.5 e un EER stagionale estivo di 5.5, comprensivi degli assorbimenti riconducibili agli ausiliari delle pompe idrauliche. Tale strategia riconduce anche agli obblighi previsti dal Decreto Lgs. 28/2011 (attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili).

### *Illuminazione artificiale (int. SENS)*

Per ridurre il consumo energetico connesso all'illuminazione artificiale, è stata considerata l'installazione di sensori combinati di presenza e di daylighting, che consentono una gestione più efficiente dell'attivazione dei corpi illuminanti: con riferimento a dati di letteratura cautelativi (cfr. Rapporto "Indici di Benchmark" 2010, Collaborazione tra ENEA e Dip.to BEST) è stata contemplata una riduzione del 45% dei carichi per illuminazione.

### *Ventilazione (int. VENT)*

E' stata ipotizzata l'installazione di un sistema meccanico di ventilazione per l'aria primaria, che consente l'adozione di un recuperatore di calore attivabile durante la stagione invernale. L'efficienza media del recuperatore e i consumi relativi ai ventilatori necessari al funzionamento del sistema sono stati selezionati da schede tecniche di apparecchi adatti a servire ogni singolo piano dell'edificio (al fine di evitare interventi edili intrusivi, non contemplabili nell'ottica del presente caso di retrofit). Per il dimensionamento delle perdite di carico è stata considerata una distribuzione di mandata tramite canali a sezione circolare di diametro 250mm, al fine di rispettare la velocità massima di 5m/s raccomandata per le destinazioni d'uso uffici<sup>5</sup>, per una lunghezza complessiva tra dorsale principale e stacchi secondari pari a 55 m (percorso zona distribuzione di ciascun piano), e una ripresa in plenum di controsoffitto. L'efficienza media del recuperatore

<sup>5</sup> Per il dimensionamento areaulico si è fatto riferimento al volume AICARR "manuale d'ausilio alla progettazione termotecnica".

(RECOVEN-H) è stata posta cautelativamente pari a 0.85, mentre i consumi elettrici dei ventilatori (SFP = 0.19 W/m<sup>3</sup>h) risultano pari a 0.14 kW, 0.11 kW e 0.06 kW rispettivamente per le portate d'aria di 750 m<sup>3</sup>/h (100%), 563 m<sup>3</sup>/h (70%) e 300 m<sup>3</sup>/h (40%).

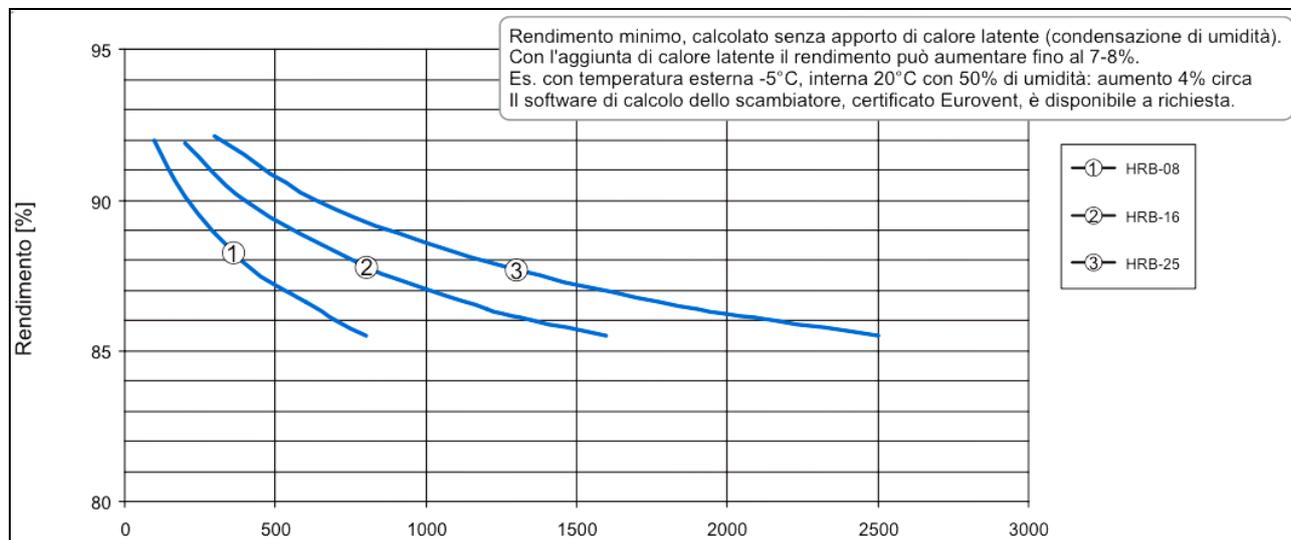


Figura 16. Rendimento dello scambiatore di calore in relazione alla portata d'aria per un'unità di ventilazione (mod. 1 - HRB-08 con portata massima 800 m<sup>3</sup>/h).

Il sistema di ventilazione meccanica, è stato simulato anche con funzionamento estivo per raffrescare con strategia passiva i locali durante le ore notturne (dalle 23:00 alle 07:00, come suggerito dalla specifica tecnica UNI TS 11300-1). La portata di ventilazione, non mediata dal recuperatore di calore grazie alla presenza della valvola di by-pass, è in questo caso pari al picco giornaliero, con 750 m<sup>3</sup>/h per ogni piano dell'edificio<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> L'analisi dettagliata dei dati ha consentito di verificare che il bilancio tra riduzione dei consumi per condizionamento dovuti al free-cooling notturno e maggiori consumi connessi al sistema di ventilazione risulta vantaggioso.

## Risultati delle simulazioni

Tra la matrice dei diversi casi simulati sono stati selezionati gli abbinamenti delle strategie di retrofit più significativi al fine di apprezzare la diversa efficacia delle soluzioni individuate.

Per semplificare la lettura di confronto tra i diversi casi, il quadro dei risultati energetici<sup>7</sup> su base annuale<sup>8</sup> è riportato nella tabella che segue, mentre i bilanci con maggior dettaglio temporale e la composizione dei consumi elettrici annuali per i casi più rappresentativi sono riportati nei grafici di Appendice 1.

**Tabella 8. Bilanci energetici dei casi simulati.**

	Fabbisogno annuo di energia termica [MWh <sub>th</sub> ]		Consumo annuo di energia finale [MWh]		Consumo annuo di energia primaria [kWh/m <sup>2</sup> ]
	Riscaldamento	Raffrescamento	Gas	Elettricità	
<b>Involucro-impianti stato di Fatto (SDF)</b>	<b>131.67</b>	<b>64.81</b>	<b>189.16</b>	<b>141.9</b>	<b>157,9</b>
Inv. (DGR) / Imp. (SDF)	43.95	84.91	62.81	149.0	123,2
Inv. (SDF) / Imp. (GEOT-SENS-VENT)	120.78	53.74	-	116.8	81,2
Inv. (DGR) + Imp. (GEOT-SENS)	50.04	76.75	-	102.5	71,2
Inv. (DGR) + Imp. (GEOT-SENS-VENT)	33.90	62.20	-	95.8	66,6
Inv. (DGR-30) + Imp. (GEOT-SENS-VENT)	22.83	72.36	-	93.6	65,0
Inv. (DGR-50) + Imp. (GEOT-SENS-VENT)	19.56	60.48	-	90.1	62,6

Dal quadro dei risultati si può desumere il diverso peso riconducibile alle singole soluzioni.

L'adeguamento dell'involucro ai livelli di isolamento in vigore implica una riduzione del 20% rispetto ai consumi di energia primaria attuali (valor medio tra la condizione con dotazione impiantistica attuale e quella con impianti sostituiti), mentre i livelli di isolamento di involucro più restrittivi (trasmittanze inferiori del 30% e del 50%) possono comportare una riduzione ulteriore del 2% e 6% rispettivamente.

Gli interventi impiantistici implicano una riduzione del 49% dei consumi totali di energia primaria, di cui il 6% è riconducibile alla ventilazione meccanica con recupero termico invernale.

<sup>7</sup> - La quota di acqua calda sanitaria non è contemplata nel presente studio. La Direttiva 2010/31/UE, infatti, definisce "«prestazione energetica di un edificio» la quantità di energia, calcolata o misurata, necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico connesso ad un uso normale dell'edificio, compresa, in particolare, l'energia utilizzata per il riscaldamento, il rinfrescamento, la ventilazione, la produzione di acqua calda e l'illuminazione". E nell'allegato I, specifica: "La prestazione energetica di un edificio è determinata sulla base della quantità di energia, reale o calcolata, consumata annualmente per soddisfare...*omissis*... e coprire il fabbisogno di acqua calda *nel settore domestico*".

- Per ottenere i valori di energia primaria sono stati considerati, secondo specifica tecnica UNI TS 11300-2, i seguenti fattori di conversione: 1 per il gas naturale e 0.45 per l'energia elettrica ( $11.86 \times 10^3 \text{ kWh}_{\text{prim}}/\text{Tep}$ , assunto  $0.187 \times 10^{-3} \text{ Tep/kWh}_{\text{el}}$  come da Delibera EEN 3/08).

<sup>8</sup> La Direttiva 2010/31/UE ai fini del calcolo dell'indice di prestazione energetica annuale dell'edificio esplicita la quota relativa al consumo elettrico per illuminazione ma non quella attribuibile alle altre apparecchiature elettriche (verosimilmente correlata all'attività svolta dagli utenti, dunque non direttamente riconducibile all'oggettiva prestazione energetica dell'edificio): coerentemente, i valori di bilancio energetico su base annua riportati nel presente rapporto non la includono, fermo restando il relativo contributo, in termini di carico, nel bilancio termico.

### Energia da fonti rinnovabili prodotta in loco

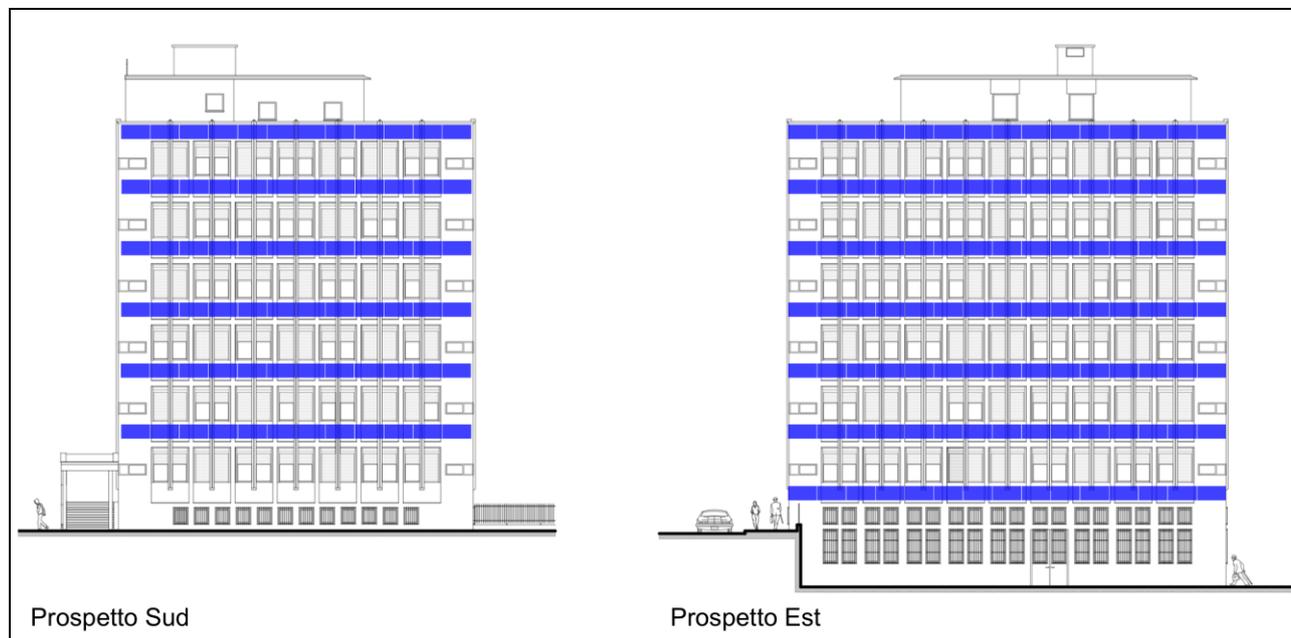
Al fine di coprire in misura significativa il fabbisogno di energia dell'edificio con fonti rinnovabili, è stato ipotizzata un'installazione fotovoltaica che interessa la copertura, le facciate sud, est ed ovest. L'edificio in esame, infatti, gode di una favorevole esposizione all'apporto solare.

In particolare sono stati considerati pannelli fotovoltaici per una superficie pari a 300 m<sup>2</sup> sulla copertura (a fronte di una superficie lorda di 500 m<sup>2</sup>, cautelativamente considerati gli scarti dovuti alle necessità di integrazione geometrica e di ombreggiamenti reciproci evitati), collocati lungo le falde inclinate e sulla copertura piana del corpo residenza/vano scala, e per una superficie complessiva pari a 370 m<sup>2</sup> sulle pareti verticali suddivise come descritto nel seguito.

Per contemplare una concreta installazione, compatibile con gli spazi architettonici e le esigenze tecnologiche, è stata ipotizzata l'adozione di pannelli di dimensioni convenzionali 80x160 cui vincolare il layout di integrazione in facciata. L'installazione prevede pannelli disposti orizzontalmente a creare fasce di PV marcapiano sulle porzioni ampiamente finestrate e pannelli a rivestire le restanti superficie cieche del fronte ovest (corpo scala). Precisamente:

- nella facciata sud (fronte strada) 12 pannelli x 6 fasce, escludendo il primo livello ad altezza d'uomo
- nella facciata est 15 pannelli x 7 fasce (la fascia aggiuntiva è consentita dall'affaccio del fronte sull'area parcheggio ribassata rispetto alla quota stradale)
- nella facciata ovest 7 pannelli x 6 fasce + 42 pannelli nella parte di facciata cieca (per la sola superficie inclusa tra la prima e l'ultima fascia marcapiano) + 30 pannelli tra le finestre dei locali di servizio (3 coppie orizzontali per ciascuno spazio di interpiano tra le finestre, 2 coppie alla base e una alla cima dell'orditura di queste ultime per allinearsi alle fasce marcapiano della parte finestrata).

Il layout risultante è rappresentato nelle figure che seguono.



**Figura 17. Prospetti Sud ed Est dell'edificio con posizionamento dei moduli PV in facciata.**



**Figura 18. Prospetto Ovest dell'edificio con posizionamento dei moduli PV in facciata.**

La valutazione dell'energia prodotta dal sistema, ipotizzata la connessione alla rete, è stata condotta tramite il software Retscreen ([www.retscreen.net](http://www.retscreen.net)), utilizzando pannelli di silicio monocristallino ed assumendo le caratteristiche riportate nella seguente tabella.

**Tabella 9. Caratteristiche assunte nelle valutazioni dell'energia prodotta da fotovoltaico per l'edificio in esame.**

<i>Pannelli fotovoltaici</i>	Potenza nominale	190 W
	Efficienza nominale (a 45°C)	15 %
	Variazione di efficienza in base alla temperatura	0.40 %/K
	Altre perdite	5 %
<i>Inverter</i>	Efficienza media	90 %
	Capacità	7.2 kW

La quantità di energia annua prodotta dalla combinazione delle diverse installazioni è riportata nella tabella seguente.

**Tabella 10. Prestazione del sistema fotovoltaico contemplato per l'edificio in esame.**

	Copertura (orizzontale)	Facciate (verticale)			TOTALE
		Sud	Est	Ovest	
Superficie pannelli [m <sup>2</sup> ]	300	92	134	145	671
Potenza nominale [kWp]	44.5	13.7	25.5	21.7	99.8
Energia annua prodotta [MWh]	46.2	10.5	12.9	14.0	83.5

Sulla base del contributo di produzione elettrica dell'installazione fotovoltaica, detratto dal bilancio dei consumi elettrici dell'edificio, si può riassumere il quadro dei consumi specifici di energia primaria dei principali casi come riportato nella tabella seguente.

**Tabella 11. Consumi specifici di energia primaria dei principali casi.**

	Consumo annuo di energia primaria [kWh/m <sup>2</sup> ]		
	Gas	Elettricità	TOT
<b>Involucro SDF/ impianti SDF</b>	<b>59,3</b>	<b>98,6</b>	<b>157,9</b>
Inv. (DGR) / Imp. (SDF)	19,7	103,6	123,2
Inv. (SDF) + (GEOT-SENS-VENT)		81,2	81,2
<b>Inv. (SDF)/Imp. (SDF)+ PV</b>	<b>59,3</b>	<b>40,6</b>	<b>99,9</b>
<b>Inv. (SDF) + (GEOT-SENS-VENT) + PV</b>		<b>23,2</b>	<b>23,2</b>
Inv. (DGR) + (GEOT-SENS)		71,2	71,2
Inv. (DGR) + (GEOT-SENS-VENT)		66,6	66,6
<b>Inv. (DGR) + (GEOT-SENS-VENT) + PV</b>		<b>8,6</b>	<b>8,6</b>
<b>Inv. (DGR) + (GEOT-SENS) + PV</b>		<b>13,2</b>	<b>13,2</b>

Dal quadro complessivo dei consumi di energia primaria dei diversi casi, appare evidente come il ricorso al fotovoltaico sia ineludibile per portare l'edificio in esame verso il target NZEB, e che per ottenere un indicatore prestazionale inferiore ai 10 kWh/m<sup>2</sup> di energia primaria siano necessari sia l'isolamento dell'involucro edilizio sia il ricorso alla ventilazione meccanica con recuperatore di calore.

## Valutazioni economiche

Nell'attesa di definire la procedura ufficiale nazionale relativa all'ottimizzazione dei costi (secondo Regolamento Delegato UE n° 244/2012, che integra la Direttiva 2010/31/UE), le valutazioni economiche sono state condotte per il presente studio in riferimento al Costo Totale annuo ( $CT$ ), definito quale somma del costo annuo di gestione e manutenzione ( $C_{g\&m}$ ) e della rata annua attualizzata dei costi iniziali (costo di investimento iniziale/fattore di attualizzazione annuo).

L'investimento iniziale ( $CI$ ) è costituito dal capitale connesso alla realizzazione dell'intervento, in termini di messa in opera di materiali e sistemi. Il fattore di attualizzazione annuo, detto anche valore attuale ( $VA$ ), ripartisce l'investimento capitale iniziale in rate annuali costanti, tenendo conto del tasso di interesse, su un numero di anni pari alla vita utile del sistema<sup>9</sup>.

Esso è dato da:

$$VA = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i}$$

con  $i$  tasso di interesse o di sconto e  $n$  numero di anni.

Inoltre, al fine di contemplare uno scenario di aumento del costo dell'energia, sono stati calcolati i valori attuali netti ( $VAN$ ) degli interventi e, sulla base di questi, i tempi di ritorno degli investimenti.

Infatti, la convenienza economica degli interventi di risparmio energetico può essere valutata con il metodo standard del valore attuale netto ( $VAN$ ), definito come differenza tra il valore attuale netto dei flussi di cassa (differenza tra ricavi e costi di gestione) e il valore attuale netto dell'investimento (cioè l'ammontare complessivo dei fondi dedicati alla realizzazione che durerà  $n$  anni).

Ipotizzando dunque un certo tasso di aumento del costo dell'energia  $a$  e attribuendo un tasso generale di inflazione  $x$ , il  $VAN$  si può stimare come segue<sup>10</sup>:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{ERa \cdot C_{ET}(1+a)^t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{C_{g\&m}(1+x)^t}{(1+i)^t} - CI$$

dove  $C_{ET}$  rappresenta il costo unitario dell'energia<sup>11</sup> che si risparmia  $ERa$

La redditività dell'intervento è superiore al costo del capitale richiesto per conseguirlo quando il  $VAN$  è positivo.

<sup>9</sup> Per il presente studio si è fatto riferimento al Regolamento Delegato UE n° 244/2012, che prevede un periodo di calcolo pari a 30 anni per gli edifici pubblici, nei quali rientra il nostro caso, e di considerare almeno uno scenario base con tasso d'interesse pari al 3%.

<sup>10</sup> Per le valutazioni condotte nel presente studio  $a = 5\%$ ;  $x = 2\%$

<sup>11</sup> I costi dell'energia fornita all'edificio in esame sono pari a 0.08 €/kWh per il gas e 0.18 €/kWh per l'elettricità (iva inclusa)

## Costi degli interventi

Per gli interventi dei diversi casi di retrofit sono stati stimati i costi<sup>12</sup> secondo l'approccio seguente.

### Lato involucro:

facendo riferimento ai costi base del previsto intervento di sostituzione del rivestimento in gres, sono stati quantificati i costi aggiuntivi relativi agli interventi di adeguamento delle trasmittanze, (rimozione dei serramenti, trasporto alla discarica, costo dei serramenti nuovi in opera, costo del cappotto in polistirene e della posa dello stesso all'estradosso della soletta di copertura, inclusa la rimozione e l'accatastamento temporaneo delle lastre inclinate, ulteriori 4 mesi di noleggio di ponteggio rispetto alla sola sostituzione del gres). Verosimilmente, non sono stati assegnati costi di G&M annui.

I costi attribuiti alle diverse voci sono riassunti nella tabella che segue.

**Tabella 12. Stima dei costi di intervento sull'involucro edilizio.**

	Quantità	Costi [k€]		
<i>Opere necessarie al risanamento del rivestimento</i>				
Rimozione del rivestimento in gres	1487 m <sup>2</sup>			
Trasporto in discarica delle macerie del rivestimento	ca. 100 m <sup>3</sup>			
Lavaggio con idropulitrice	1487 m <sup>2</sup>			
Intonaco rustico di sabbia e cemento (materiale e posa)	1487 m <sup>2</sup>			
Rivestimento in gres (materiale e posa con collante)	1487 m <sup>2</sup>			
Noleggio del ponteggio	2113 m <sup>2</sup>			
Installazioni di cantiere (inclusi teli e antifurto)	-			
<b>TOTALE</b>				<b>270.08</b>
<i>Opere extra per 'adeguamento delle trasmittanze d'involucro</i>				
		<i>DGR</i>	<i>DGR-30</i>	<i>DGR-50</i>
Rimozione dei serramenti	626 m <sup>2</sup>	18.77	18.77	18.77
Trasporto in discarica dei serramenti	ca. 60 m <sup>3</sup>	8.50	8.50	8.50
Serramenti (materiale e posa)	626 m <sup>2</sup>	500.60	531.88	563.17
Isolamento a cappotto delle facciate (materiale e posa)	1487 m <sup>2</sup>	104.11	118.98	133.85
Isolamento per la copertura (materiale e posa)	310 m <sup>2</sup>	7.44	9.92	12.40
Rimozione e riposa della lamiera di copertura	310 m <sup>2</sup>	12.40	12.40	12.40
Extracosto per ponteggio	2113 m <sup>2</sup>	8.45	8.45	8.45
<b>TOTALE extracosti</b>		<b>660.27</b>	<b>708.91</b>	<b>757.55</b>
<b>TOTALE COSTI</b>		<b>930.35</b>	<b>979.00</b>	<b>1'027.62</b>

### Lato impianti sono stati ipotizzati:

- per la pompa di calore geotermica 65000 € (taglia 200kW), inclusi gli accessori e compresa la rimozione del chiller esistente, + 12.000 € di pozzi con sonde geotermiche (2x30 metri, considerato il livello dell'acqua di falda della zona). I costi di manutenzione annui sono stati considerati assimilabili a quelli del chiller esistente (non allocati come extracosti). Il chiller esistente, di recente installazione, è stato ipotizzato come riutilizzato per servire altri edifici del campus (non ne è stato considerato lo smaltimento).
- per quanto riguarda i sensori di controllo delle luci si è fatto riferimento al sistema a zone Occuswitch DALI della Philips, combinato per rilevamento presenza e livello di luce naturale, di immediata installazione anche su impianti esistenti. Come costo di G&M annuo si è ipotizzata una

<sup>12</sup> Al fine di ottenere una stima coerente con i prezzi del mercato reale, che spesso si discosta dalle statistiche sulla base delle quali sono strutturati i prezziari delle opere edili ed impiantistiche, le stime sono state preventivate di concerto con alcune aziende del settore.

sostituzione del 5% dei sensori installati (la manutenzione ordinaria dei corpi illuminanti è sovrapponibile a quella esistente, se non inferiore considerata la riduzione dell'attivazione degli stessi)

**Tabella 13. Valutazione dei costi relativi ai sensori di controllo per l'attivazione delle luci.**

<i>Valutazione della quantità di sensori</i>	<i>Piani ad uso ufficio</i>	<i>Centro stampa</i>	<i>Totale</i>
	1 sensore/ufficio	60 lampade	
	15 uffici/piano x 6 piani	1 sensore/15 lampade	
	90 sensori	4 sensori	94 sensori
<i>Valutazione dei costi per sensore</i>	<i>Costo del materiale</i>	<i>Costo per installazione</i>	<i>Totale</i>
	110 €/cad	100 €/cad	210 €/cad
<b>Costo totale di installazione</b>			<b>19'740 €</b>
<b>Costo di gestione e manutenzione</b>			<b>517 €/anno</b>

- per quanto riguarda l'impianto di ventilazione con recuperatore si è fatto riferimento al modello utilizzato per le simulazioni, prevedendone 7 (uno per piano), con ripresa in plenum di controsoffitto nei piani ufficio e con ripresa libera nell'open-space del centro stampa. La manutenzione annua prevede due sopralluoghi per pulizia, con sostituzione dei filtri a inizio della stagione invernale.

**Tabella 14. Valutazione dei costi relativi al sistema di ventilazione con recuperatore di calore.**

	<b>Costo per unità</b>	<b>Quantità</b>	<b>Totale</b>
Unità di ventilazione	8'000 €/cad	7 (1 unità/piano)	56'000 €
Canalizzazione e bocchette	5'000 €/piano uffici	6 piani ad uso uffici	32'500 €
	2'500 €/centro stampa	1 centro stampa	
Controsoffitto per plenum di ripresa	40 €/m <sup>2</sup>	60 m <sup>2</sup> /piano x 6 piani	14'400€
<b>Costo totale per installazione</b>			<b>102'900 €</b>
<b>Costo per gestione e manutenzione</b>			<b>1'400 €/anno</b>

- Per quanto riguarda il fotovoltaico, si è attribuito un costo pari a 1800 €/kW<sub>p</sub> in opera (considerato che di recente, a discapito della qualità del sistema, il mercato propone costi anche inferiori) per un totale di 186 k€, con costi di G&M posti pari al 2% (inclusa la sostituzione decennale dell'inverter).

### Analisi energetico-economiche a confronto

Un primo confronto, rappresentato nel grafico che segue, riguarda gli effetti delle principali famiglie di interventi sull'edificio. Sul grafico vengono riportati in ascissa i consumi di energia primaria relativi ai diversi casi analizzati e in ordinata i rispettivi costi<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Di concerto con quanto stabilito nel gruppo di lavoro dell'Annex 56 della IEA "Cost Effective Energy and GHG Optimization in Building Renovation", nelle analisi di bilancio non sono stati considerati i benefici economici derivanti da strategie di sostegno della tecnologia fotovoltaica (Conto Energia). Tale opzione, inoltre, è contemplata nel quadro metodologico del Regolamento Delegato UE 244/2012.

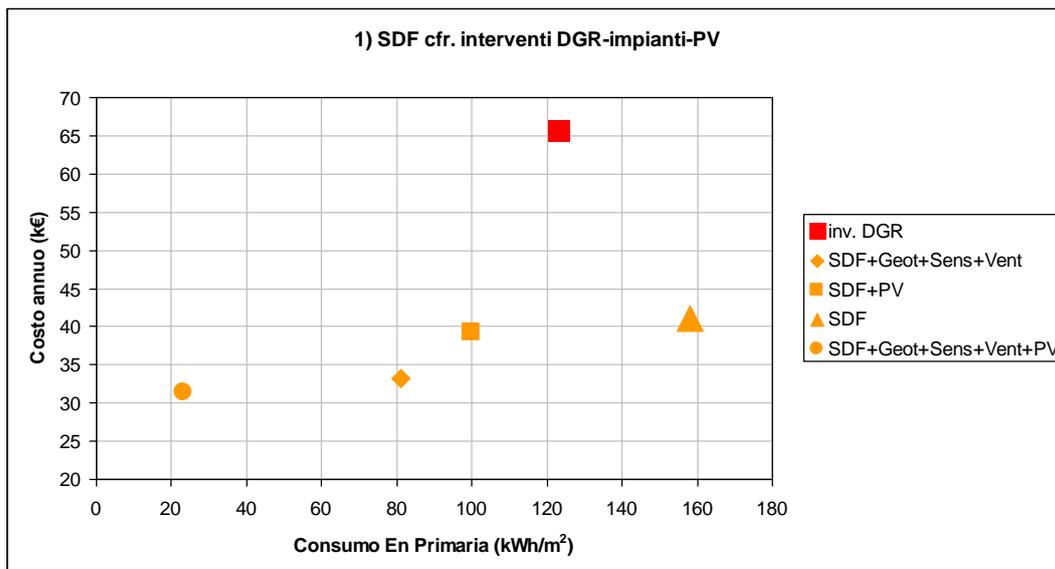


Figura 19. Costi annui e consumi di energia primaria: stato di fatto e principali famiglie di interventi.

Dal grafico si evince che per l'edificio in esame gli interventi impiantistici e il ricorso al sistema fotovoltaico sono vantaggiosi in ogni caso, con la migliore soluzione attestata dalla sovrapposizione delle diverse opzioni. Diversamente, portare l'involucro ai limiti di legge non risulta economicamente vantaggioso (rispetto allo stato attuale – SDF – si ha una diminuzione del consumo di energia primaria a discapito dell'aumento del costo annuo). Ciò è dovuto al fatto che non è prevista una ristrutturazione integrale cui attribuire una consistente quota di costo al fine di ridurre, in proporzione, l'extracosto dell'isolamento (in particolare, non è prevista la sostituzione dei serramenti che incide per l'80%).

A questo proposito è interessante notare che, nel caso in cui l'adeguamento delle trasmittanze di involucro opaco e trasparente ai limiti di legge fosse dato per inevitabile, l'extracosto connesso ad ulteriori implementazioni di isolamento non risulterebbe economicamente vantaggioso, come si evince dal secondo grafico: l'involucro DGR implementato con nuovi impianti vede calare sia la quantità di energia consumata sia il costo annuo, mentre quest'ultimo indicatore si incrementa nel caso di ulteriori livelli di isolamento.

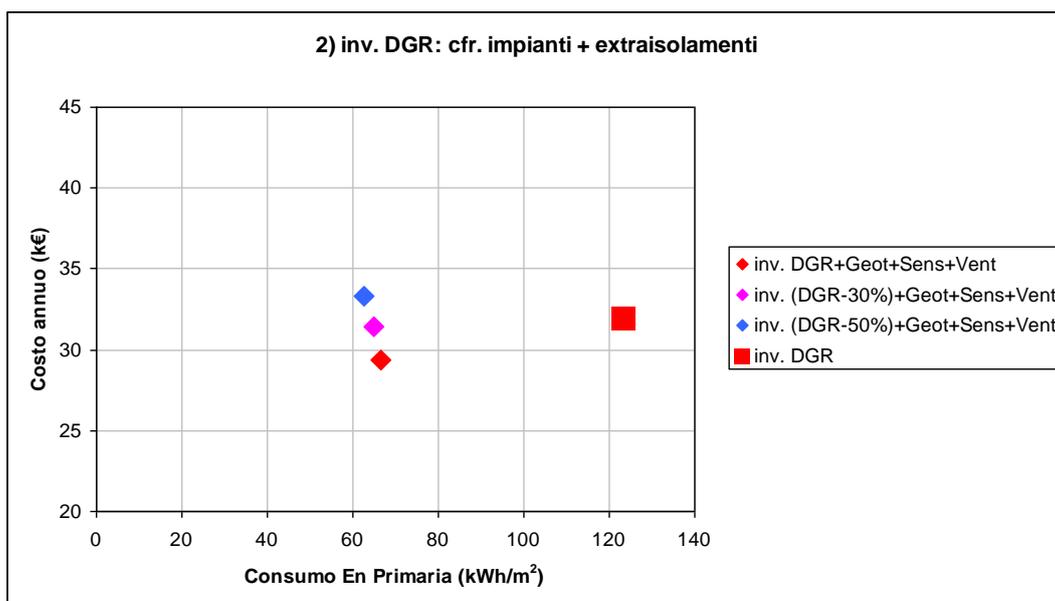
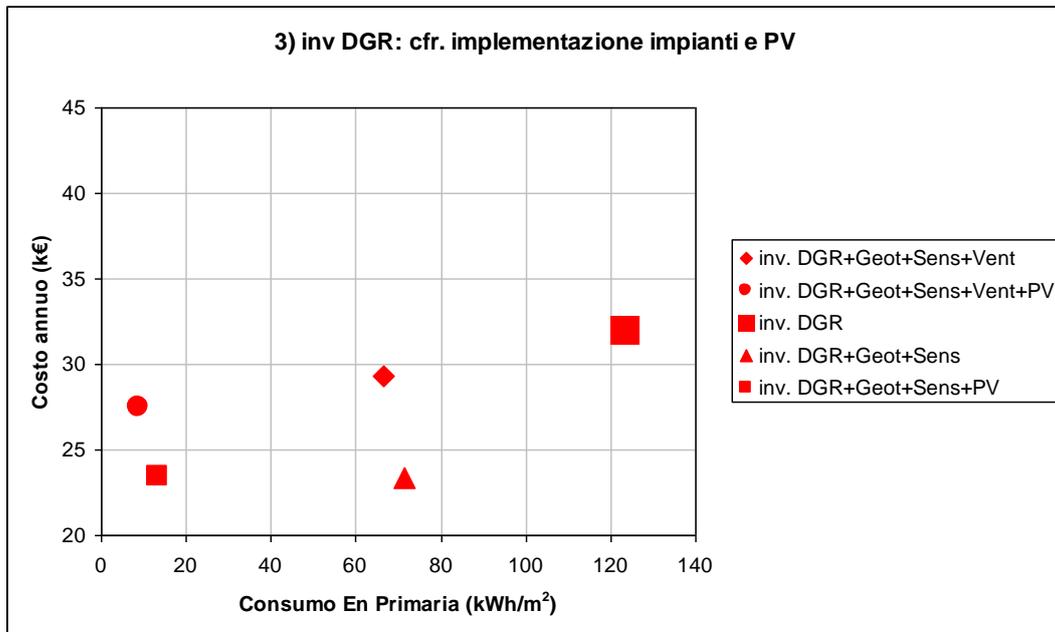


Figura 20. Costi annui e consumi di energia primaria: Inv. DGR + impianti e implementazioni DGR-30/DGR-50 .

Assumendo la stessa base di confronto (involucro isolato ai limiti di legge), il terzo grafico evidenzia che, nel merito delle strategie impiantistiche, il contributo dato dal sistema di ventilazione con recupero termico non risulterebbe economicamente vantaggioso per l'edificio in esame. Probabilmente ciò non si verificherebbe nel caso in cui l'edificio fosse dotato di impianto di climatizzazione a tutta aria e il costo di implementazione si potesse ricondurre alla sola installazione del sistema di recupero termico (scambiatore).



**Figura 21. Costi annui e consumi di energia primaria: involucro DGR + implementazione impianti e PV.**

In linea generale, dunque, è da sottolineare che, considerando le implicazioni economiche, la mera sovrapposizione di interventi volti a ridurre i consumi energetici in fase di gestione non si rivela necessariamente virtuosa.

#### VAN e tempo di ritorno degli investimenti

Per contemplare lo scenario di aumento del costo dell'energia sono stati calcolati i VAN degli interventi, rappresentati nei grafici che seguono, da cui si evincono anche i tempi di ritorno degli investimenti.

Il primo grafico riassume le valutazioni relative agli interventi contemplati sull'involucro allo stato di fatto (l'adeguamento dell'involucro ai limiti di trasmittanza attuali non è incluso poiché rivela un tempo di ritorno superiore agli 80 anni).

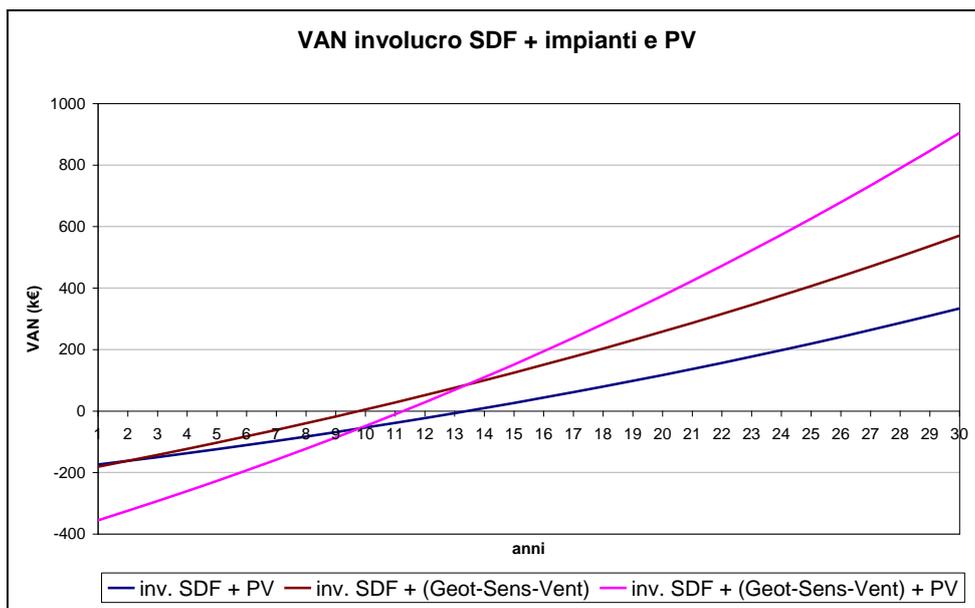


Figura 22. VAN interventi involucro SDF.

Il tempo di ritorno dell’investimento relativo alla tecnologia fotovoltaica si attesta sui 14 anni, mentre le strategie impiantistiche rivelano un VAN positivo a partire dal 10° anno. L’abbinamento delle diverse soluzioni comporta un tempo di ritorno intermedio di 12 anni.

Il secondo grafico rappresenta gli interventi effettuati ipotizzando come base di partenza l’involucro edilizio adeguato alle trasmittanze limite attuali.

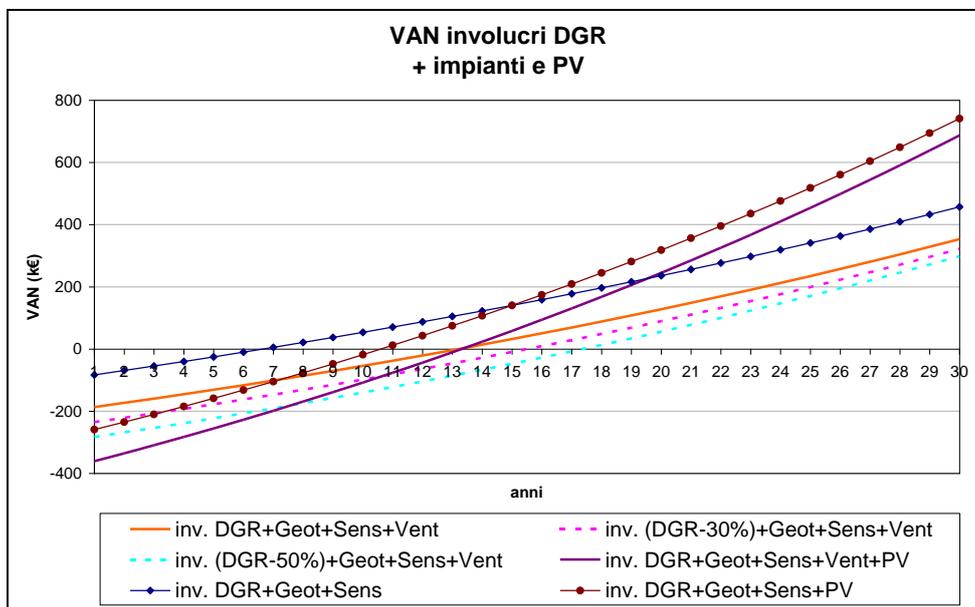


Figura 23. VAN involucri DGR + impianti e PV.

Dal grafico si può notare che il tempo di ritorno dell’installazione geotermica abbinata ai sensori di daylighting/presenza per l’illuminazione artificiale si attesta in soli 7 anni. Associando anche l’installazione fotovoltaica il tempo di ritorno si porta a 11 anni, mentre associando l’impianto di ventilazione forzata con recuperatore il tempo di ritorno raddoppia (14 anni).

Con l’involucro isolato, la sovrapposizione delle diverse strategie impiantistiche e il loro abbinamento all’installazione fotovoltaica registrano un tempo di ritorno dell’investimento analogo, fermo restando che

includendo la tecnologia fotovoltaica, a fronte di un investimento iniziale doppio, si prefigurano i maggiori benefici di flusso di cassa una volta ripagato l'investimento.

Infine è da notare come l'aumento delle prestazioni isolanti dell'involucro, prevedendo soluzioni attestanti trasmittanze inferiori rispetto ai limiti di legge del 30% in un caso e del 50% nell'altro, sposti il tempo di ritorno a 16 e 18 anni rispettivamente.

### Bilanci di energia primaria e di GHG

I risultati delle elaborazioni condotte, riassunti in termini di indicatori energetico-ambientali, sono rappresentati nei grafici che seguono<sup>14</sup>, distinguendo gli effetti dei diversi interventi ipotizzati mantenendo l’involucro allo stato di fatto e isolandolo.

Nel primo caso l’obiettivo minimo di consumo di energia primaria conseguibile (23 kWh/m<sup>2</sup> contro gli attuali 160 kWh/m<sup>2</sup>) corrisponde ad un quantitativo di emissioni annue di gas serra pari a 14 tonnellate (a fronte delle 99 emesse attualmente).

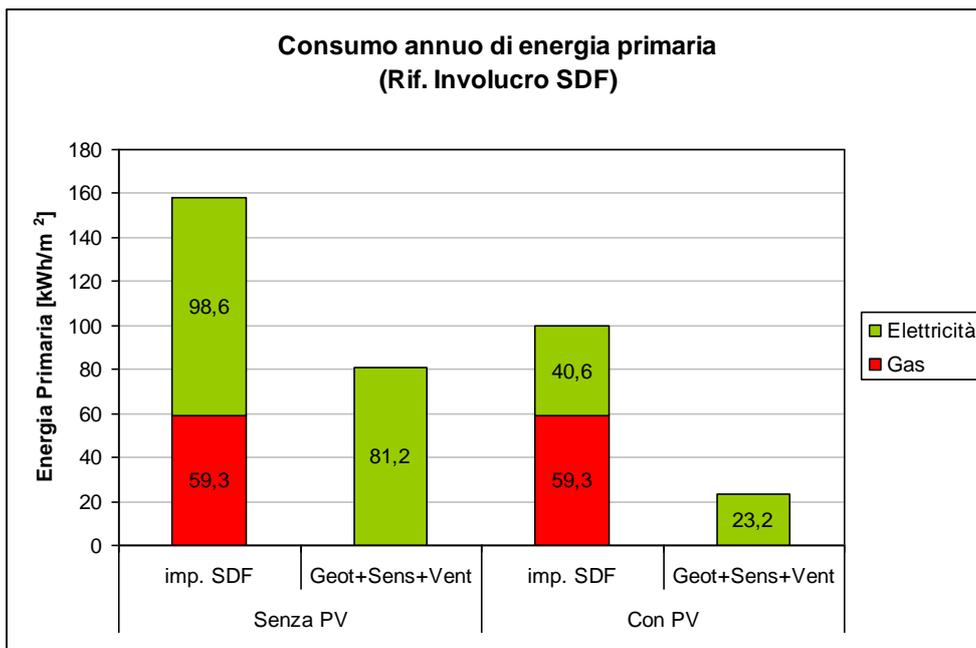


Figura 24. Consumo annuo specifico di energia primaria (casi con involucro SDF).

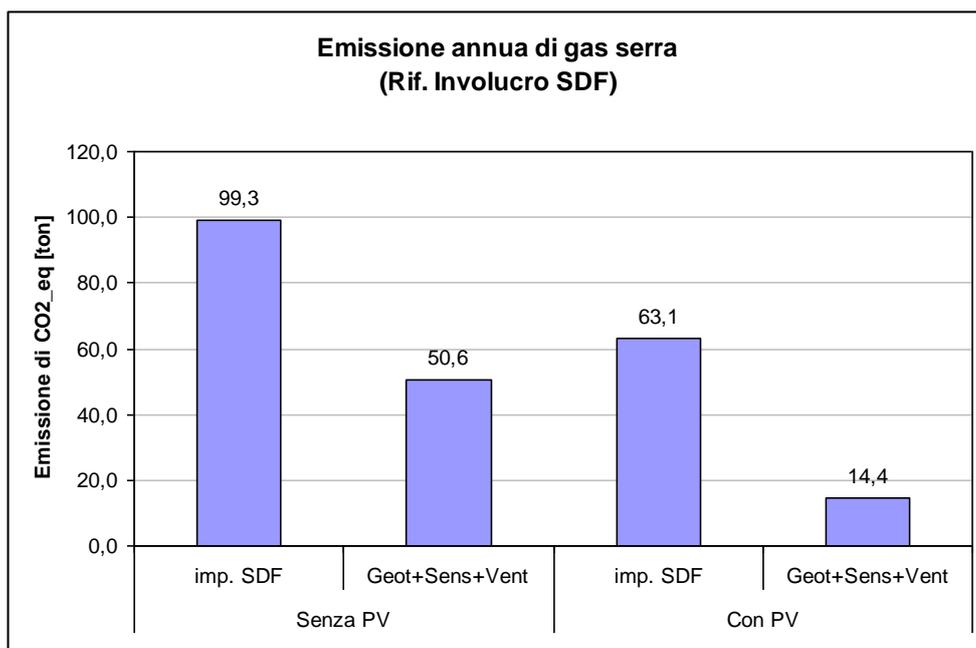
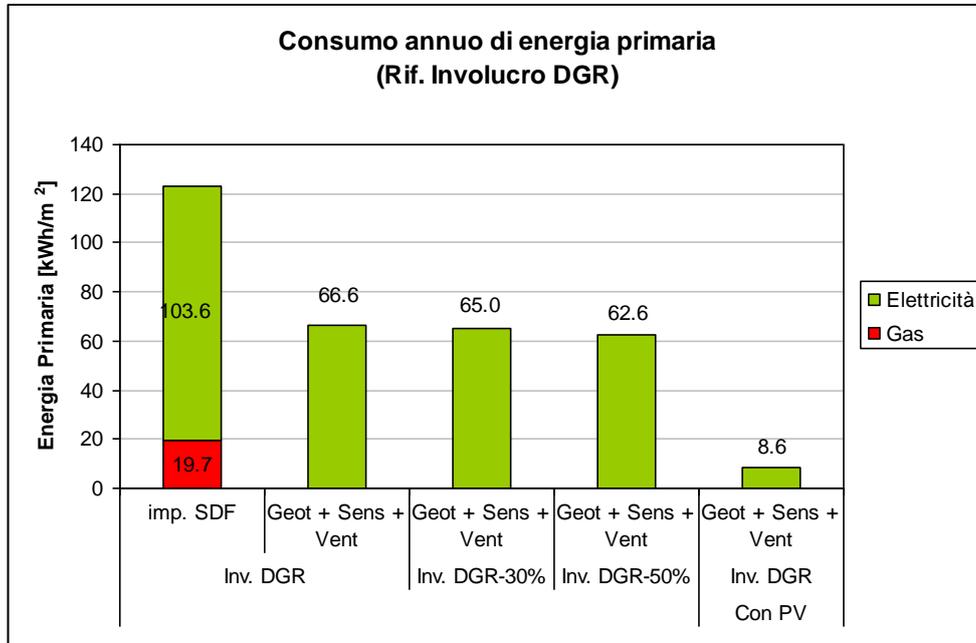


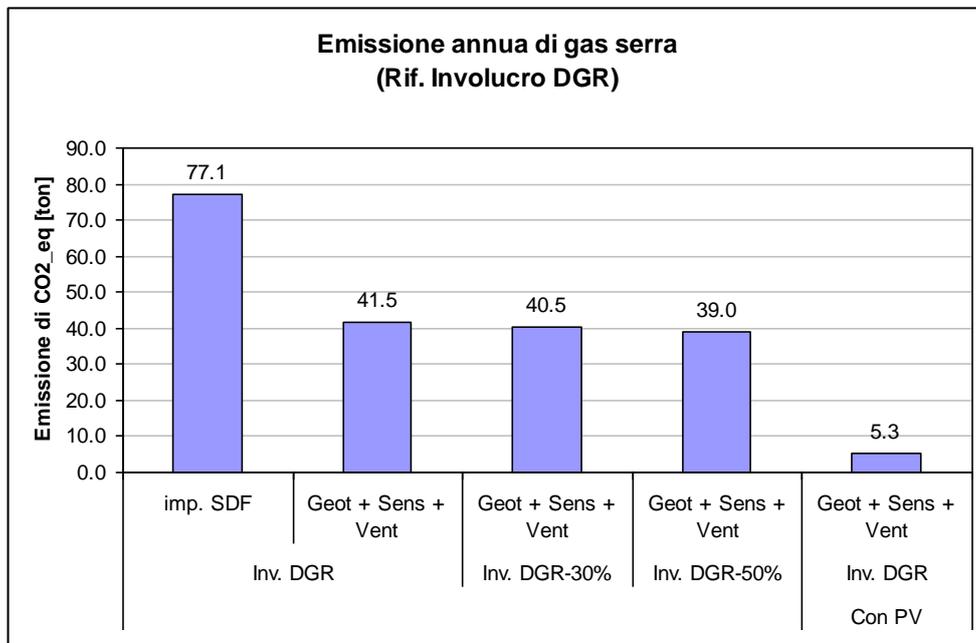
Figura 25. Emissioni annue di gas serra (casi con involucro SDF).

<sup>14</sup> I fattori di emissione per il calcolo della CO<sub>2</sub>\_eq sono stati recepiti dal prospetto contenuto nell’allegato al Decreto Regionale 5796/2009: per il gas naturale 0.1998 kg di CO<sub>2</sub>\_eq/kWh e per l’energia elettrica 0.4332 kg di CO<sub>2</sub>\_eq/kWh

Nel secondo caso l'obiettivo minimo di consumo di energia primaria conseguibile (8.6 kWh/m<sup>2</sup>) corrisponde ad un quantitativo di emissioni annue di gas serra pari a 5 tonnellate (che, a prescindere delle considerazioni economiche precedentemente esposte, potrebbero scendere a 4 o 3 riducendo le trasmittanze dell'involucro edilizio rispettivamente del 30% o del 50%).



**Figura 26. Consumo annuo specifico di energia primaria (casi con involucro DGR).**



**Figura 27. Emissioni annue di gas serra (casi con involucro DGR).**

### Considerazioni integrative riferite agli aspetti LCA

Il tema del Life Cycle Assessment è assai critico e dibattuto, ma entrerà inevitabilmente a far parte integrante del bilancio energetico-ambientale anche nell'ambito delle costruzioni. Attualmente le difficoltà di valutazione sono prevalentemente riconducibili alle diverse interpretazioni circa l'ampiezza di confine spazio/temporale da considerare per i processi energetici connessi alle realizzazioni (che possono andare dall'estrazione delle materie prime necessarie alla realizzazione dei prodotti, alle implicazioni connesse al loro trasporto e alla loro installazione, alla dismissione di fine vita o al riciclo degli stessi) e alla difficoltà di reperimento di dati che riconducano ad impatti energetico-ambientali oggettivi: le banche-dati attualmente disponibili sono infatti ancora limitate e, poiché relative a realtà produttive specifiche, se utilizzate per altri contesti possono dar luogo a valutazioni energetiche ed impatti ambientali poco coerenti.

Ad esempio, per l'edificio sottoposto ad analisi nel presente studio è prevista l'installazione di un sistema fotovoltaico. In base alle elaborazioni svolte da Coiante [8], che ha stimato le emissioni incorporate di pannelli fotovoltaici prodotti in Europa e in Cina, con riferimento ai dati elaborati da Alsema e de Wild-Scholten [9] di energia associata alla realizzazione di un kW<sub>p</sub> (11833 MJ/kW<sub>p</sub>), per produrre l'impianto da noi considerato (circa 100 kW<sub>p</sub>, dunque 1183 GJ di energia incorporata che, raffrontati al consumo di 669 GJ energia primaria elettrica evitato grazie all'operatività del sistema, si recupererebbero in due anni) si potrebbe avere un impatto pari a 158 ton di CO<sub>2</sub><sub>eq</sub> nel caso di pannelli acquistati sul mercato Europeo e pari a 343 ton di CO<sub>2</sub><sub>eq</sub> nel caso di pannelli provenienti dal mercato Cinese (ormai ampiamente diffusi anche nella nostra realtà): considerate le 37 ton di CO<sub>2</sub><sub>eq</sub>/annue evitate dall'operatività del sistema, il bilancio delle emissioni andrebbe in positivo dopo 4 anni nel primo caso e dopo 9 nel secondo.

Nella consapevolezza di tali criticità, è stato fatto un approfondimento d'analisi degli impatti energetico-ambientali avvalendosi dei dati presenti nella banca dati Ecoinvent (cfr. appendice 2), che è strutturata con riferimento prevalente alla realtà produttiva svizzera (recepita assimilabile alla nostra, in prima analisi di sensitività). Data la scarsità di dati relativi alle soluzioni impiantistiche, sono state valutate le sole soluzioni tecnologiche relative agli interventi sull'involucro edilizio. Il confronto tra gli impatti energetico-ambientali riconducibili alla realizzazione degli interventi e i benefici conseguibili in fase di gestione, ad edificio implementato, sono riportati nella tabella che segue.

**Tabella 15. Impatti energetico-ambientali degli interventi di isolamento dell'involucro e anni di ammortamento rispetto ai benefici perseguibili in fase di gestione post-intervento.**

INTERVENTO	Energia incorporata (GJ)	En. prim. annua evitata (GJ/a)	anni recupero energia	Impatto GHG (ton di CO <sub>2</sub> <sub>eq</sub> )	Emissioni evitate annue (ton CO <sub>2</sub> <sub>eq</sub> /a)	anni recupero emissioni
<b>DGR (imp. SDF)</b>		397.3	<b>13.5</b>		22.2	<b>15.3</b>
<b>DGR</b>	5353.8	167.7	<b>31.9</b>	339.7	9.1	<b>37.3</b>
<b>Increment. DGR-30</b>	+293.7	18.4	<b>+ 16.0</b>	+11.8	1.0	<b>+ 11.8</b>
<b>Increment. DGR-50</b>	+548.8	27.6	<b>+ 19.9</b>	+27.2	1.5	<b>+ 18.1</b>

L'intervento di adeguamento dell'involucro ai requisiti DGR, che comporta un risparmio annuo di energia primaria in fase di gestione pari a 397.3 GJ nel caso in cui non si sostituisca l'attuale sistema di riscaldamento a metano e pari a 167.7 GJ nel caso di implementazioni impiantistiche (che implicano la pompa di calore geotermica elettrica), vedrebbe dunque compensare l'energia incorporata rispettivamente in 13.5 e in 32 anni di vita dell'edificio. Le quantità di emissione di gas serra evitate annue, pari a 22.2 ton di CO<sub>2</sub><sub>eq</sub> nel primo caso e a 9.1 ton di CO<sub>2</sub><sub>eq</sub> nel secondo, compenserebbero quelle necessarie alla realizzazione dell'intervento in 15 e 37 anni rispettivamente.

L'implementazione DGR-30% comporta un'ulteriore quota di energia incorporata, pari a 293.7 GJ, cui vanno aggiunti altri 548.8 GJ nel caso in cui si voglia raggiungere i livelli DGR-50%: considerato che tali interventi,

contemplati nello studio solo in abbinamento a pompa di calore geotermica, implicano rispettivamente incrementi di risparmio energetico annuo pari a 18.4 e 27.6 GJ, la compensazione avverrebbe nell'arco di altri 16 anni per raggiungere il livello DGR-30% o di ulteriori 20 per raggiungere il livello DGR-50%. Dal punto di vista delle emissioni, quelle incorporate verrebbero compensate 12 anni aggiuntivi per il target DGR-30% e in altri 18 per quello DGR-50%.

Dalle implicazioni legate agli aspetti LCA, dunque, emerge che i vantaggi conseguibili in fase di gestione post-intervento possono ricondurre a soluzioni di retrofit con impatti energetico-ambientali realizzativi significativi e che i bilanci costi/benefici (energetico-ambientali) dei singoli interventi possono variare di molto in base all'abbinamento delle diverse soluzioni. Tali considerazioni, ovviamente, possono valere anche per le nuove costruzioni.

## Conclusioni

Il presente lavoro ha mosso dall'ipotesi di riqualificare un edificio rappresentativo del terziario, studiandone gli scenari di implementazione al fine di prefigurare gli effetti di un possibile adeguamento ai requisiti NZEB. L'edificio scelto come caso di studio è tra quelli costituenti il Campus Città Studi del Politecnico di Milano. Le diverse ipotesi di intervento ai fini energetici, che implementerebbero la prevista manutenzione straordinaria del rivestimento delle facciate, sono state considerate in termini di energia, di costi e di emissioni ad effetto serra.

La valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio è stata condotta tramite l'utilizzo del codice di calcolo TRNSYS, dettagliato strumento d'analisi del bilancio dei flussi energetici del sistema edificio-impianto in regime dinamico. I consumi energetici stimati per l'edificio allo stato di fatto, che risultano allineati ai benchmark della destinazione d'uso ufficio nel contesto climatico di Milano (cfr. Rapporto "Indici di Benchmark" 2010, Collaborazione tra ENEA e Dip.to BEST) potranno essere successivamente calibrati con i consumi (in particolare elettrici) realmente registrati, come meglio specificato più avanti.

Gli esiti dello studio dimostrano che, dal punto di vista delle prestazioni energetico-ambientali, intervenendo sull'esistente con soluzioni tecnologiche diffuse e consolidate è possibile ridurre i fabbisogni di energia primaria (e delle emissioni ad effetto serra associate) all'ordine del 40% rispetto a quelli attuali e che, facendo ricorso all'energia da fonte di rinnovabile prodotta in loco, il bilancio può attestare un consumo energetico prossimo allo zero: nel nostro caso, con l'impianto fotovoltaico, inferiore a 10 kWh/m<sup>2</sup>a (pari al 5% dei consumi e delle emissioni di gas serra attuali) e, abbinando i massimi livelli di isolamento dell'involucro edilizio considerati nello studio, inferiore a 5 kWh/m<sup>2</sup>a (circa il 3% dell'energia consumata e delle emissioni attuali).

Gli edifici esistenti rappresentano dunque ampio potenziale di riferimento per perseguire gli obiettivi energetici ed ambientali delle politiche europee e nazionali in atto.

Certo è che, in particolare, il mix delle soluzioni di retrofit che possono concorrere al conseguimento del target NZEB si riferisce a tecnologie edilizio-impiantistiche diverse in quanto ad efficacia e che, dal punto di vista della concreta fattibilità, il criterio di definizione delle strategie da adottare non può prescindere dagli aspetti economici. Con le assunzioni adottate nel presente studio, le analisi condotte in proposito hanno evidenziato delle criticità connesse all'implementazione di alcune soluzioni: per l'edificio esaminato, la sostituzione delle finestre, l'aumento dei livelli di isolamento dell'involucro edilizio oltre gli standard attuali e l'installazione dell'impianto di ventilazione con recuperatore non sarebbero economicamente vantaggiose. Infatti a livello nazionale i "requisiti minimi di prestazione energetica" per gli edifici nuovi ed esistenti e per gli elementi edilizi saranno fissati una volta definiti i "livelli ottimali in funzione dei costi" (secondo il quadro metodologico del Regolamento Delegato (UE) n° 244/2012) e la stessa International Energy Agency ha di recente avviato programmi dedicati a concertare le metodologie di ottimizzazione a livello internazionale. Nell'ambito dell'Annex 56 "Cost Effective Energy and GHG Optimization in Building Renovation", cui il Politecnico di Milano ha aderito, si sta sviluppando una metodologia a partire da case-studies reali ed alcune assunzioni procedurali sono state recepite per svolgere il presente studio. Tra queste, il riferimento all'analisi dell'Embodied Energy e GHG delle soluzioni di retrofit. A seguito delle valutazioni LCA condotte in prima analisi sugli interventi previsti per migliorare le prestazioni isolanti dell'involucro dell'edificio in esame, sono emersi impatti energetico-ambientali non trascurabili: per realizzare l'intervento di adeguamento delle trasmittanze ai limiti attuali è necessario un dispendio energetico riconducibile alla quantità di energia risparmiata in fase di gestione nell'arco di 13 anni di vita utile post-intervento (15 anni per quanto riguarda le implicazioni in termini di gas serra associate) mantenendo il sistema di generazione termica a metano, e nell'arco di 32 anni (37 per le emissioni serra) nel caso in cui si adotti la pompa di calore geotermica (inoltre, è emerso che a partire da questa condizione, voler dimezzare le trasmittanze dell'involucro rispetto ai valori limite attuali significherebbe più che raddoppiare il numero di anni di ammortamento energetico-ambientale). Tali aspetti potrebbero dunque comportare una rivisitazione degli scenari definiti dalle politiche energetiche ed ambientali per il settore delle costruzioni.

Da un lato, quindi, i possibili sviluppi della ricerca auspicherebbero una partecipazione attiva ai lavori dell'Annex 56 della IEA, per approfondire il tema dell'ottimizzazione delle strategie di retrofit di concerto con gli approcci in corso di definizione a livello internazionale.

Dall'altro lato, e per la Ricerca del Sistema Elettrico Nazionale più in generale, potrebbe essere di grande interesse condurre elaborazioni di Benchmark reali, a partire dai dati di consumo elettrico registrati in un parco edifici del terziario consistente quale è quello del Politecnico di Milano.

Presso il Politecnico di Milano, infatti, è stato avviato a inizio dell'anno corrente un programma di monitoraggio dei consumi elettrici per i 57 corpi di fabbrica costituenti l'Ateneo: il software di lettura e archiviazione dati è attualmente in fase di beta-testing e, in alcuni casi, per ottenere dati relativi a singoli edifici (incluso quello oggetto del presente studio) facenti capo a quadri elettrici comuni a più fabbricati, risulterà necessario procedere per estrapolazione. Con gli interventi correttivi in atto, a fine anno disporremo di una lettura affidabile dei dati di consumo in tempo reale e dello storico del primo anno di archiviazione per tutti i fabbricati d'Ateneo.

## Riferimenti bibliografici

1. Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW, Duffie JA, Duffie NA, Freeman TL et al. TRNSYS 16 - A Transient System Simulation program - User manual. Madison: The Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin; 2004.
2. UNI 10339, Impianti arealucici a fini di benessere – Generalità, classificazione e requisiti. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 1995
3. UNI TS 11300-1, Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008
4. SIA 2024, Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik. Zurigo: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2006
5. 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. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008
6. UNI TS 11300-3, Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2010
7. D.P.R. 412 (1993), Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione 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. (aggiornata dal D.P.R.551/99)
8. Coiante D, "Il peccato originale del fotovoltaico", [www.aspoitalia.it](http://www.aspoitalia.it), Dicembre 2009.
9. Alsema EA, deWild-Schoten, "The real environmental impacts of crystalline Silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacturers data", 20th European PV Solar Energy Conference, Giugno 2005, Barcellona.

## Appendice 1

*Grafici delle principali simulazioni.*

Bilanci energetici dello Stato Di Fatto

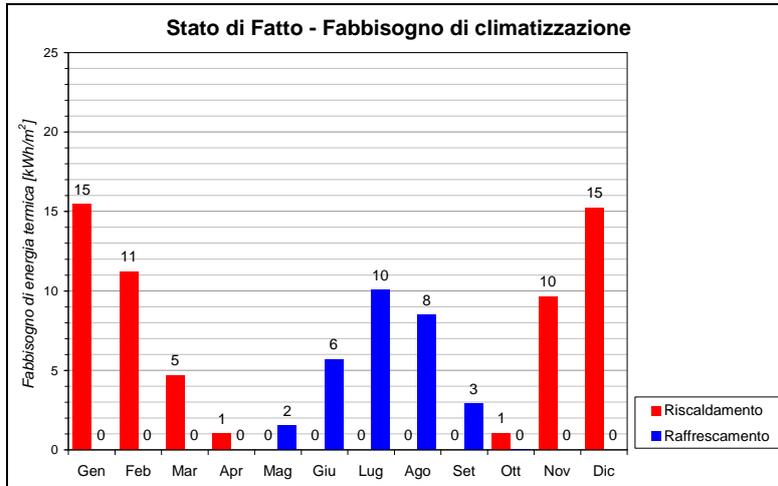


Figura 28. Fabbisogno mensile di energia termica utile per l'edificio allo Stato di Fatto

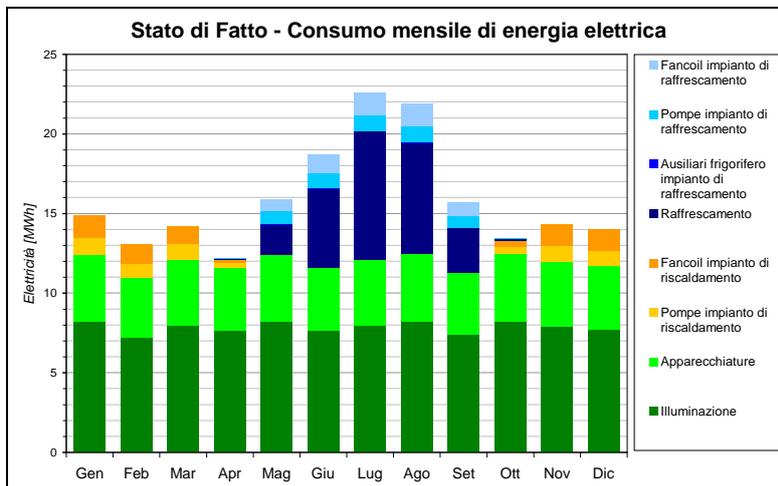


Figura 29. Composizione del consumo mensile di energia elettrica per l'edificio allo Stato di Fatto

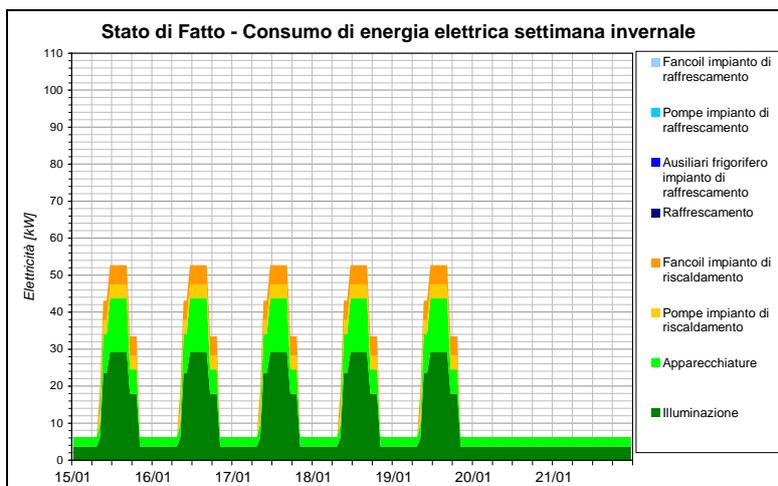


Figura 30. Consumo di energia elettrica per l'edificio allo Stato di Fatto (settimana-tipo invernale)

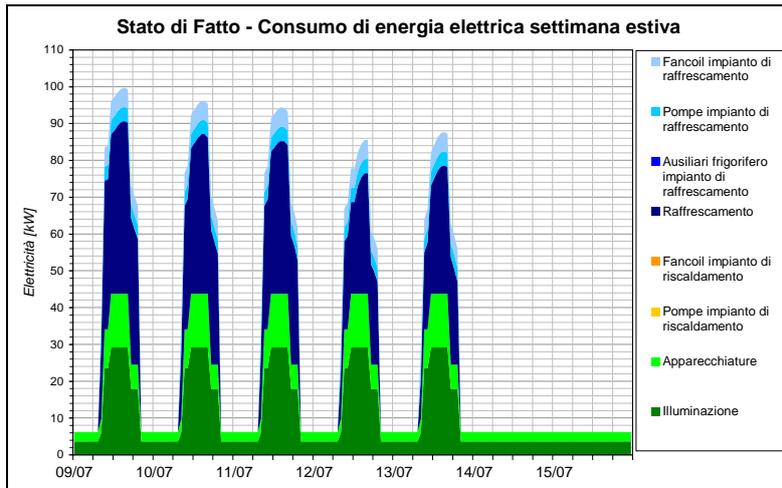


Figura 31. Consumo di energia elettrica per l'edificio allo Stato di Fatto (settimana-tipo estiva)

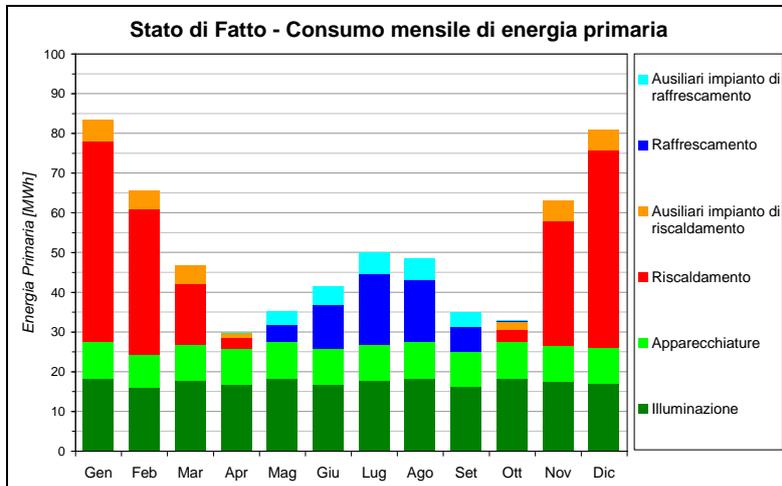


Figura 32. Composizione del consumo mensile di energia primaria per l'edificio allo Stato di Fatto

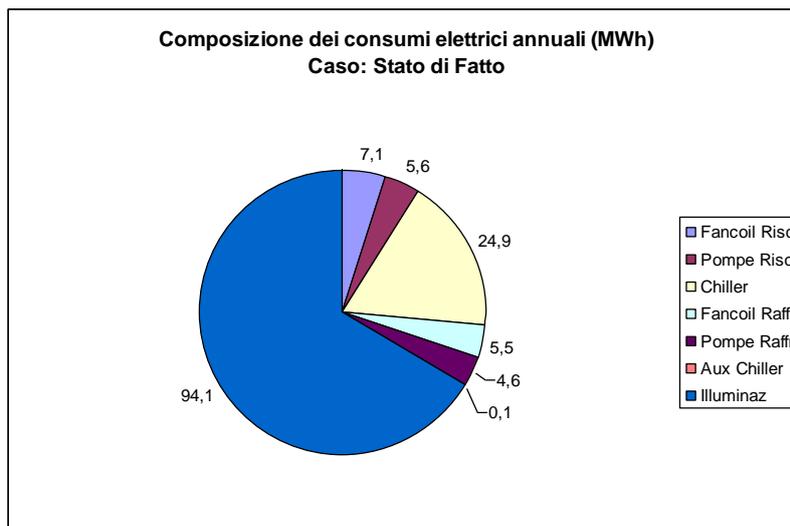


Figura 33. Composizione del consumo annuale di energia elettrica per l'edificio allo Stato di Fatto

Risultati della simulazione degli interventi

**Soli interventi lato involucro (adeguamento a trasmittanza DGR)**

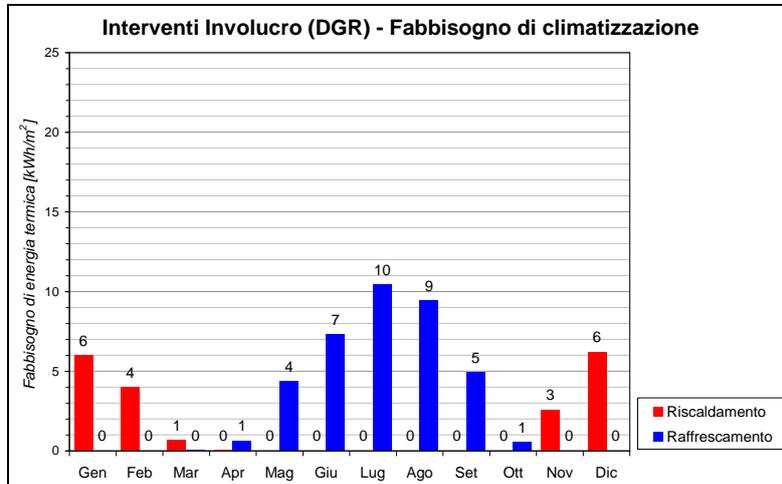


Figura 34. Fabbisogno mensile di energia termica utile per l'edificio con involucro adeguato DGR

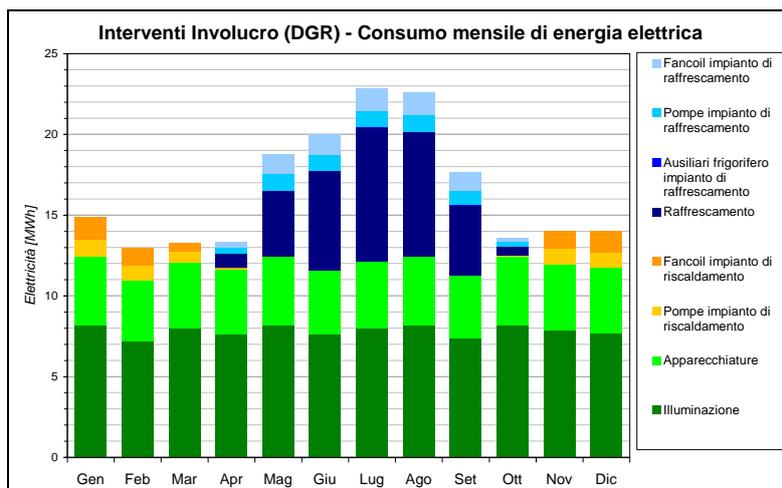


Figura 35. Composizione del consumo mensile di energia elettrica per l'edificio con involucro adeguato DGR

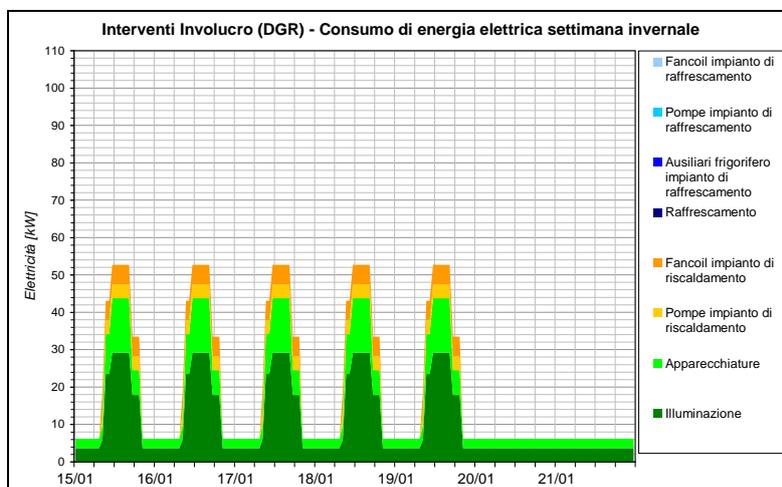


Figura 36. Consumo di energia elettrica per l'edificio con involucro DGR (settimana-tipo invernale)

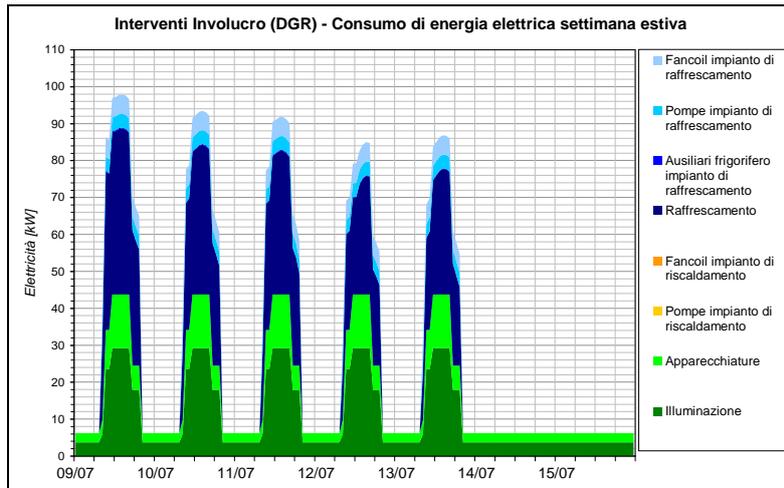


Figura 37. Consumo di energia elettrica per l'edificio con involucro DGR (settimana-tipo estiva)

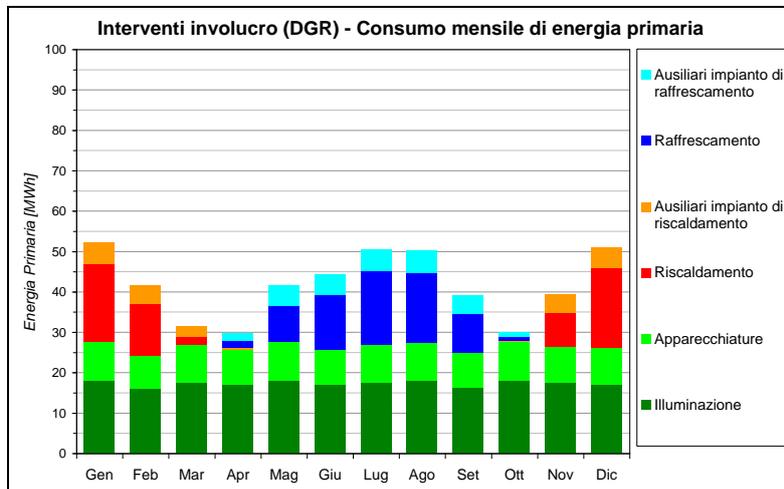


Figura 38. Composizione del consumo mensile di energia primaria per l'edificio con involucro DGR

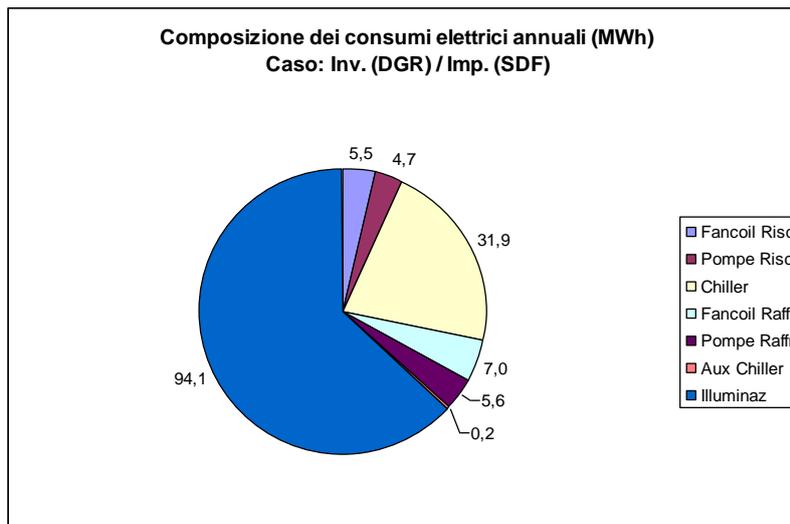
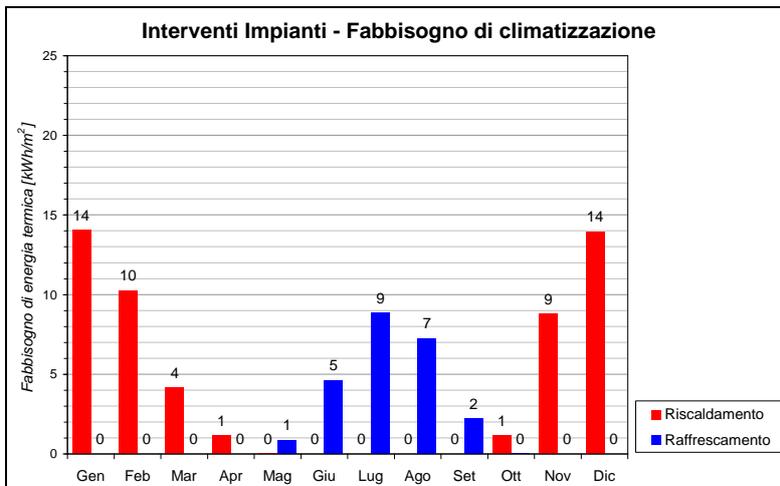
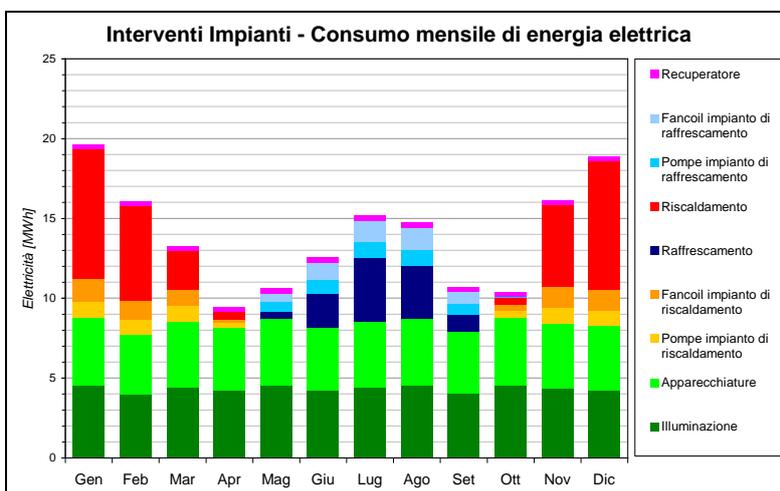


Figura 39. Composizione del consumo annuale di energia elettrica per l'edificio con involucro DGR

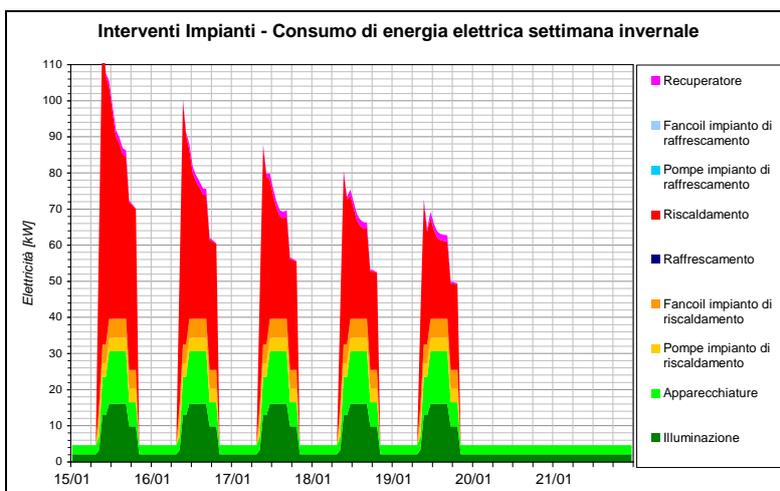
**Soli interventi lato impianto (generazione, ventilazione, illuminazione)**



**Figura 40. Fabbisogno mensile di energia termica utile per l'edificio con involucro SDF e interventi impianti**



**Figura 41. Composiz. del consumo mensile di energia elettrica per l'edificio con involucro SDF e interventi impianti**



**Figura 42. Consumo di en. elettrica per l'edificio con involucro SDF e interventi impianti (settimana-tipo invernale)**

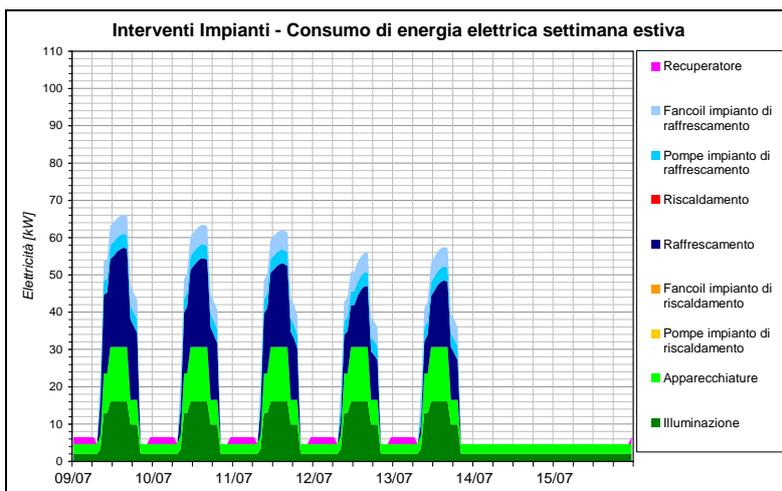


Figura 43. Consumo di en. elettrica per l'edificio con involucro SDF e interventi impianti (settimana-tipo estiva)

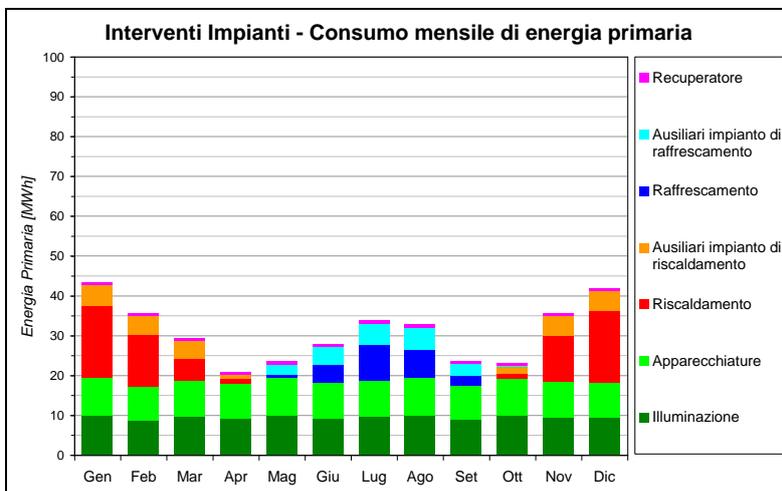


Figura 44. Composiz. del consumo mensile di energia primaria per l'edificio con involucro SDF e interventi impianti

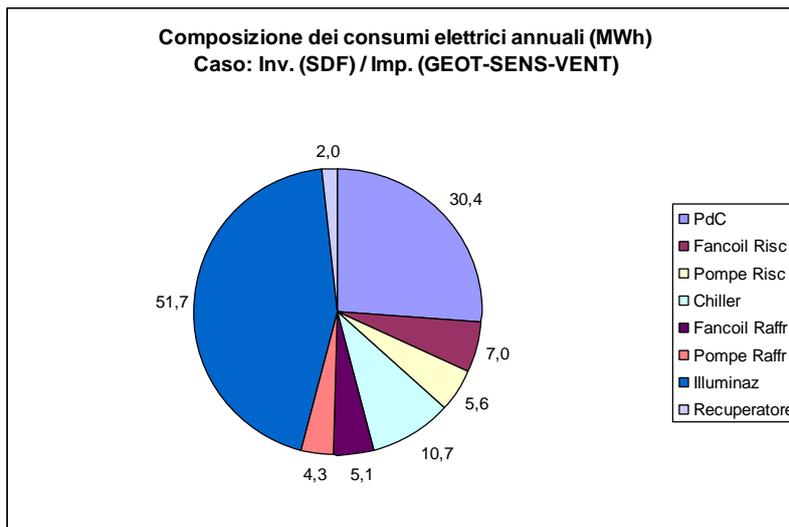
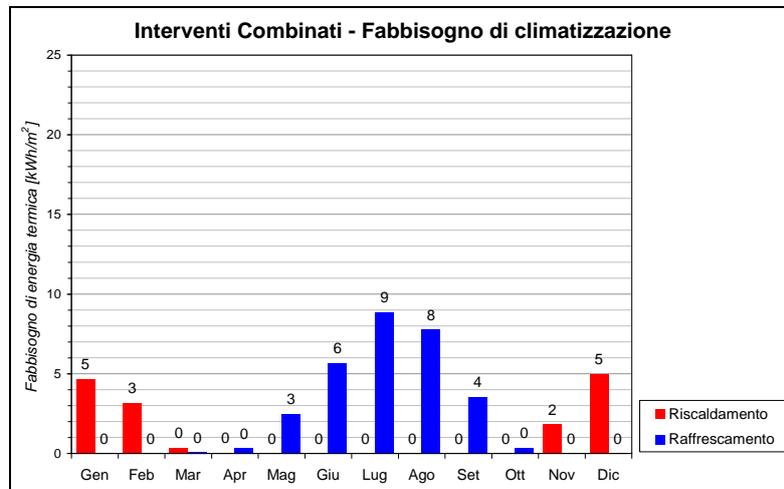
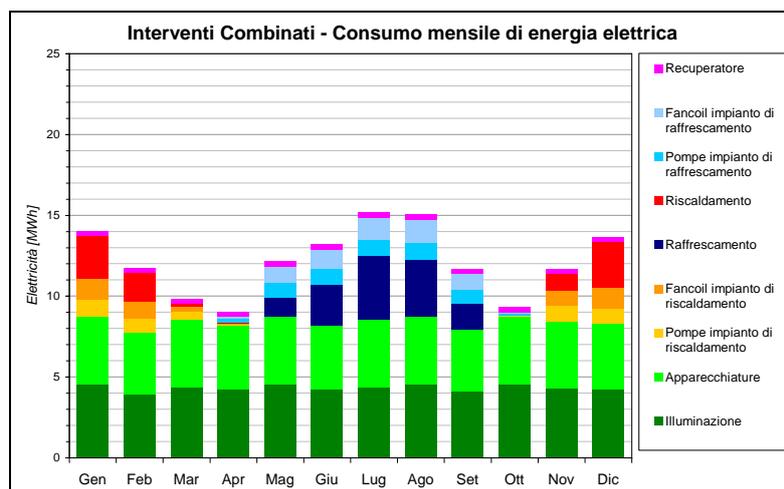


Figura 45. Composiz. del consumo annuale di energia elettrica per l'edificio con involucro SDF e interventi impianti

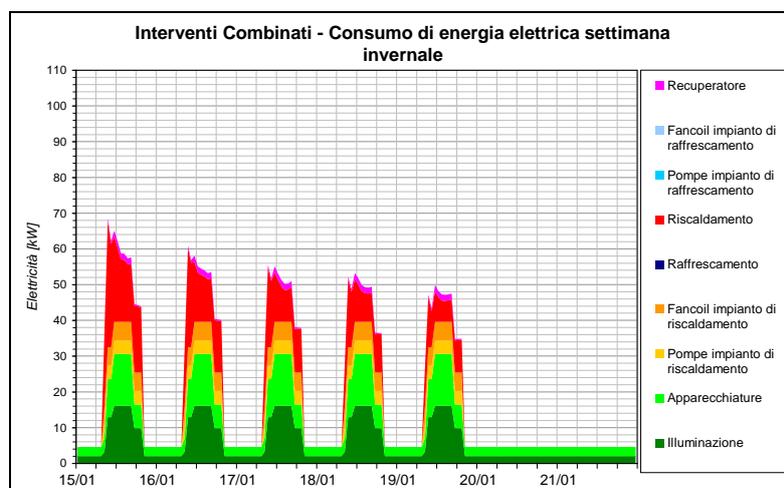
**Interventi combinati lato involucro (adeguamento a trasmittanza DGR) e lato impianti (generazione, ventilazione, illuminazione)**



**Figura 46. Fabbisogno mensile di energia termica utile per l'edificio con involucro DGR e interventi impianti**



**Figura 47. Composiz. del consumo mensile di energia elettrica per l'edificio con involucro DGR e interventi impianti**



**Figura 48. Consumo di en. elettrica per l'edificio con involucro DGR e interventi impianti (settimana-tipo invernale)**

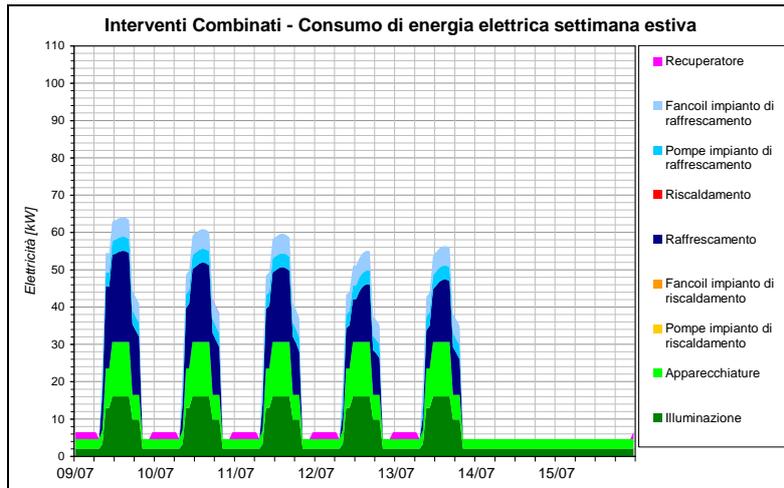


Figura 49. Consumo di en. elettrica per l'edificio con involucro DGR e interventi impianti (settimana-tipo estiva)

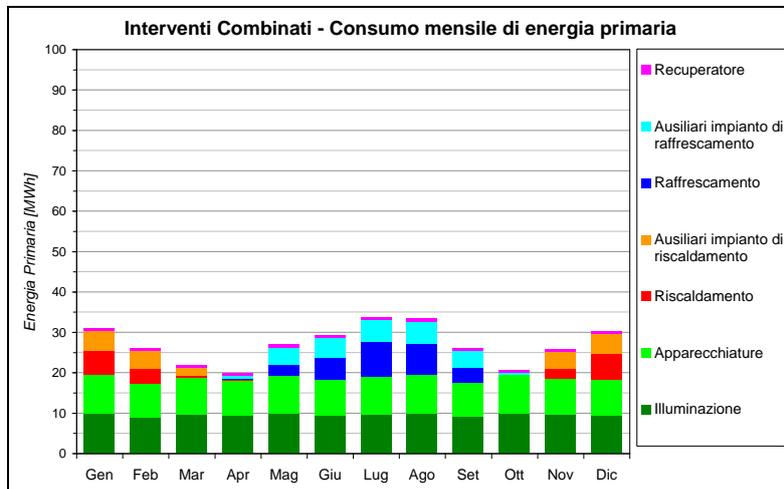


Figura 50. Composiz. del consumo mensile di energia primaria per l'edificio con involucro DGR e interventi impianti

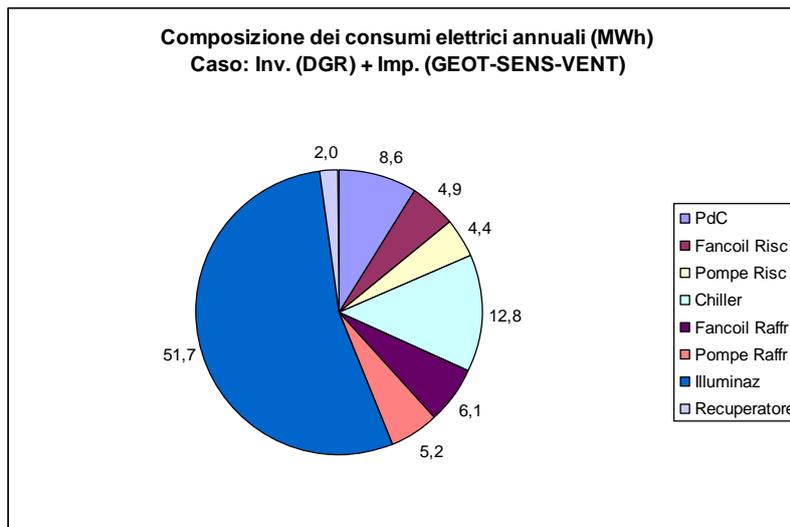


Figura 51. Composiz. del consumo annuale di energia elettrica per l'edificio con involucro DGR e interventi impianti

## Appendice 2

### *Energia incorporata ed emissioni GHG relativi agli interventi sull'involucro (a cura di M. Lavagna e M. Paleari)*

La valutazione ambientale è stata condotta secondo il metodo Life Cycle Assessment. Tale strumento di valutazione, applicato in accordo con le norme ISO 14040 e ISO 14044, si prefigge l'obiettivo di definire quantitativamente e qualitativamente gli impatti generati da materiali e prodotti lungo il loro ciclo di vita. Ai fini dell'analisi in oggetto, lo scenario temporale è stato ristretto alla valutazione delle sole fasi di pre-produzione e produzione (scenario *from cradle to gate*) dei materiali necessari per gli interventi di riqualificazione. Sono stati così esclusi gli impatti legati al trasporto dei beni fino al cantiere a causa dell'impossibilità di prevedere i luoghi d'acquisizione. Sono altresì stati esclusi dal computo gli impatti dipendenti dalla cantierizzazione, a seguito dell'eccessiva incertezza connaturata con questa fase. A tale proposito, è opportuno sottolineare che, secondo quanto riportato a letteratura, le fasi di pre-produzione e produzione generano oltre l'80% degli impatti totali della fase pre-uso.

In considerazione del fatto che la valutazione ambientale accompagna un'indagine tecnica volta all'individuazione di tecnologie e materiali adottabili per gli interventi di riqualificazione, e non già di prodotti specifici a catalogo, i dati ambientali sono stati assunti dalla banca dati Ecoinvent<sup>15</sup> e per la valutazione degli impatti è stato applicato il metodo EPD2008<sup>16</sup>, con i seguenti indicatori: Non-renewable energy sources from fossil fuels (NER) e Global warming (GWP100).

Le condizioni appena descritte portano a considerare gli esiti della valutazione come passibili di variazioni, anche consistenti, nel caso in cui durante la fase di cantierizzazione si optasse per l'impiego di prodotti caratterizzati da un profilo prestazionale molto efficiente, con la conseguente riduzione dei quantitativi necessari per conseguire gli obiettivi di efficientamento prefissati. Allo stesso modo si potrebbe verificare un miglioramento dei risultati esposti nel caso in cui si adottasse un prodotto originato attraverso un ciclo industriale a minore impatto rispetto alla media dei prodotti appartenenti allo stesso comparto materico, ovvero al dato contenuto nella banca dati.

#### Chiusura verticale opaca: isolamento a cappotto

La soluzione adottata per gli elementi d'involucro opaco verticale, costituita dalla realizzazione di un cappotto isolante in lastre di polistirene espanso sinterizzato con densità di  $30 \text{ kg/m}^3$ , è valutata secondo le tre varianti di prestazione energetica che presentano spessori di coibente di 10, 15 o 20 cm. In ogni soluzione permane l'esigenza di realizzare uno strato di rinzaffo in malta cementizia al fine di regolarizzare il supporto murario dopo la demolizione del rivestimento ceramico esistente; la posa delle lastre di EPS viene poi completata con una rasatura a ridotto spessore e il successivo incollaggio di un nuovo rivestimento in piastrelle ceramiche (tali opere di regolarizzazione, rasatura e incollaggio sono necessarie a prescindere dalla realizzazione del cappotto isolante, dunque non sono computate in termini di costi energetico ambientali aggiuntivi).

L'impatto complessivo associabile all'intervento sul subsistema delle chiusure opache verticali varia tra 470 GJ e 940 GJ, in merito al consumo di energia da fonti non rinnovabili, e tra 18 ton di  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  e 37 ton di  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , per l'emissione di gas ad effetto serra.

---

<sup>15</sup> Banca dati elaborata dal Swiss Center for Life Cycle Inventories, un "Competence Centre" del Swiss Federal Institute of Technology di Zurigo (ETH Zurich) e Losanna (EPF Lausanne), del Paul Scherrer Institute (PSI), del Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (Empa), e del Swiss Federal Research Station Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART)

<sup>16</sup> Metodo elaborato dal PRé consultant, sulla base delle linee guida per l'elaborazione di Environmental Product Declarations (dichiarazioni ambientali di prodotto) dello Swedish Environmental Management Council (SEMC), in accordo con la norma ISO 14025

**Tabella 16. Elaborazioni LCA per la realizzazione dell'isolamento a cappotto sulle pareti d'involucro verticale.**

	Spessore dello strato isolante [cm]	Energia incorporata specifica [MJ/m <sup>2</sup> ]	Emissioni incorporate specifiche [kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]	Superficie intervento [m <sup>2</sup> ]	Energia incorporata [GJ]	Emissioni incorporate [ton CO <sub>2</sub> eq]
DGR	10	315.2	12.4	1.487	468.8	18.5
DGR-30%	15	472.9	18.6	1.487	703.1	27.7
DGR-50%	20	630.5	24.9	1.487	937.5	37.0

#### Copertura in lamiera

Per quanto concerne l'intervento sulla copertura in lamiera, è prevista la rimozione del manto di copertura in lastre metalliche per consentire la posa di lastre isolanti in polistirene espanso sinterizzato analogo a quello impiegato nel cappotto e la successiva ricollocazione degli elementi metallici. Per questo motivo nella valutazione ambientale sono stati computati esclusivamente gli impatti dovuti al coibente di nuova installazione, che presenta spessori di 10, 15 o 20 cm a seconda del livello di efficienza energetica che si intende conseguire.

L'impatto di questo subsistema è compreso tra 100 GJ e 195 GJ, per il NER, e 4 tonCO<sub>2</sub>eq e 8 tonCO<sub>2</sub>eq, per il GWP.

**Tabella 17. Elaborazioni LCA per l'isolamento della copertura in lamiera.**

	Spessore dello strato isolante [cm]	Energia incorporata specifica [MJ/m <sup>2</sup> ]	Emissioni incorporate specifiche [kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Energia incorporata [GJ]	Emissioni incorporate [ton CO <sub>2</sub> eq]
DGR	10	315,2	12,4	310	97,7	3,9
DGR-30%	15	472,9	18,6	310	146,6	5,8
DGR-50%	20	630,5	24,9	310	195,4	7,7

#### Chiusura verticale trasparente

Le chiusure verticali trasparenti esistenti sono costituite da serramenti apribili ad anta unica a battente, con telaio in alluminio non a taglio termico e lastre di vetro semplice di 4 mm di spessore. Esse saranno sostituite con serramenti di dimensioni e tipologia analoghe ma con telaio in alluminio a taglio termico e vetrocamera isolante di tre tipologie differenti. La vetrocamera per l'intervento base è costituita da due lastre di vetro prive di trattamenti superficiali e separate da un'intercapedine d'aria; nel caso con trasmittanze inferiori del 30%, una lastra presenta un trattamento basso emissivo e dell'intercapedine è riempita con gas argon; il caso con trasmittanze inferiori del 50% prevede invece una vetrocamera a tripla lastra, di cui due con trattamento basso emissivo, e l'inserimento di gas krypton nelle intercapedini.

Il profilo ambientale di questo intervento è stato calcolato facendo riferimento ad un modulo di serramento standard con superficie di 1 m<sup>2</sup>, cui porzione trasparente equivale all'80% della superficie totale. Il consumo totale di energia da fonti non rinnovabili si colloca così tra 4'800 GJ e 5'100 GJ in relazione al tipo di vetrocamera scelto mentre il potenziale di riscaldamento globale varia tra 317 ton di CO<sub>2</sub>eq e 334 kgCO<sub>2</sub>eq.

**Tabella 18. Elaborazioni LCA per l'installazione delle finestre.**

	Energia incorporata specifica [MJ/m <sup>2</sup> ]	Emissioni incorporate specifiche [kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Energia incorporata [GJ]	Emissioni incorporate [ton CO <sub>2</sub> eq]
DGR	7645,0	506,9	626	4.785,8	317,3
DGR-30%	7664,2	508,0	626	4.797,8	318,0
DGR-50%	8088,5	533,6	626	5.063,4	334,0

Come detto in precedenza, si prevede la sostituzione integrale dei serramenti che dovranno appunto essere smaltiti. Le lastre in vetro sono semplici e prive di trattamenti superficiali quindi possono essere avviate al circuito del riciclo; anche i telai in alluminio sono privi di elementi aggiunti di altri materiali quindi sono senz'altro avviabili ad un processo di riciclo. Dal punto di vista della valutazione ambientale è necessario sottolineare che la banca dati Ecoinvent, utilizzata a riferimento, computa i vantaggi ambientali derivanti dal riciclo dei prodotti in alluminio come credito in ingresso, ovvero gli impatti derivanti dalla produzione di nuovi semilavorati in alluminio trae vantaggio da una percentuale di materiale secondario. Per tale motivo il processo di smaltimento dei telai in alluminio non è computabile come voce indipendente. Al contrario allo smaltimento delle lastre in vetro possono essere associati il consumo di 1.53 GJ e la produzione di 0.06 ton di CO<sub>2eq</sub>.

**Tabella 19. Elaborazioni LCA per la rimozione delle finestre esistenti.**

	<b>Energia incorporata specifica [MJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Emissioni incorporate specifiche [kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Superficie [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Energia incorporata [GJ]</b>	<b>Emissioni incorporate [ton CO<sub>2</sub> eq]</b>
Rimozione finestre	2.45	0.10	626	1.53	0.06

## Appendice 3

### *Curricula scientifici*

**Simone Ferrari** è ricercatore di ruolo di Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento BEST del Politecnico di Milano, dove svolge attività di ricerca sui temi del risparmio energetico, delle fonti di energia rinnovabile e delle tecnologie efficienti per la sostenibilità energetico-ambientale del costruito. E' docente titolare del corso di Building Physics nel corso di laurea in Scienze dell'Architettura ed ha partecipato a diversi progetti di ricerca nazionali ed internazionali producendo numerose pubblicazioni scientifiche. E' membro del gruppo di lavoro ECBCS (Energy Conservation in Buildings & Community Systems) della IEA – International Energy Agency.

**Valentina Zanotto**, laureata in architettura, è dottore di ricerca in Tecnologia e Progetto per l'Ambiente Costruito. Dal 2007 ha collaborato con il Dipartimento BEST del Politecnico di Milano, partecipando all'attività didattica come cultore della materia nei corsi di Fisica Tecnica Ambientale ed Ecosostenibilità nella Progettazione Architettonica. Ha inoltre preso parte a numerosi progetti di ricerca e pubblicazioni scientifiche nell'ambito della fisica tecnica, dell'efficienza energetica e della sostenibilità ambientale, soprattutto a scala di edificio.

**Monica Lavagna**, architetto e dottore di ricerca, è ricercatore di ruolo di Tecnologia dell'architettura presso il Dipartimento BEST del Politecnico di Milano e docente presso la Scuola di Architettura e Società. Si occupa di innovazione ambientale di tecniche e processi edilizi e di valutazione della sostenibilità ambientale e del ciclo di vita (Life Cycle Assessment) di edifici e prodotti edilizi. Partecipa a gruppi normativi nazionali e internazionali sui temi dell'edilizia sostenibile (UNI, ISO, CEN, GPP) ed è coordinatore del gruppo di lavoro "Edilizia" della Rete italiana LCA.

**Michele Paleari**, architetto e dottorando di ricerca in Tecnologia e progetto per l'ambiente costruito, collabora alle attività didattiche presso la Scuola di Architettura e Società e alle attività di ricerca presso il Dipartimento BEST del Politecnico di Milano. Si occupa della valutazione della sostenibilità ambientale e del ciclo di vita (Life Cycle Assessment) sia di materiali e prodotti per il settore delle costruzioni, sia in relazione a edifici ad alta efficienza energetica (Zero Energy Buildings).