



Ricerca di Sistema elettrico

Riqualificazione energetica degli edifici
pubblici esistenti: direzione nZEB –
Studio dell'edificio di riferimento uso uffici
della PA nella zona climatica Centro Italia
(zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$)

D. Testi, E. Schito, P. Conti, E. Menchetti, S. Comelato, W. Grassi,
P. Signoretti, L. Terrinoni

RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI PUBBLICI ESISTENTI: DIREZIONE NZEB – STUDIO DELL'EDIFICIO DI RIFERIMENTO USO UFFICI DELLA PA NELLA ZONA CLIMATICA CENTRO ITALIA (ZONA D: $1.400 < GG \leq 2.100$)

D. Testi, E. Schito, P. Conti, E. Menchetti, S. Comelato, W. Grassi – DESTEC, Università di Pisa
P. Signoretti, L. Terrinoni – ENEA

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.2 – Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Studio dell'edificio di riferimento uso uffici della PA nella zona climatica Centro Italia (zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$)

Responsabile del Progetto: Ing. Luciano Terrinoni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB – Studio dell'edificio di riferimento uso uffici della PA nella zona climatica Centro Italia (zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$)"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Paolo Signoretti

Responsabile scientifico Università di Pisa: Prof. Ing. Daniele Testi

Indice

SOMMARIO	5
1 INTRODUZIONE	6
1.1 PREMESSA	6
1.2 OBIETTIVI DEL LAVORO	6
1.3 RIFERIMENTI NORMATIVI E LINEE GUIDA.....	7
1.4 APPROCCIO BOTTOM-UP.....	12
2 ATTIVITÀ PRELIMINARI.....	14
2.1 CONTESTUALIZZAZIONE TIPOLOGICA E NORMATIVA DEGLI EDIFICI AD USO UFFICIO	14
2.2 INDIVIDUAZIONE DEL CASO DI STUDIO	18
3 ANALISI DELLO STATO DI FATTO	21
3.1 CARATTERIZZAZIONE DEL CASO DI STUDIO.....	21
3.2 SIMULAZIONE DELLO STATO DI FATTO	33
3.2.1 <i>Simulazione secondo UNI/TS 11300 (software commerciale)</i>	33
3.2.2 <i>Diagnosi energetica (software SEAS)</i>	39
3.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DELLO STATO DI FATTO.....	56
3.3.1 <i>Risultati ottenuti secondo UNI/TS 11300 (software commerciale)</i>	56
3.3.2 <i>Risultati ottenuti con SEAS</i>	64
3.3.3 <i>Confronto dei risultati di involucro con TRNSYS</i>	65
3.3.4 <i>Simulazione energetica estiva con TRNSYS</i>	69
3.3.5 <i>Risultati relativi all'anno climatico tipo (CASO BASE)</i>	71
4 ANALISI DEGLI INTERVENTI DI RETROFIT	79
4.1 DEFINIZIONE DEGLI INTERVENTI DI RETROFIT	79
4.2 INTERVENTI FINALIZZATI ALL'NZEB: DESCRIZIONE E RISULTATI	79
4.2.1 <i>Intervento NZEB_0. Installazione del nuovo sottosistema di generazione.</i>	80

4.2.2	<i>Risultati dell'intervento NZEB_0</i>	82
4.2.3	<i>Intervento NZEB_1. Coibentazione delle strutture opache e posizionamento di una barriera al vapore.</i> ..	83
4.2.4	<i>Risultati dell'intervento NZEB_1</i>	84
4.2.5	<i>Intervento NZEB_2. Ulteriore coibentazione delle strutture opache, posizionamento di una barriera al vapore, modifica di alcune finestre tramite l'installazione di un ulteriore infisso interno (controfinestra).</i>	85
4.2.6	<i>Risultati dell'intervento NZEB_2</i>	87
4.2.7	<i>Intervento NZEB_3. Intervento NZEB_2 e installazione di tendaggi alla veneziana di colore bianco interni per la riduzione degli apporti solari.</i>	89
4.2.8	<i>Risultati dell'intervento NZEB_3</i>	90
4.2.9	<i>Intervento NZEB_4. Tutti gli interventi NZEB_3 ed ottimizzazione del dimensionamento e della temperatura di switch invernale della pompa di calore e della superficie dell'sistema fotovoltaico.</i>	91
4.2.10	<i>Risultati dell'intervento NZEB_4</i>	92
4.2.11	<i>Descrizione e risultati dell'intervento NZEB_4_175</i>	99
4.2.12	<i>Fattibilità del posizionamento di un sistema fotovoltaico sulla falda ad est di Palazzo A10</i>	104
4.3	SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI CON I DIVERSI INTERVENTI NZEB.....	106
4.4	INTERVENTI CONSEGUENTI ALLA DIAGNOSI ENERGETICA TRAMITE SEAS: DESCRIZIONE.....	110
4.4.1	<i>Analisi di sensitività energetica</i>	120
4.5	SIMULAZIONE DEGLI INTERVENTI DI RETROFIT SU SEAS	120
4.5.1	<i>Simulazione degli interventi di retrofit su SEAS</i>	120
4.5.2	<i>Risultati dell'analisi di sensitività energetica</i>	125
4.6	ANALISI DEI COSTI DEGLI INTERVENTI DI RETROFIT.....	139
4.7	ANALISI ECONOMICA E DI SENSITIVITÀ.....	144
4.7.1	<i>Analisi economica e di sensitività sugli interventi finalizzati all'NZEB</i>	145
4.7.2	<i>Analisi economica e di sensitività sugli interventi di diagnosi energetica</i>	147
5	CONCLUSIONI.....	150
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	153
	BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEI MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO	156

Sommario

La presente ricerca si colloca all'interno del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale, sul tema degli edifici ad energia quasi zero (nZEB). In analogia alla precedente ricerca, si vuole valutare la possibilità di riqualificare in nZEB un edificio ad uso uffici di riferimento per la Provincia di Pisa, che sia rappresentativo della zona climatica D, tipica del Centro Italia.

Il lavoro è stato suddiviso nelle seguenti fasi:

1. individuazione di un caso studio rappresentativo del parco edilizio ad uso uffici della Provincia di Pisa, in collaborazione con gli uffici della Direzione Edilizia dell'Università di Pisa: si è scelto il Palazzo A10, sito in Pisa;
2. raccolta di dati e informazioni sul palazzo analizzato: in particolare si sono acquisiti sia i dati che caratterizzano l'involucro e gli impianti presenti, sia ulteriori informazioni necessarie per eseguire correttamente la diagnosi (fatturazioni energetiche divise per vettori, profili di presenza degli utenti nell'edificio, profili di apertura delle finestre);
3. implementazione dei dati in un software certificato CTI, aggiornato con le ultime versioni delle norme UNI TS 11300, verificando le richieste energetiche attuali dell'edificio in condizione standard (A2);
4. implementazione dei dati in SEAS, software per le diagnosi energetiche degli edifici nato nel corso di precedenti collaborazioni di ricerca tra ENEA e DESTEC, Università di Pisa: con questo software si sono confrontate le richieste di energia stimate dal software con gli effettivi consumi ricavabili dalle fatturazioni energetiche; i consumi elettrici dovuti all'utilizzo estivo del gruppo frigorifero presente sono stati stimati mediante simulazione dinamica in TRNSYS;
5. individuazione di possibili interventi di riqualificazione energetica per la riduzione delle richieste energetiche, con l'obiettivo di arrivare alla categoria nZEB secondo il vigente quadro legislativo e normativo.

L'analisi dei risultati trovati evidenzia le criticità tecnico-economiche relative al raggiungimento della categoria nZEB in caso di edifici esistenti, in particolare quelli importanti dal punto di vista storico-culturale e quindi vincolati dalla Soprintendenza.

1 Introduzione

1.1 Premessa

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale, approvato con il Decreto Ministeriale del 21 aprile 2016.

La presente relazione tecnica si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2016, per quanto attiene all'Area D "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", tema di ricerca "D.2 Edifici a energia quasi zero (nZEB)", progetto D.2.1 "Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)", obiettivo "Studio dell'edificio di riferimento uso uffici della PA nella zona climatica Centro Italia (zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$)". Il tema sviluppato nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa riguarda la riqualificazione energetica di edifici uso uffici della Pubblica Amministrazione, in applicazione del D.I. 26 giugno 2015 sulle nuove prescrizioni ed i requisiti minimi.

1.2 Obiettivi del lavoro

Si prevede l'individuazione di un caso-studio rappresentativo delle tipologie di edifici ad uso uffici della PA in zona climatica Centro Italia (zona D: $1400 < GG \leq 2100$) e la definizione d'interventi di retrofit inquadabili in una ristrutturazione importante di 1° livello, tendenti a trasformare l'edificio esistente in edificio a energia quasi zero, secondo le definizioni del D.I. 26 giugno 2015 sui "Requisiti minimi".

Le ipotesi di intervento riguarderanno sia l'involucro edilizio, sia gli impianti tecnici (in particolare climatizzazione invernale, climatizzazione estiva, illuminazione), sia la generazione efficiente di energia termica ed elettrica. Saranno proposte soluzioni tecnologiche avanzate, ma allo stesso tempo coerenti con i principi di fattibilità tecnico-economica, compatibilità con i vincoli architettonici e paesaggistici e replicabilità su larga scala. Le soluzioni proposte saranno orientate all'efficienza energetica, alla gestione intelligente dell'energia e allo sfruttamento delle energie rinnovabili.

L'analisi energetica sarà basata sui vari indicatori, anche disaggregati per servizio e per vettore energetico. L'analisi economica comprenderà il calcolo di vari indicatori: tempo di ritorno, costo totale, VAN, indice di profitto.

Tutta l'attività è svolta in stretta sinergia con le altre unità di ricerca coinvolte nell'attività a. "Riquilificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB"; esse completano l'analisi di edifici di riferimento ad uso uffici della PA sul territorio nazionale, rispettivamente in zona climatica Nord Italia (zona E: $2100 < GG \leq 3000$) ed in zona climatica Sud Italia (zona B: $600 < GG \leq 900$).

Sarà previsto l'utilizzo, per lo svolgimento della diagnosi energetica, del software SEAS 3.0 (acronimo di Software Energetico per Audit Semplificati), nato nel precedente PAR da una collaborazione tra ENEA e DESTEC dell'Università di Pisa.

1.3 Riferimenti normativi e linee guida

L'assetto normativo e legislativo non ha subito, nell'ultimo anno, sostanziali variazioni rispetto al contesto degli anni precedenti. Il quadro normativo italiano odierno sul tema del risparmio energetico in edilizia fa riferimento all'insieme di direttive europee che sono entrate in vigore negli ultimi anni:

- Direttiva Europea 2002/91/CE nota anche come EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), che introduce un sistema di certificazione energetica e propone una metodologia per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici e dei requisiti minimi energetici per i nuovi edifici e quelli sottoposti a ristrutturazioni di primo livello [1];
- Direttiva Europea 2010/31/UE nota anche come EPBD Recast, che promuove la riquilificazione energetica degli edifici e la costruzione di nuovi edifici con il target nZEB (nearly Zero Energy Building, edificio ad energia quasi zero), tramite anche lo sfruttamento di risorse energetiche rinnovabili [2];
- Direttiva Europea 2012/27/EU sull'efficienza energetica, che impone la riquilificazione energetica del 3% della superficie calpestabile degli edifici delle Pubbliche Amministrazioni per raggiungere migliori prestazioni energetiche [3].

In Italia, queste Direttive sono state recepite dai seguenti decreti:

- Decreto Legislativo n. 192/2005, che recepisce la Direttiva EPBD, definendo i criteri generali e la metodologia di calcolo per la prestazione energetica degli edifici, e stabilisce i valori

limite degli indici di prestazione energetica per gli edifici, a seconda della loro destinazione d'uso, zona climatica e rapporto di forma S/V [4];

- Decreto Legge 4 giugno 2013 n. 63 diventato Legge 90/2013 [5];
- Decreto Interministeriale 26 giugno 2015, noto come "Requisiti minimi", nel quale viene modificata la metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici e vengono specificati nuovi coefficienti di riferimento e valori limite da rispettare nel caso di nuove costruzioni e ristrutturazioni di primo livello [6].

Un peso sempre maggiore viene dato agli edifici ad energia quasi zero, nZEB, che è definito come un "edificio ad altissima prestazione energetica [...]; la bassa quota di energia richiesta dovrebbe essere coperta in maniera significativa da energia da fonti rinnovabili, prodotta anche nelle vicinanze dell'edificio stesso" [2].

A partire dal 1 gennaio 2019, gli edifici di nuova costruzione di proprietà di pubblica amministrazione devono essere ad energia quasi zero; questo obbligo è esteso a tutti gli edifici di nuova costruzione (sia pubblici che privati) a partire dal 1 gennaio 2021.

PANZEB

Un'interessante sintesi dello scenario italiano in merito agli edifici ad elevate prestazioni energetiche è riportato nel documento "PANZEB – Piano d'Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero", redatto da un gruppo di lavoro composto da ENEA, RSE, CTI e Ministero dello Sviluppo Economico [7] nel novembre 2015. In questo documento, vengono riportati sia i requisiti tecnici per poter considerare un edificio come NZEB, sia uno studio di fattibilità e di ipotetici risparmi legati alla nuova costruzione di NZEB o alla riqualificazione di edifici esistenti per arrivare alla qualifica di NZEB.

Per poter essere definito NZEB, un edificio reale deve essere caratterizzato da indici di efficienza energetica minori rispetto ai corrispondenti indici calcolati sull'edificio di riferimento¹, in termini di:

- Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente (H'_T);
- Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile;

¹ Si definisce edificio di riferimento l'edificio virtuale geometricamente equivalente a quello di progetto ma dotato di parametri energetici e delle caratteristiche termiche minime vigenti.

- Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (EP_H);
- Indice di prestazione termica utile per la climatizzazione estiva, compreso il controllo dell'umidità (EP_C);
- Indice di prestazione energetica globale, espresso in energia primaria (EP_{gl}), sia totale che non rinnovabile;
- rendimenti dell'impianto di climatizzazione invernale (η_H), di climatizzazione estiva (η_C) e produzione di acqua calda sanitaria (η_W).

Devono inoltre essere rispettati gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili. Si faccia riferimento all'Appendice A del D.I. Requisiti Minimi per i valori limite previsti per i vari indici di riferimento [6].

Nel documento è riportata anche una prima valutazione dei costi aggiuntivi e dei potenziali risparmi energetici associati alla costruzione di nuovi edifici NZEB o alla riqualificazione di edifici esistenti in NZEB, per due categorie di edifici: residenziali e non residenziali. Qua ci si soffermerà sulla seconda categoria di edifici, cui è incentrato anche il presente report.

Nella parte introduttiva del documento, si riassume il parco edilizio ad uso non residenziale, con i relativi consumi energetico a questo associato. In Tabella 1 si riporta una sintesi della caratterizzazione energetica dei vari edifici analizzati.

Tabella 1: Caratterizzazione energetica degli edifici analizzati nel rapporto PANZEB.

Destinazione d'uso	Numero di edifici	Estensione	Consumo specifico elettrico	Consumo specifico termico
Scuole	51000	73.2 milioni m ²	50 kWh/m ² anno	130 kWh/m ² anno
Uffici	65000	56.7 milioni m ²	95 kWh/m ² anno	170 kWh/m ² anno
Alberghi (inclusi B&B ed agriturismo)	105000	45.2 milioni m ²	110 kWh/m ² anno	150 kWh/m ² anno

Dall'analisi si evince come gli uffici siano tra gli edifici con maggiore richieste energetiche, sia termiche che elettriche, secondi solo agli ospedali ed alle case di cura. Sembra quindi importante prevedere un piano d'azione che serva a ridurre i consumi elettrici e termici associati a questa categoria di edifici.

La Ricerca di Sistema di questo anno, quindi, si sposa perfettamente con il quadro previsto dal documento, riguardando proprio la categoria di edifici che risultano essere tra i più energivori.

Edifici non residenziali di nuova costruzione

Il report stima in circa 2.8 milioni di m² la superficie di nuovi edifici costruiti con destinazione d'uso non residenziale (uffici, scuole, ospedali...).

La stima è stata valutata sulla base degli ultimi censimenti ISTAT e delle analisi di settore svolte da CRESME e ANCE. I nuovi edifici non residenziali sono in rapporto 1.5:1 edifici ad uso pubblico.

Ipotizzando che l'1% degli edifici pubblici e l'1% degli edifici privati (in superficie) sia realizzato come NZEB, ciò porterebbe ad una riduzione dei consumi energetici, al 2020, di circa 900 TEP per gli edifici pubblici e circa 930 TEP per gli edifici privati.

In Tabella 2 è riportata la stima dei risparmi nella sola categoria uffici di nuova costruzione NZEB.

Tabella 2: Stima dei risparmi energetici ottenibili con la costruzione di edifici ad uso ufficio di tipo NZEB, secondo il rapporto PANZEB.

Uffici	Zona Climatica	Risparmio specifico per requisiti NZEB	Stima risparmi al 2020 per edifici pubblici	Stima risparmi al 2020 per edifici privati	Stima risparmi totali al 2020
		kWh/m ² anno	TEP	TEP	TEP
	A-B-C	9	20	88	108
	D	19	61	265	325
	E-F	31	111	487	598
TOTALE			192	839	1031

Edifici non residenziali oggetto di riqualificazione

Molto più considerevoli risultano i risparmi che si potrebbero conseguire dalla riqualificazione ad NZEB degli edifici esistenti. Ogni anno, infatti, le riqualificazioni energetiche di edifici ad uso non residenziale coinvolgono circa 12.5 milioni di m², sia nel settore pubblico che privato. In particolare, 4 milioni di m² ristrutturati hanno come destinazione d'uso quella di uffici, pubblici e privati. Anche in questo caso è stato ipotizzato che l'1% in superficie di questi edifici venisse ristrutturato di modo da portare a NZEB l'edificio. I

risultati di questa analisi evidenziano come i risparmi conseguibili sarebbero più di 5000 TEP al 2020. In Tabella 3 è riportata la stima dei risparmi relativi alla sola categoria uffici ristrutturati NZEB.

Tabella 3: Stima dei risparmi energetici ottenibili con la riqualificazione NZEB di edifici esistenti ad uso uffici, secondo il rapporto PANZEB.

Uffici	Zona Climatica	Risparmio specifico per requisiti NZEB	Stima risparmi al 2020 per edifici pubblici	Stima risparmi al 2020 per edifici privati	Stima risparmi totali al 2020
		kWh/m ² anno	TEP	TEP	TEP
	A-B-C	12	41	185	226
	D	28	125	557	682
	E-F	45	229	1023	1252
TOTALE			395	1764	2160

La riqualificazione di edifici esistenti come NZEB apre sicuramente degli scenari interessanti, andando ad interessare superfici maggiori di quelle che invece vengono costruite dall'inizio. Tuttavia, riqualificazioni di questo tipo sollevano anche dei problemi sia di natura tecnica che economica.

Si consideri, innanzitutto, la difficoltà tecnica di eseguire tali riqualificazioni, in edifici che devono essere chiusi agli utenti per un periodo di tempo rilevante necessario agli interventi che riguardano sia l'involucro sia l'impianto. Per quanto riguarda l'isolamento, la necessità di spessori considerevoli di isolante è spesso in contrasto o con i vincoli urbanistici o con le volumetrie interne: per raggiungere i requisiti sulla trasmittanza delle pareti, infatti, dovrebbe essere necessario un ampliamento del volume dell'edificio, con conseguente riduzione della distanza tra questo e altri edifici², oppure una riduzione del volume interno netto, andando a posizionare l'isolante sull'interno. Una soluzione possibile potrebbe essere quella di utilizzare le intercapedini d'aria tra uno strato di mattoni o di pietra e l'altro: questa soluzione può però essere solo applicata nel caso di muratura con intercapedine, e d'altro canto il riempimento di questa intercapedine

² Si può andare in deroga alle distanze minime solo nel caso in cui l'intervento di riqualificazione permetta di ridurre la trasmittanza almeno del 10% e comunque non oltre lo spessore massimo di 25 centimetri per le pareti verticali esterne (D.Lgs. 102/2014).

con materiale isolante potrebbe non essere sufficiente per rispettare i requisiti degli NZEB. Per quanto riguarda invece i sistemi di riscaldamento e raffrescamento, gran parte degli edifici ad uso ufficio presenta la caratteristica positiva di avere già predisposto un sistema per il raffrescamento: in tal modo si riducono le spese che sarebbero necessarie all'installazione del sistema.

Un altro problema della trasformazione in NZEB di edifici esistenti è relativo al sovracosto medio da imputare rispetto ad una riqualificazione "tradizionale" che si limita all'osservanza dei limiti di legge. A seconda della fascia climatica, infatti, si prevede un costo di trasformazione che può arrivare anche ai 500 – 600 €/m², circa il 15% in più rispetto al costo per la riqualificazione energetica standard.

Infine, il documento sottolinea l'importanza di valutare l'utilizzo di pompa di calore e pannelli fotovoltaici per soddisfare il requisito riguardante l'energia rinnovabile. Per tale motivo, una delle soluzioni previste per il caso studio oggetto della presente ricerca sarà appunto quella di installare una pompa di calore combinata (per la produzione di energia termica per riscaldamento, raffrescamento ed eventualmente acqua calda sanitaria) e sistema fotovoltaico. Questa soluzione servirà a valutare l'effettiva efficacia di questo sistema su un caso reale per la sua trasformazione in NZEB ed anche ad evidenziare eventuali difficoltà o problematiche che possono essere collegate al suo utilizzo.

1.4 Approccio bottom-up

L'approccio seguito per analizzare la fattibilità di riqualificazione energetica degli edifici ad uso uffici della PA esistenti, con l'obiettivo di raggiungere la definizione di NZEB, è stato di tipo "bottom-up". In altre parole, nell'impossibilità di analizzare energeticamente una quota statisticamente significativa del parco edilizio con destinazione d'uso "uffici della PA", una via alternativa consiste nell'identificazione di tipologie costruttive particolarmente diffuse sul territorio analizzato e nell'analisi dettagliata di singoli fabbricati appartenenti a queste classi. Tali edifici-tipo rappresentano dei benchmark per una successiva estensione dei risultati ottenuti e delle conclusioni tratte.

Nel prossimo capitolo si illustrerà il caso studio analizzato in questa attività e si motiverà la sua scelta come significativo rappresentante degli edifici ad uso uffici della PA in zona climatica Centro Italia (zona D: $1400 < GG \leq 2100$).

Per questo edificio di riferimento sarà eseguita una diagnosi energetica ex ante, analizzando il comportamento energetico del sistema costituito dall'insieme del fabbricato e da tutti gli impianti e

dispositivi tecnologici che si trovano al suo interno. La diagnosi prevedrà la costruzione di modelli energetici i cui risultati dovranno convergere con le prestazioni derivanti dai dati di consumo effettivo. L'analisi dello stato di fatto consentirà di costruire il bilancio in usi finali di energia, individuare eventuali cause di sprechi e proporre le azioni e le tecnologie più appropriate per la riqualificazione dell'edificio in senso NZEB, intervenendo sull'involucro, sugli impianti di climatizzazione, su gestione e controllo e sugli impianti alimentati da fonti rinnovabili. Sarà valutata non solo la fattibilità tecnica delle misure di retrofit energetico, ma anche e soprattutto quella economica.

2 Attività preliminari

2.1 Contestualizzazione tipologica e normativa degli edifici ad uso ufficio

Il parco edilizio nazionale ad uso ufficio è oggetto di ricerca, dal punto di vista energetico, già da molti anni. La motivazione va ricercata principalmente nel fatto che il settore terziario è responsabile di una significativa percentuale delle richieste energetiche razionali; tuttavia, a causa della varietà di usi ed esigenze, non è possibile determinare dei pattern unici di usi energetici.

A tal proposito, il progetto TOBUS si è occupato di caratterizzare il patrimonio europeo degli edifici destinati ad uso ufficio [8]. La ricerca, che ha coinvolto otto istituzioni europee, ha individuato un patrimonio per un totale di 1200 milioni di metri quadri di superficie calpestabile. Tuttavia, la maggior parte del patrimonio (circa il 70%) è stata costruita meno di 2 anni fa. Dalla ricerca emerge anche che i consumi imputabili a questa categoria di edifici siano molto elevati, con punte addirittura di 1000 kWh/m².

Una prima analisi del parco edilizio italiano ad uso uffici è stata fatta nel 2009 [9]: CRESME ha identificato un patrimonio di circa 14 000 edifici pubblici ad uso "totalmente ad uffici", con una superficie coperta di più di 23 milioni di m². Tale patrimonio si riferisce solamente agli edifici totalmente occupati da enti riconducibili alle pubbliche amministrazioni, escludendo edifici in cui si trovino anche spazi destinati a residenziale o ad usi ufficio da parte di altri enti (non pubblica amministrazione). In particolare, la ripartizione tra edifici ed enti è riportata sinteticamente in Tabella 4.

Nello sviluppo della ricerca, gli autori hanno ipotizzato di intervenire sul 35% del parco edilizio ad uso uffici, con una serie di interventi volti ad aumentare l'efficienza energetica per i vari servizi (riscaldamento, acqua calda sanitaria, illuminazione, condizionamento). Tra gli interventi proposti, si trovano un maggiore isolamento termico delle superfici opache, la sostituzione degli infissi, l'utilizzo di pannelli solari per la produzione di acqua calda sanitaria, la sostituzione o miglioramento degli impianti di riscaldamento e condizionamento, l'utilizzo di sensori per la regolazione dell'impianto di illuminazione insieme alla sostituzione di lampade con altre a maggiore efficienza. I risultati dell'analisi evidenziano come gli interventi portino ad una riduzione del 18% di energia termica e del 23% di energia elettrica: i tempi di ritorno, comunque, si riducono notevolmente se si suppone che gli interventi di riqualificazione energetica siano effettuati su edifici che necessitano di pesanti ristrutturazioni per obsolescenza (per un fattore di scala, i costi necessari per la riqualificazione energetica si riducono in presenza di importanti interventi per la sicurezza e stabilità).

Tabella 4: Analisi del parco edilizio italiano ad uso uffici, di proprietà esclusiva della PA.

Ente	Edifici	Superficie [10^3 m^2]
Amministrazione pubblica	9550	16811
Istruzione	2025	2595
Sanità	508	2286
Ricerca e sviluppo	247	492
Energia elettrica, acqua, gas	129	100
Immobiliari e Costruzioni	128	190
Altre	993	956
Totale	13580	23429

Un altro utile riferimento per l'analisi degli edifici ad uso ufficio relativo alle pubbliche amministrazioni è il database messo a disposizione dallo Stato Italiano www.dati.consip.it/dataset/dataset-amministrazioni. Il sito è in realtà destinato agli acquisti in rete della pubblica amministrazione, ma ci si può trovare il dataset di tutte le pubbliche amministrazioni che hanno almeno un punto ordinante. Al 2016, il numero di edifici ad uso ufficio delle pubbliche amministrazioni era 18485.

Altre ricerche in letterature si sono focalizzate sull'individuazione di edifici di riferimento, tipologie costruttive tipiche, impianti installati più comuni.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dell'involucro, la ricerca "Caratterizzazione del parco edilizio nazionale - Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio" [10] si è basata sull'individuazione di edifici tipo, sulla base della connotazione geografica (Nord, Centro, Sud) e sulle epoche di costruzione, che influenzano la scelta dei materiali per le strutture opache, il rapporto tra superficie opaca e finestrata e le tipologie di impianti installati. Il Report di ricerca identifica due macro categorie di uffici:

- la prima categoria riguarda gli edifici costruiti fino alla metà del secolo scorso, caratterizzati da scarso isolamento termico e coefficienti globali di scambio piuttosto alti;

- la seconda categoria riguarda invece gli edifici costruiti in epoca più recente (a partire dagli anni Settanta in poi), che si caratterizzano per un'attenzione maggiore all'efficienza energetica e quindi differiscono in maniera sostanziale dalla precedente categoria sia dal punto di vista termo-energetico che architettonico.

Le differenze maggiori relative alla seconda categoria di uffici, rispetto alla prima, a livello di involucro, riguardano:

- la presenza di una maggiore superficie vetrata per sfruttare meglio l'illuminazione naturale (anche se questo, di fatto, è responsabile di elevati apporti solari in estate, rendendo necessaria la climatizzazione dei locali);
- l'utilizzo di materiali isolanti nell'involucro e di tecniche costruttive diverse rispetto al tradizionale uso di muratura in laterizio o cemento armato (si pensi, ad esempio, all'uso del vetro strutturale);
- la suddivisione della zona in piccoli ambienti (piccoli uffici singoli) o in grandi open space, diversamente dal caso degli edifici costruiti meno recentemente, che invece sono caratterizzati da solo uffici singoli di volumi più ampi.

Nella Figura 1 e nella Figura 2 si riportano delle piante esemplificative delle due tipologie di uffici identificate dal report. Si noti, in Figura 2, la dimensione minore delle stanze e la maggiore superficie vetrata.

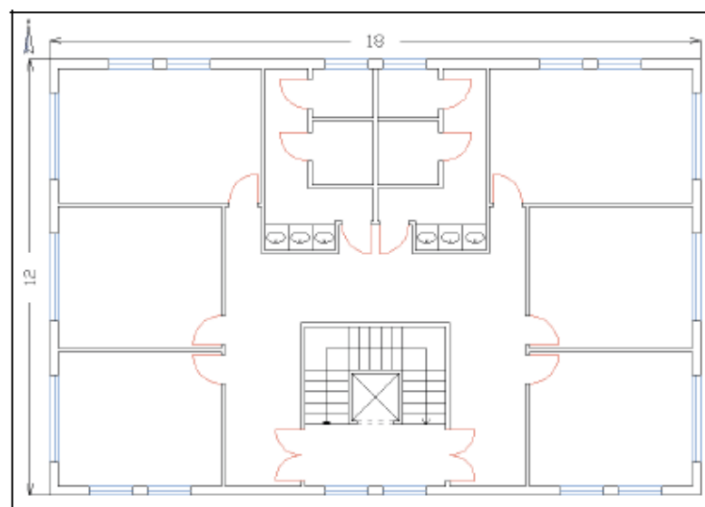


Figura 1: Planimetria esemplificativa della prima categoria di uffici, secondo il report “Caratterizzazione del parco edilizio nazionale - Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio” [10].

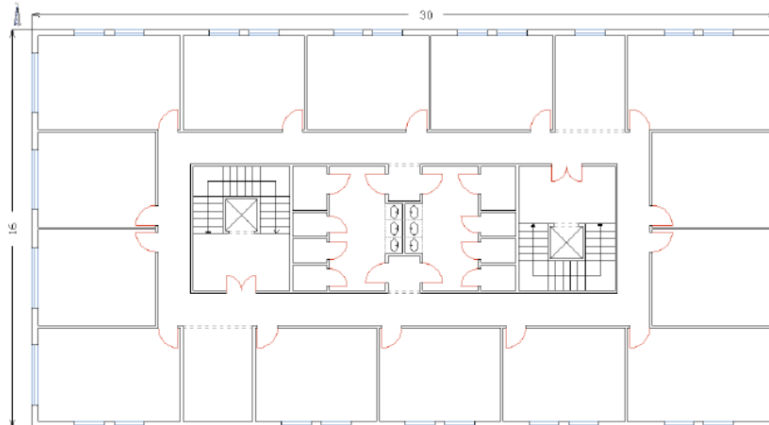


Figura 2: Planimetria esemplificativa della seconda categoria di uffici, secondo il report " Caratterizzazione del parco edilizio nazionale - Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio" [10].

Per quanto riguarda il Centro Italia, il report mostra come il 25% degli edifici ad uso uffici siano rappresentati da edifici costruiti nei secoli precedenti al 1900. Dal confronto con le altre zone climatiche (Nord e Sud Italia), si evince come l'utilizzo di edifici esistenti per uffici sia peculiare della zona del Centro Italia: nel Nord Italia prevalgono uffici collocati in edifici costruiti a partire dagli anni Settanta fino ad oggi, mentre al Sud Italia vengono utilizzati edifici costruiti nel dopoguerra (periodo 1946-1970).

Questa caratteristica si spiega con la significativa presenza di edifici storici nelle regioni centrali, che hanno investito fortemente nel recupero dei centri storici a differenza delle altre regioni. L'ISTAT [11] evidenzia come le regioni del Centro Italia, in particolare Umbria e Toscana, siano le migliori regioni per stato di conservazione degli edifici costruiti prima del 1920, secondi solo alla provincia autonoma di Bolzano. In queste due regioni, gli edifici storici in buono/ottimo stato di conservazione sono superiori all'80%. Il recupero di questi edifici ne ha permesso l'utilizzo anche per usi legati al terziario.

D'altro canto, la bibliografia riguardante i dati di richieste energetiche negli edifici ad uso ufficio è relativamente scarsa. Nel report "Caratterizzazione dei consumi energetici nazionali delle strutture ad uso ufficio" [12], il problema è messo chiaramente in luce. Gli autori della ricerca hanno infatti proposto un questionario riguardante alcuni dati (fatturazioni energetiche, caratteristiche strutturali ed energetiche degli edifici) ad un'ampia gamma di società, aziende e simili, sia pubbliche che private. Purtroppo, i risultati del sondaggio sono scoraggianti: solamente 9 aziende (rappresentante di meno del 10% degli enti contattati) hanno effettivamente collaborato al progetto di ricerca, mentre la maggior parte degli altri enti

contattati (in particolare pubblici) non ha risposto. Secondo gli autori, le maggiori difficoltà del reperimento di dati energetici da parte degli enti pubblici vanno cercate nella mancanza di una chiara ed efficace politica di gestione dell'energia. Mancano dati anche semplici per i quali non è richiesta una particolare connotazione tecnica (superficie disperdente, rapporto tra superficie vetrata e opaca, profili di presenza degli utenti negli uffici). In generale, il report evidenzia la scarsa conoscenza dei profili energetici da parte degli enti contattati, ma anche la bassa disponibilità alla condivisione di dati ed informazioni utili per una seria analisi dell'attuale patrimonio dal punto di vista energetico, che porterebbe poi allo studio di specifici scenari per l'ottimizzazione energetica di questi ambienti. Nelle conclusioni del report, si mette in evidenza la necessità di un'opera di sensibilizzazione all'interno delle pubbliche amministrazioni per una più corretta gestione dell'energia.

2.2 Individuazione del caso di studio

Seguendo la metodologia di tipo "bottom-up", si è voluto individuare un edificio rappresentativo del patrimonio ad uso ufficio, scegliendolo all'interno del parco edifici dell'Università di Pisa.

L'Università di Pisa gestisce un vasto parco edilizio, che comprende edifici adibiti ad aule, laboratori, biblioteche, ma anche uffici del personale docente e dell'amministrazione centrale. In Tabella 5 si riporta una suddivisione della superficie utilizzata dall'Università di Pisa in base all'utilizzo principale degli spazi.

Si nota come gli spazi siano adibiti principalmente agli uffici del personale docente e alle aule universitarie. Anche gli uffici dell'amministrazione centrale rappresentano una quota significativa del totale.

Tabella 5: Parco edilizio dell'Università di Pisa.

Tipologia di utilizzo	Superficie prevalentemente adibita all'utilizzo [m ²]	Percentuale [%]
Amministrazione Centrale	35820	10
Aule	95820	26
Biblioteca	16889	5

Foresterie	1837	1
Sistema Museale	33051	9
Servizi di ristorazione	4628	1
Uffici Personale Docente / Dipartimenti	136035	37
Servizi ricreativi	2834	1
Residenziale	808	0
Laboratori	35542	10
Altro	5598	2
Totale	363266	100

Quindi, l'analisi della fattibilità di riqualificazione energetica degli edifici adibiti ad ufficio ed, in particolare, la verifica della possibilità di portare tali edifici a NZEB è uno studio di interesse, visto il gran numero di edifici interessati.

Si sono innanzitutto individuate delle caratteristiche imprescindibili che l'edificio da studiare dovesse avere:

- appartenenza alla prima categoria di edifici ad uso ufficio, secondo la classificazione riportata in [10];
- disponibilità di fatturazioni energetiche e profili di consumo di energia termica ed elettrica per un periodo di tempo sufficientemente lungo;
- disponibilità da parte degli utenti di fornire informazioni relative al loro profilo di utilizzo dei locali;
- facilità di esecuzione di sopralluoghi e monitoraggio consumi elettrici.

Si è così arrivati all'identificazione dell'edificio di riferimento: il Palazzo A10, sito nel centro storico di Pisa, nelle vicinanze della Piazza del Duomo, comunemente Piazza dei Miracoli. Il palazzo è composto da 5 piani

fuori terra, di cui i 3 centrali sono interamente destinati ad uso ufficio dei Professori del Dipartimento di Afferenza (Dipartimento di Filologia, Letteratura e Linguistica).

La Direzione Edilizia dell'Ateneo ha fornito i dati caratteristici del palazzo, in termini di caratteristiche dell'involucro, schemi impiantistici, libretti del sistema di generazione, e fatturazioni energetiche degli ultimi anni. Attraverso vari sopralluoghi ed interviste all'utenza, è stato inoltre possibile identificare i profili di utilizzo dell'edificio, le caratteristiche delle lampade e dell'apparecchiatura elettrica presente, i profili di utilizzo dell'apertura delle finestre e delle chiusure oscuranti, nonché la tipologia di regolazione.

3 Analisi dello stato di fatto

3.1 Caratterizzazione del caso di studio

L'edificio in analisi si chiama Palazzo Nervi-Prini, dal nome delle famiglie nobili cui è appartenuto nei secoli precedenti il 1900. È stato poi acquistato dall'Università di Pisa nel 1963: ad oggi, è sede del Dipartimento di Filologia, Letteratura e Linguistica e del Centro Linguistico Interdipartimentale. Utilizzando la nomenclatura usata dalla Direzione Edilizia, l'edificio in analisi viene chiamato Palazzo A10.

L'edificio si trova nel centro storico di Pisa, affacciandosi verso ovest su Via Santa Maria, una delle vie principali che collega i Lungarni a Piazza dei Miracoli (si veda Figura 3). Sul lato est, l'edificio dà su un giardino interno; sui lati nord e sud, confina con altri edifici. Via Santa Maria è una strada piuttosto stretta sulla quale si affacciano palazzi simili (come dimensioni) a Palazzo A10: per questo motivo, gli apporti solari sulla facciata ovest sono ridotti e presenti solo quando il sole è alto sull'orizzonte. Sul lato est, l'effetto della radiazione solare è più marcato, mancando l'effetto schermante di altri palazzi; tuttavia, un'ala dell'edificio che si prolunga nel giardino rappresenta un oggetto verticale per una parte della facciata (si veda Figura 4). È presente anche una piccola corte interna sul lato nord, di dimensioni ridotte (si veda Figura 5).



Figura 3: Vista sul fronte di Palazzo A10, su Via Santa Maria.



Figura 4: Vista sul retro di Palazzo A10, su un giardino interno (lato est). Sulla sinistra dell'immagine, si noti l'ala dell'edificio che rappresenta un aggetto verticale per parte della facciata.

Complessivamente, l'edificio è costituito da cinque piani fuori terra, per un volume lordo complessivo di circa 13 000 m³: il piano terra è sede del Centro Linguistico Interdipartimentale, costituito soprattutto da aule didattiche e laboratori informatici; i piani primo, secondo e terzo sono utilizzati come uffici dei professori del dipartimento; il piano quarto è un sottotetto riscaldato ma la cui fruizione da parte degli utenti è ridotta. Di conseguenza, solamente i tre piani intermedi del palazzo sono stati presi in considerazione, di superficie calpestabile complessiva di circa 1470 m².



Figura 5: Visione parziale della corte (sul lato nord) vista dall'interno del palazzo.

I tre piani sono suddivisi in stanze, ad uso dei professori del Dipartimento. In ogni stanza si trovano uno o al massimo due professori. La tipica apparecchiatura elettronica di ufficio (computer fissi o portatili, stampanti, scanner) è presente in tutte le stanze, mentre nei corridoi di passaggio si trovano fax, fotocopiatrici in bianco e nero e a colori, ma anche un televisore ed un piccolo frigorifero. Inoltre, l'illuminazione artificiale, in ogni stanza, è fornita da un apparecchio a soffitto e da una lampada più piccola da scrivania. Per quanto riguarda i profili di presenza, sia da intervista al personale sia da ispezioni in-situ, si è verificato che i docenti sono presenti nelle ore centrali dei giorni feriali (dalle ore 8:00 alle ore 18:00, con una leggera riduzione durante l'ora di pranzo); solo pochi professori utilizzano gli studi anche durante il sabato (dalle 8:00 alle 12:00). L'edificio è del tutto inutilizzato durante la domenica. L'edificio rimane chiuso

per il ponte di Natale (circa 22-23 giorni a cavallo tra dicembre e gennaio), per qualche giorno durante le festività pasquali, ed una ventina di giorni durante il mese di agosto.

L'involucro esterno è tipico dell'edilizia storica, con pareti opache di spessore compreso tra 30 e 70 cm e quindi con un'elevata inerzia termica. La stratigrafia tipica delle pareti verso l'esterno è costituita principalmente da uno strato di mattoni e sassi, con intonaco sia sul lato esterno (colorato di rosso) che sul lato interno. I soffitti sono generalmente alti: il terzo piano ha un'altezza media di 3 m, mentre il primo ed il secondo piano hanno un'altezza media di 3.3 m. In ogni caso, le dispersioni termiche attraverso il solaio tra terzo e quarto piano e il pavimento tra piano terra e piano primo non sono state considerate, ritenendo adiabatiche queste strutture.

Per quanto riguarda l'involucro trasparente, tutte le finestre sono di tipo vetro singolo, con telaio in legno. Quasi tutte le finestre hanno persiane in legno, regolabili: tuttavia, da una intervista all'utenza e da una serie di sopralluoghi effettuati, si è verificato che solo pochi utenti utilizzano le chiusure oscuranti, preferendo lasciarle costantemente aperte. In tal modo, però, non vengono sfruttate le resistenze aggiuntive della persiana, utili soprattutto in inverno durante la notte per ridurre le dispersioni. D'estate, il mancato utilizzo delle persiane per regolare gli apporti solari favorisce il riscaldamento estivo delle stanze, con conseguenti grandi richieste energetiche per il raffrescamento estivo.

Per quanto riguarda la ventilazione naturale, solamente pochi utenti hanno affermato di arieggiare le stanze tramite l'apertura delle finestre. Il ricambio igienico è garantito quindi dalle infiltrazioni (comunque elevate, in quanto le finestre sono molto permeabili) e dalle aperture delle porte di ingresso a piano terra.

Si vedano le Figure 6-9 che raffigurano l'interno di Palazzo A10.

Il servizio di riscaldamento delle stanze è fornito da fan coil (che vengono utilizzati anche per il raffrescamento estivo). Solamente nei bagni sono presenti radiatori. Le modalità di accensione sono quelle consigliate da normativa per la zona climatica in esame (1 novembre – 15 aprile). Sono previsti dei periodi di intermittenza durante le ore notturne ed il weekend: in particolare, gli impianti sono accesi dalle ore 7:00 alle ore 18:00 dal lunedì al venerdì, dalle ore 7:00 alle ore 13:00 il sabato, mentre sono del tutto spenti la domenica.



Figura 6: Primo piano di Palazzo A10.



Figura 7: Alcune delle apparecchiature elettriche presenti in Palazzo A10.



Figura 8: Palazzo A10, stanza per la stampa.



Figura 9: Corridoio in Palazzo A10.

La regolazione è fatta per singolo ambiente: il ventilatore si spegne al raggiungimento del valore di set-point di temperatura, anche se l'acqua continua a circolare. L'acqua calda per il riscaldamento viene fornita da una caldaia a gas naturale, con rendimento 98% a potenza massima, temperatura di mandata 80 °C e di ritorno a 60 °C, e rendimento 100.5% a potenza massima, temperatura di mandata 50 °C e temperatura di ritorno 30 °C. Per il raffrescamento estivo, invece, viene utilizzato un gruppo frigo con potenza massima notevolmente sovradimensionata (312 kW), a compressione elettrica, di tipo aria-acqua. Il refrigerante utilizzato è R407C. Il valore di EER, in condizioni nominali (temperatura dell'aria esterna: 35 °C, temperatura dell'acqua refrigerata di mandata: 7 °C; temperatura dell'acqua refrigerata di ritorno: 12 °C), è 3.5: purtroppo non sono disponibili altri dati riguardanti le prestazioni in condizioni diverse dalle nominali.

Sia la caldaia sia il gruppo frigo sono asserviti all'intero edificio.

Nelle Figure 10-12 si vedono alcuni elementi dei sottosistemi di emissione, distribuzione e generazione.



Figura 10: Fan coil per il riscaldamento e raffrescamento delle stanze in Palazzo A10.



Figura 11: Pompe di distribuzione del sistema di riscaldamento.



Figura 12: Locale tecnico per la caldaia.

Non sono presenti consumi per servizio di acqua calda sanitaria.

Sono inoltre state acquisite alcune fatturazioni energetiche relative ai vettori utilizzati (energia elettrica e gas naturale) su base mensile, per gli anni 2009, 2010, 2011, 2014 e 2015. Queste fatturazioni sono state utilizzate per il confronto con il modello dello stato di fatto.

Così come gran parte degli edifici situati nel centro storico di Pisa, Palazzo A10 è protetto in accordo al Decreto Legislativo 42/2004 dalla Soprintendenza locale, in quanto di importanza storica. L'edificio si trova su un percorso turistico molto frequentato, che da Piazza dei Miracoli porta ai Lungarni (si veda Figura 13).

Le piante della zona analizzata sono riportate nelle Figure 14-16.



Figura 13: Visione aerea dell'area vicina a Palazzo A10 (evidenziato in giallo). In rosso è evidenziato il percorso turistico che da Piazza dei Miracoli porta verso il fiume Arno.

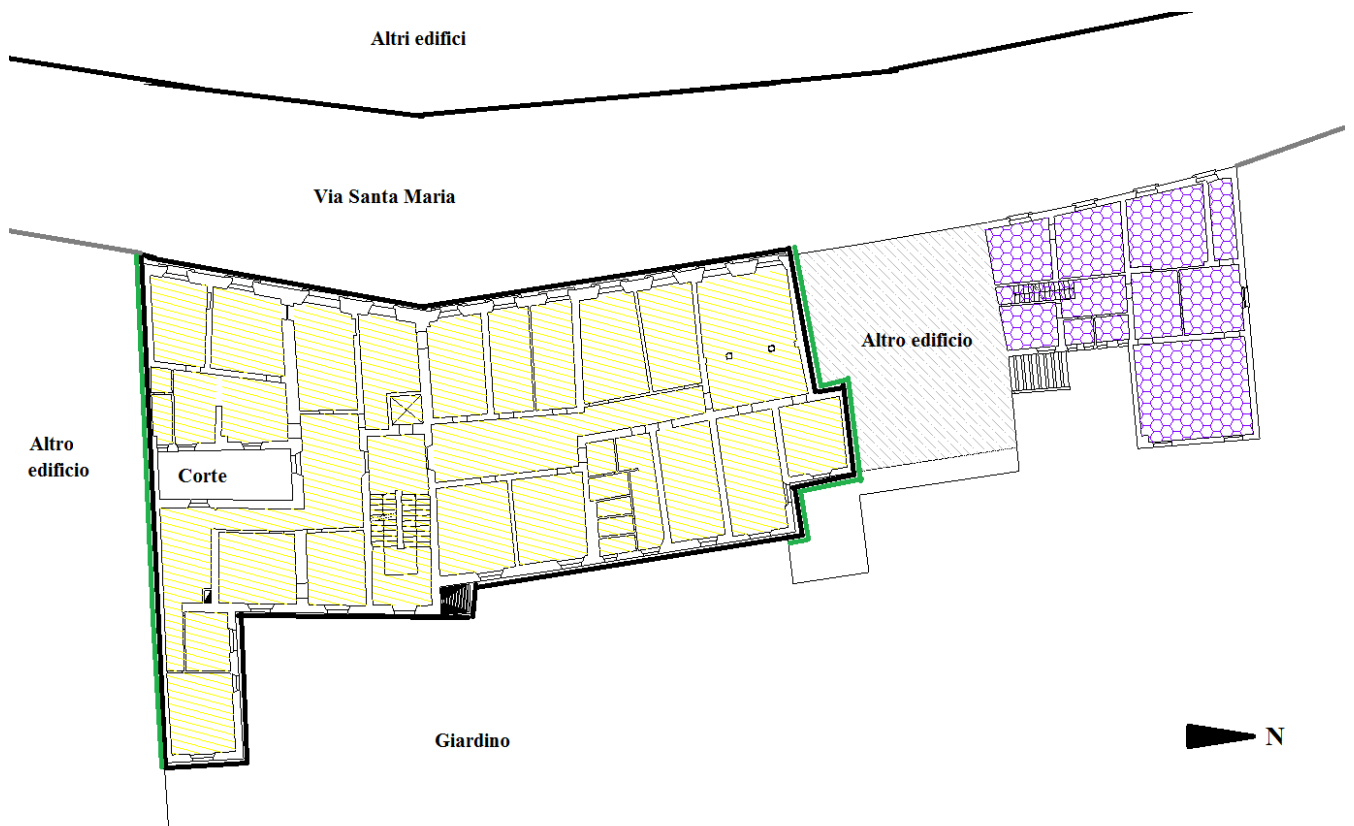


Figura 14: Pianta del primo piano di Palazzo A10. In giallo è evidenziata l'area oggetto di analisi. I confini verdi indicano le pareti adiabatiche verso altri edifici.

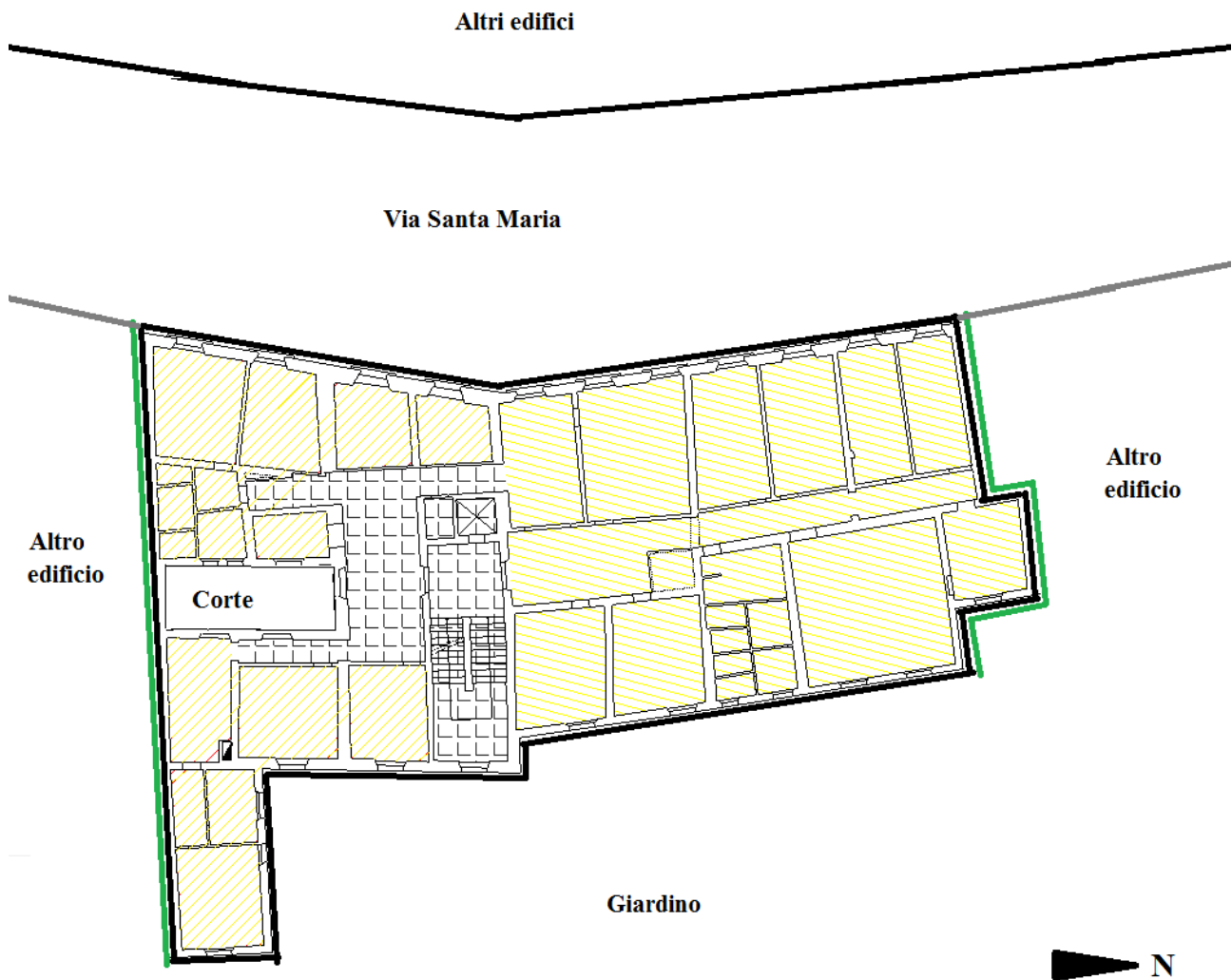


Figura 15: Pianta del secondo piano di Palazzo A10. In giallo è evidenziata le aree oggetto di analisi. I confini verdi indicano le pareti adiabatiche verso altri edifici.

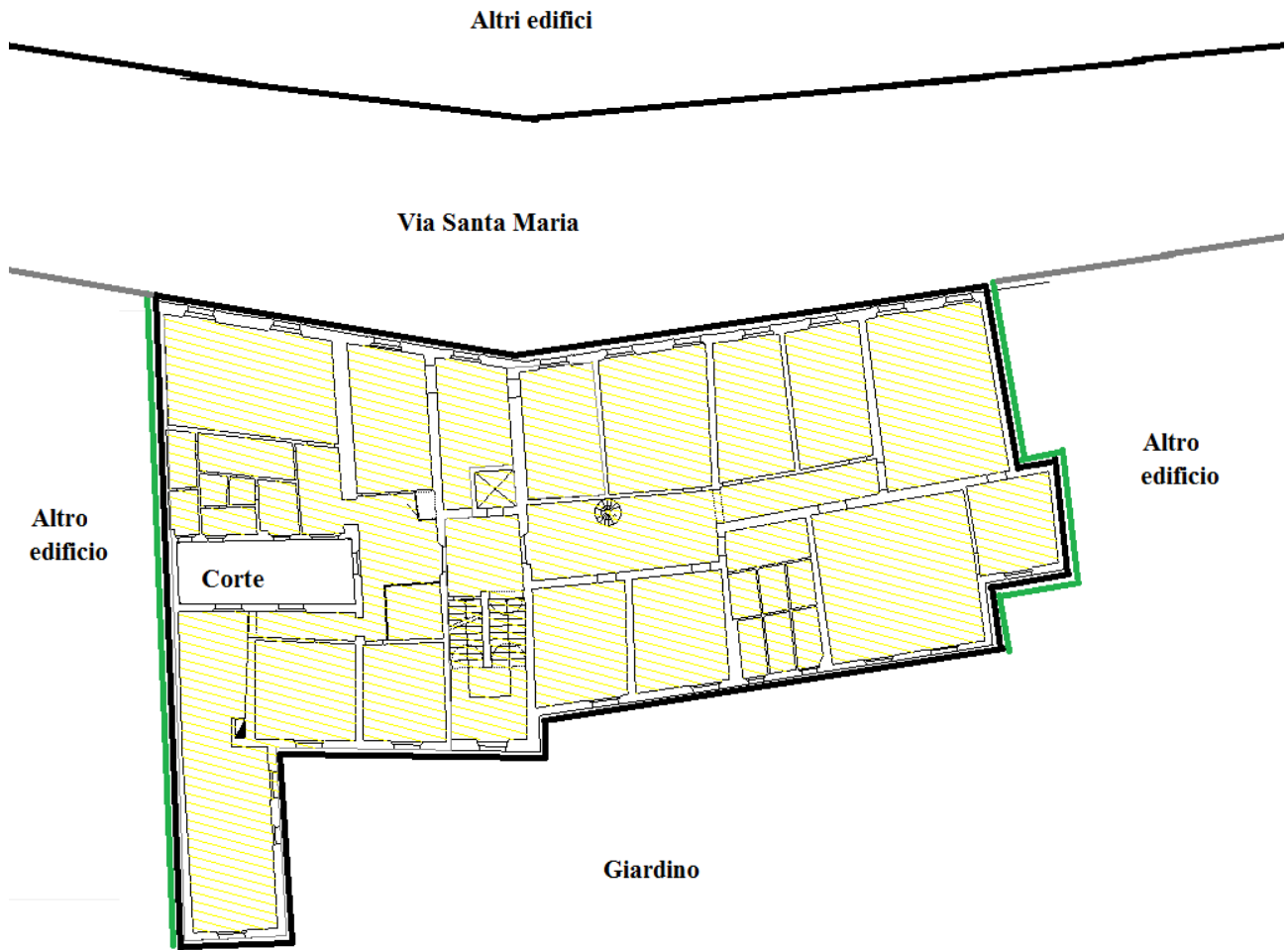


Figura 16: Pianta del terzo piano di Palazzo A10. In giallo è evidenziata le aree oggetto di analisi. I confini verdi indicano le pareti adiabatiche verso altri edifici.

3.2 Simulazione dello stato di fatto

L'analisi dello stato attuale è stata condotta con l'utilizzo di due software:

- Un software commerciale certificato CTI, EUCLIDE, di Geo Network Srl, è stato usato per la simulazione dell'edificio in conformità con la normativa tecnica UNI TS 11300, per la valutazione della classe energetica attuale ed il rispetto dei requisiti NZEB;
- Il software SEAS, sviluppato nel corso di precedenti accordi tra ENEA, Ministero dello Sviluppo Economico ed Università di Pisa, è stato utilizzato per un'analisi di tipo "audit energetico", che consiste nella simulazione dell'edificio nelle condizioni reali di funzionamento e una stima più precisa dei fabbisogni energetici per i vari servizi.

La doppia simulazione consente di fare delle considerazioni riguardanti la possibilità di rendere effettivamente NZEB un edificio ad uso uffici di tipo storico. Infatti, con l'utilizzo del software commerciale si verificano quali siano gli interventi di riqualificazione energetica necessari al raggiungimento delle condizioni NZEB previste dalla normativa, mentre con il software SEAS si verificano gli effettivi risparmi energetici ed economici ottenibili con alcuni interventi di riqualificazione, non necessariamente uguali a quelli studiati col software commerciale.

3.2.1 Simulazione secondo UNI/TS 11300 (software commerciale)

Come descritto nel paragrafo 3.1, la zona di analisi del presente studio consiste nei tre piani intermedi di Palazzo A10, utilizzati come uffici dal personale docente universitario. Questi locali vengono mantenuti a temperatura uniforme tramite lo stesso impianto di climatizzazione: possono quindi essere considerati un'unica zona termica (Zona_T1) in quanto sono soddisfatti i criteri di omogeneità definiti dalla normativa UNI/TS 11300-1:2014.

Nella situazione attuale, l'impianto di riscaldamento serve anche altre zone di Palazzo A10 (piano terra e quarto piano). La Zona_T1 è responsabile del 50% del fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento dell'intero edificio.

Modellazione dei componenti opachi

La Tabella 6 riporta tutti i componenti opachi presenti nella Zona_T1.

Tabella 6: Caratteristiche principali dei componenti opachi nella situazione attuale.

Cod.	Area [m ²]	Spessore [mm]	Trasmittanza [W / (m ² K)]	Esposizione	Fattore di ombreggiatura ^a	Coeff. ass. solare
M1NW_1p	123.7	700	1.05	NO	0.3	0.7
M1NW_sottofinestra	49.5	520	1.33	NO	0.3	0.7
M1NW_2p	120.0	700	1.05	NO	0.62	0.7
M1NW_3p	88.5	460	1.45	NO	0.68	0.7
M2_E	168.9	450	1.48	E	1	0.7
M2_E_sottofinestra	18.0	270	2.10	E	1	0.7
M3N	32.6	500	1.36	N	0.38	0.7
M3N_sottofinestra	1.5	300	1.97	N	1	0.7
M4E	65.6	550	1.27	E	1	0.7
M4E_sottofinestra	4.5	550	1.27	E	1	0.7
M5N	102.2	430	1.53	E	0.56	0.7
M6E	80.2	420	1.56	E	0.56	0.7
M8E	34.9	430	1.53	E	0.18	0.7
M8E_sottofinestra	4.5	270	2.10	E	1	0.7
corte	217.9	500	1.36	N	0.25	0.3
corte sottofinestra	18	300	1.97	N	0.25	0.3
MVS ^b	345.6	440	1.36	-	-	-
Divisori interni	3300	330	1.57	-	-	-

^a Appendice D - UNI/TS 11300-1:2014.

^b La parete MVS confina con un ambiente non climatizzato.

[Modellazione dei componenti trasparenti:](#)

La Tabella 7 riporta tutti i componenti trasparenti presenti nella Zona_T1 e le loro proprietà termofisiche.

Tabella 7: Caratteristiche principali dei componenti trasparenti nella situazione attuale.

Cod.	Numero component i identici	Area tot (incluso telaio) [m ²]	% sup. vetr.	Trasmittanza (incluso telaio) [W / (m ² K)]	Esposizione	Trasmittanza solare verso l'interno ^a	Fattore di ombreggiatura ^b	Fattore di rimozione dovuto a tendaggi
J	22	3.1	54%	4.04	O	0.85	0.24	0.95
IE	3	2.3	53%	4.00	E	0.85	0.99	0
IN	1	2.3	53%	4.00	N	0.85	0.80	0
L1p1	7	3.1	60%	4.27	E	0.85	1	0
M1P	1	3.0	67%	4.51	E	0.85	1	0.45
A1pE	2	3.8	54%	4.06	E	0.85	0.42	0
A1pN	3	3.8	54%	4.06	N	0.85	0.85	0
B1P	3	2.4	60%	4.28	E	0.85	1	0
E1p	4	1.8	43%	3.64	N	0.85	0.25	0
R3Pn	4	1.8	49%	3.84	N	0.85	0.25	0
R3PE	4	1.8	49%	3.86	E	0.85	1	0.95
Q2pN	4	2.3	57%	4.14	N	0.85	0.24	0
P2P	4	2.3	57%	4.143	E	0.85	0.70	0.95
U3P	11	2.2	52%	4.00	O	0.85	0.70	0.95
OE	6	0.2	67%	4.56	E	0.85	1	0
ON giardino	3	0.2	67%	4.56	N	0.85	0.85	0
ON corte	3	0.2	67%	4.56	N	0.85	0.25	0
F corte	1	1.2	53%	4.02	N	0.85	0.25	0

^a Prospetto B.5, Appendice B – UNI/TS 11300-1:2014.

^b Appendice D - UNI/TS 11300-1:2014.

La Tabella 8 riporta tutti i ponti termici presenti nella Zona_T1 e le loro proprietà termofisiche.

Tabella 8: Caratteristiche principali dei ponti termici nella situazione attuale.

Codice	Trasmittanza lineica [W / (m K)]	Lunghezza ponte termico [m]	Descrizione
PTR.001	0.06	332.0	Solette interpiano
PTR.002	0.09	76.8	Angolo
PTR.003	0.08	76.8	Angolo 2

Modellazione della ventilazione naturale

Le dispersioni per ventilazione sono calcolate secondo UNI 10339:1995 [13] e UNI 11300-1:2014 [14]. I parametri utilizzati per il calcolo delle volumetrie di ricambio d'aria sono le seguenti:

- Portata d'aria per persona, Q_{op} : 39.60 m³/h;
- Indice di affollamento, N_s : 0.06 persone/m²;
- Fattore di correzione, F_{ve} : 0.59;
- Superficie utile, S : 1472.62 m².

Modellazione degli ombreggiamenti

I fattori di riduzione per ombreggiatura riportati nella Tabella 6 e Tabella 7 sono stati valutati attraverso la metodologia descritta nella normativa UNI/TS 11300-1:2014 [14]. Sono stati presi in considerazione gli ombreggiamenti dovuti agli edifici circostanti Palazzo A10 e i gli aggetti verticali e orizzontali.

Modellazione dell'impianto di illuminazione artificiale

La potenza nominale installata degli apparecchi di illuminazione è pari a 6976 W. Il fabbisogno di energia elettrica per illuminazione viene calcolato secondo le procedure e dai coefficienti descritti dalla UNI/TS 11300-2:2014 [15], UNI EN 12464-1:2011 [16] e UNI EN 15193-1:2017 [17].

Nello specifico, per il calcolo del fattore di dipendenza dell'occupazione, F_o , sono stati inseriti i seguenti input:

- Illuminazione attivata centralmente: No;
- Sistema di controllo dell'illuminazione: Accensione e spegnimento manuale;
- Tipo di calcolo: Complessivo per l'edificio;
- Tipo di edificio/locale: Uffici.

Per il calcolo del fattore di dipendenza dalla luce diurna, F_d , sono stati inseriti i seguenti input:

- Zona/locale con penetrazione di luce diurna Sì;
- Orario operativo quotidiano dalle ore 8:00 alle 17:00: Sì;
- Illuminamento mantenuto nella zona/locale, E_m : 500 lux
- Fattore di disponibilità della luce diurna: Medio.

Modellazione dell'impianto di riscaldamento invernale

Emissione

Il sottosistema di emissione è costituito principalmente da ventilconvettori e da alcuni radiatori presenti nei bagni (trascurabili ai fini delle valutazioni di questo studio). La potenza dei terminali installata, circa 130 kW, risulta notevolmente sovradimensionata rispetto al carico termico di progetto invernale valutato secondo la UNI EN 12831:2006 [18] e pari a circa 70 kW. Questo sovradimensionamento è alla base di alcune criticità in termini di efficienza energetica che saranno evidenziati nel paragrafo 4.2.1 .

Il calcolo dei rendimenti e delle perdite di emissione è effettuato secondo i prospetti presentati dalla UNI/TS 11300-2:2014 [15]. La potenza totale degli ausiliari (ventilatori) di emissione è pari a 3,75 kW.

Regolazione

Il calcolo dei rendimenti e delle perdite di regolazione è effettuato secondo i prospetti presentati dalla UNI/TS 11300-2:2014. La regolazione è di tipo ON/OFF effettuata a livello di ambiente senza centralina climatica.

Distribuzione

Il rendimento di distribuzione è stato valutato secondo la procedura analitica descritta nell'Appendice A della normativa UNI/TS 11300-2:2014, ottenendo un valore di circa 0.98. La potenza elettrica del circolatore a velocità costante è di 2.2 kW.

Accumulo

Non presente.

Generazione

Il sottosistema di generazione è costituito da una caldaia tradizionale a gas naturale, non modulabile, con rendimento 98% a potenza massima, temperatura di mandata 80 °C e di ritorno a 60 °C, e rendimento 100.5% a potenza massima, temperatura di mandata 50 °C e temperatura di ritorno 30 °C. La potenza utile nominale del generatore è di 260 kW.

Come descritto nel paragrafo 3.1, la caldaia non serve esclusivamente la Zona_T1, ma fornisce acqua calda anche ad altre zone di Palazzo A10. I millesimi di riscaldamento da attribuire alla Zona_T1 rispetto al totale sono 499.

Modellazione dell'impianto di produzione di acqua calda sanitaria

Non è presente un impianto per la produzione di acqua calda sanitaria. Sono presenti, in alcuni servizi igienici, dei scaldacqua a resistenza elettrica: da sopralluogo si è però verificato che essi sono sempre spenti.

Modellazione dell'impianto di climatizzazione estiva

Emissione

Il sottosistema di emissione è costituito principalmente da ventilconvettori idronici, gli stessi utilizzati per l'impianto di riscaldamento. Il calcolo dei rendimenti e delle perdite di emissione è effettuato secondo i prospetti presentati dalla UNI/TS 11300-3:2010 [19]. La potenza totale degli ausiliari (ventilatori) di emissione è pari a 3.75 kW.

Regolazione

Il calcolo dei rendimenti e delle perdite di regolazione è effettuato secondo i prospetti presentati dalla UNI/TS 11300-3:2010. La regolazione è di tipo ON/OFF effettuata a livello di ambiente senza centralina climatica.

Distribuzione

Il rendimento di distribuzione è stato valutato secondo la procedura descritta nell'Appendice A della normativa UNI/TS 11300-3:2010 [19], utilizzando i rendimenti tabellati per reti a distribuzione orizzontale di piano, per uno sviluppo su tre piani. Il rendimento ottenuto è pari a 0.98. La potenza elettrica del circolatore a velocità costante è di 2.2 kW.

Accumulo

Non presente.

Generazione

Il sottosistema di generazione è costituito da un gruppo frigo con potenza massima notevolmente sovradimensionata (312 kW), a compressione elettrica, di tipo aria-acqua. Il refrigerante utilizzato è R407C. Il valore di EER, in condizioni nominali (temperatura dell'aria esterna: 35 °C, temperatura dell'acqua refrigerata di mandata: 7 °C; temperatura dell'acqua refrigerata di ritorno: 12 °C), è 3.5: purtroppo non sono disponibili altri dati riguardanti le prestazioni in condizioni diverse dalle nominali.

Come descritto nel paragrafo 3.1, il gruppo frigo non serve esclusivamente la Zona_T1, ma fornisce acqua refrigerata anche ad altre zone di Palazzo A10. I millesimi di riscaldamento da attribuire alla Zona_T1 rispetto al totale sono 499.

3.2.2 Diagnosi energetica (software SEAS)

Palazzo A10 è stato oggetto anche di una diagnosi energetica eseguita col software SEAS, software sviluppato nell'ambito di un precedente programma di ricerca tra ENEA, Ministero dello Sviluppo Economico ed Università di Pisa [20–22].

Scopo della diagnosi è quello di identificare gli effettivi fabbisogni energetici nelle condizioni reali di utilizzo dell'edificio, considerando quindi la temperatura effettiva all'interno delle stanze, i profili di presenza delle persone nei locali (che possono essere diversi tra giorni feriali e festivi), l'utilizzo delle chiusure oscuranti (che portano ad un aumento della resistenza termica in corrispondenza delle superfici vetrate, limitando le perdite termiche ma anche gli apporti solari gratuiti), l'apertura delle finestre ed i giorni di spegnimento dell'impianto (ad esempio, in corrispondenza delle vacanze di Natale). Per la validazione del modello in SEAS, si sono confrontati gli output del software in termini di richieste di energia termica (gas naturale per riscaldamento) ed elettrica con le fatturazioni energetiche disponibili per gli anni più recenti. Il confronto con le fatturazioni energetiche è stato fatto su base annuale, anche se SEAS calcola le richieste energetiche relative solamente alla stagione invernale. Un ulteriore confronto è stato fatto con l'utilizzo del software TRNSYS, con il quale l'edificio è stato simulato con time-step 15 minuti.

Nei paragrafi seguenti sono riportate le caratteristiche di Palazzo A10 così come riportate nel software SEAS.

Caratteristiche climatiche

Per un'analisi precisa delle richieste energetiche è necessario utilizzare dati climatici reali. La norma UNI 10349 [23] riporta dati climatici medi mensili in termini di temperatura e irradiazione solare per la provincia di Pisa. Tuttavia, la diagnosi energetica risulta più precisa nel momento in cui si utilizzino i dati medi mensili specifici dell'anno in considerazione: in altre parole, per ogni anno in cui sono disponibili le fatturazioni energetiche, la diagnosi energetica di un edificio risulta più precisa nel momento in cui si utilizzino i dati climatici relativi all'anno stesso, di modo che i consumi forniti dal software siano calcolati con i dati climatici reali di quell'anno. Si sono utilizzati quindi i valori di temperatura media mensile negli anni nei quali erano disponibili anche le fatturazioni energetiche del gas naturale e dell'energia elettrica: si veda la Tabella 9.

Tabella 9: Temperature medie mensili degli anni analizzati, confrontate con quelle dell'anno meteorologico tipo della UNI 10369.

Mese\ Anno	2009	2010	2011	2014	2015	UNI 10349
Gennaio	6.6	5.4	6.7	8.9	7.8	6.6
Febbraio	6.7	7.4	7.1	10.6	8	7.6
Marzo	10	9.5	9.8	11.1	11	10.5
Aprile	13.9	13	14	13.4	12.8	13.5
Maggio	18.4	15.6	18.1	16.1	17.2	17.1
Giugno	21.2	20.6	21.7	21.5	22	21.0
Luglio	24.1	25.2	23.1	22.4	25.7	23.4
Agosto	25.5	23	24.4	22.5	23.6	23.4
Settembre	21.5	19.5	21.1	20.5	20.2	20.8
Ottobre	15.1	15.1	16.1	17.5	15.8	16.2
Novembre	11.8	11.8	11.6	14	12.3	11.6
Dicembre	7.1	6.9	9.1	9.4	9.3	7.7

Zonizzazione

È stata considerata un'unica zona termica (Zona_T1), che comprende i tre piani dell'edificio adibiti ad uffici del personale docente. Le caratteristiche geometriche della zona sono riportate in Tabella 10. Nella zona sono compresi gli uffici, i corridoi ed i servizi igienici.

Il numero di occupanti di progetto (70) si riferisce al numero massimo di persone che può essere presente nella zona, ma il reale profilo di utilizzo è stato riportato nella scheda "Profilo Presenze" ed è differente sia

su scala bioraria sia tra giorni feriali e festivi. Gli utenti svolgono un'attività sedentaria tipica dei lavoratori in ufficio/scuola, con la quale si calcolano gli apporti interni gratuiti alla zona nelle ore di presenza. La Figura 17 riporta lo screenshot dei profili feriale e festivo delle presenze nella zona e la tabella con i giorni di assenza nella zona. Quest'ultimo profilo serve a tenere conto della mancanza di apporti gratuiti interni e del non utilizzo dei servizi di ACS e delle apparecchiature elettriche in alcuni giorni di ogni mese.

Tabella 10: Alcune caratteristiche geometriche della Zona_T1.

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Valore
Volume lordo	V_l	m^3	6346.5
Volume netto	V_n	m^3	5482.1
Superficie netta di pavimento	A_f	m^2	1472.6
Superficie dell'involucro disperdente	A_e	m^2	1741.2
Superficie dell'involucro finestrato	A_w	m^2	195
Rapporto di forma	S/V	m^{-1}	0.27

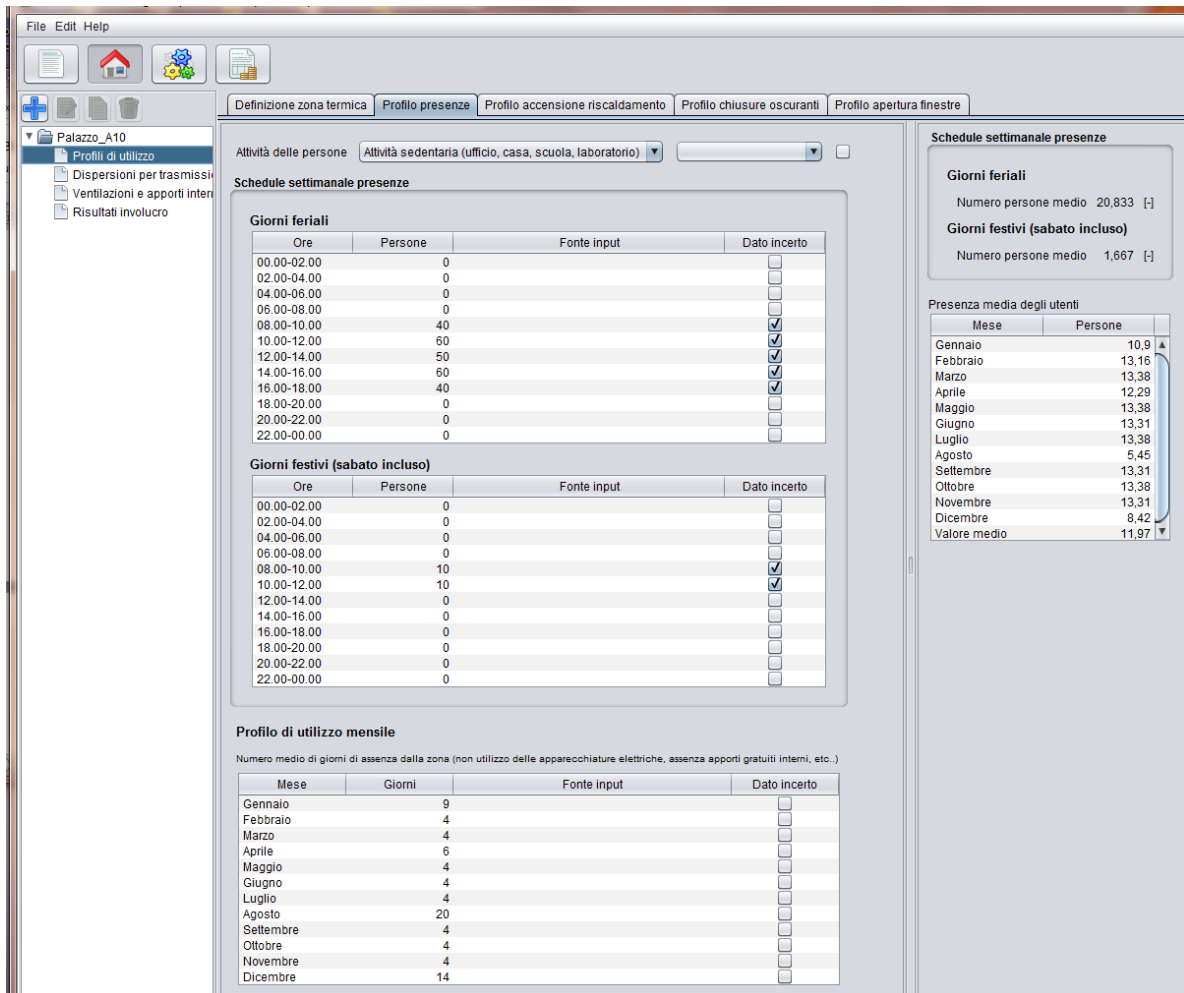


Figura 17: Profili di utilizzo di Palazzo A10 da parte degli utenti, schermata dei dati inseriti in SEAS.

La zona termica è servita da un impianto di riscaldamento con caldaia a gas naturale che serve, tramite fan coils, i vari ambienti. La temperatura di set-point è 20 °C. Il riscaldamento degli ambienti è fornito con regime di intermittenza su 61 ore settimanali, nelle restanti ore l'edificio è in evoluzione libera. Gli orari di accensione sono:

- Da lunedì a venerdì dalle 07:00 alle 18:00;
- Sabato dalle 07:00 alle 13:00;
- Domenica sempre spento.

Per l'accensione dell'impianto si seguono le date previste dalla legislazione in vigore per la zona climatica D (dal 1 novembre al 15 aprile); sono stati considerati anche dei giorni di spegnimento dell'impianto in occasione delle festività natalizie, pasquali e delle ferie estive (si veda Figura 18).

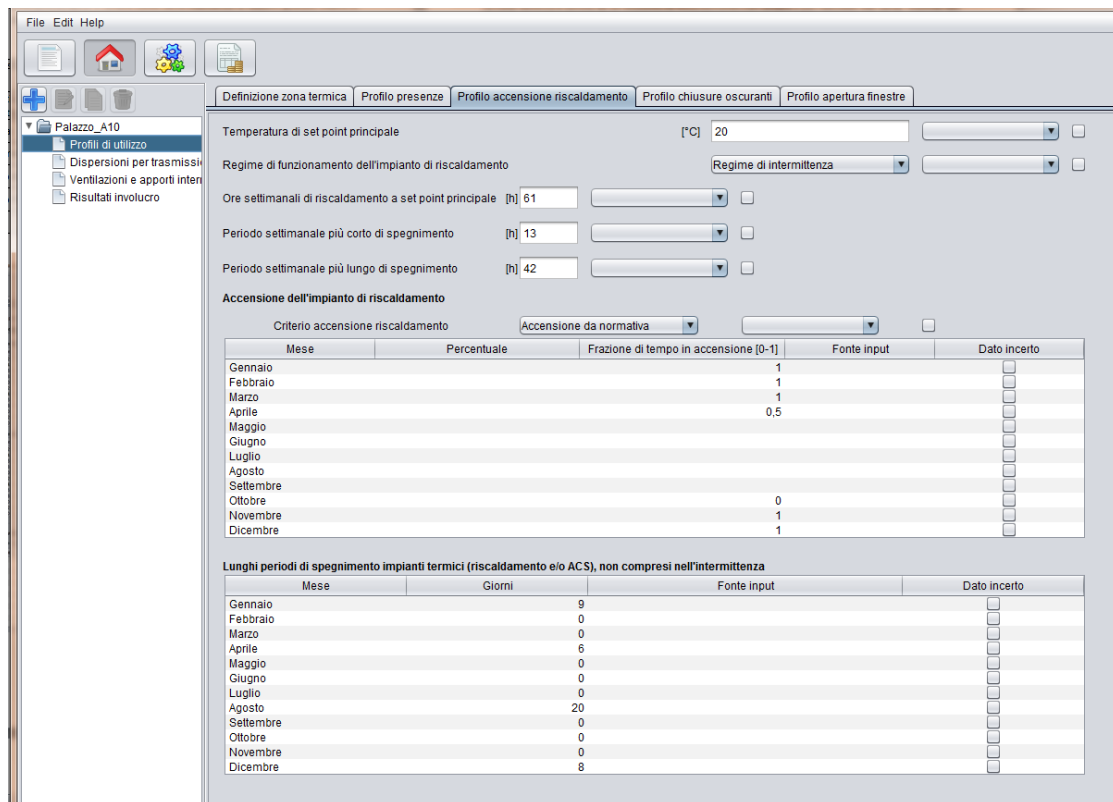


Figura 18: Profili di utilizzo del sistema di riscaldamento, schermata dei dati inseriti in SEAS.

I profili biorari medi mensili di apertura delle finestre e di utilizzo delle chiusure oscuranti sono stati desunti da sopralluoghi nell'edificio e da intervista all'utenza. Dall'analisi di questi dati si verifica che pochi utenti nella zona utilizzano attivamente le chiusure oscuranti per ridurre le dispersioni termiche notturne: le persiane vengono, nella quasi totalità dei casi, lasciate sempre aperte. Per quanto riguarda l'apertura delle finestre per ventilazione naturale, si è visto che questa è effettuata solamente nei mesi più caldi nelle prime ore di utilizzo dei locali (è presente un impianto di raffrescamento attivo da giugno a settembre). Non è presente il servizio di ventilazione meccanica.

Il ricambio igienico è comunque garantito dalle elevate infiltrazioni dagli infissi: sono presenti infatti infissi storici a singolo vetro con telaio in legno con elevata permeabilità all'aria. La Figura 19 e la Figura 20 riportano i profili di utilizzo delle chiusure oscuranti e apertura delle finestre così come inseriti in SEAS.

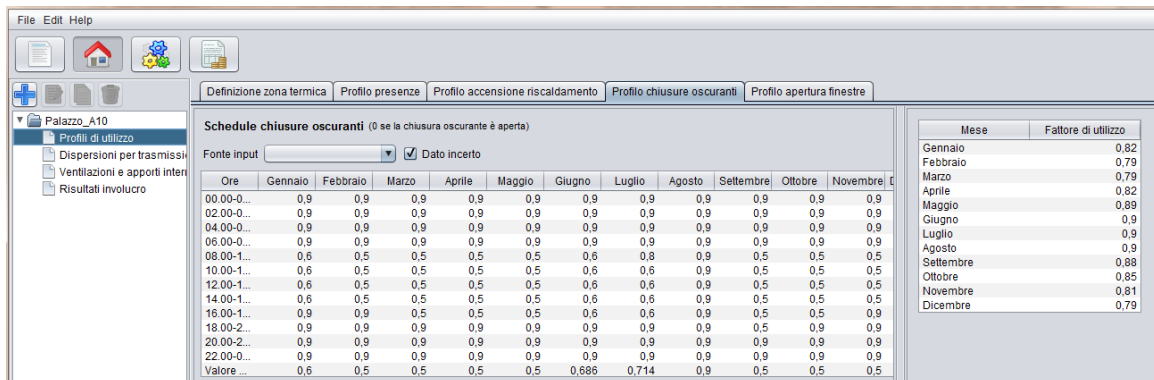


Figura 19: Profili di utilizzo delle chiusure oscuranti, schermata dei dati inseriti in SEAS.

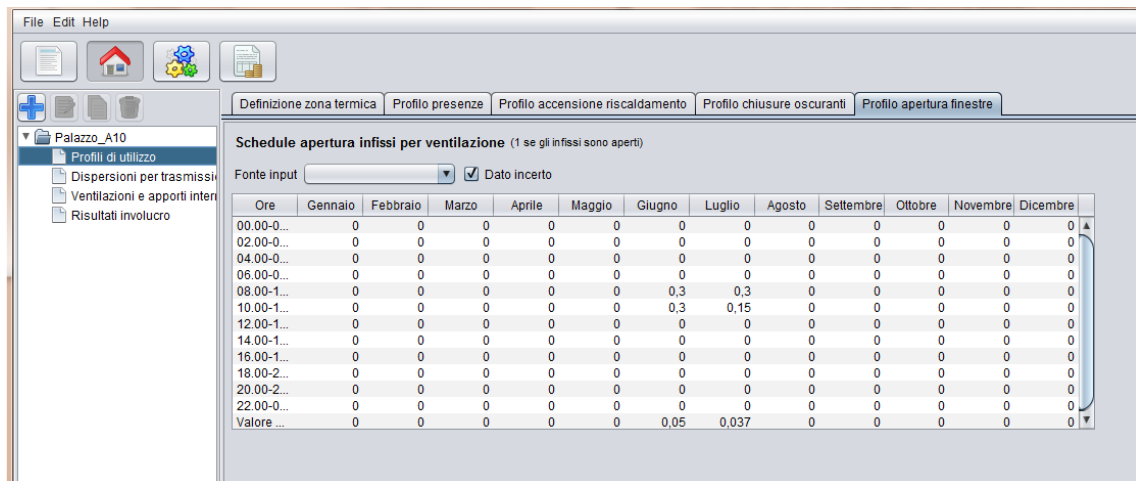


Figura 20: Profili di apertura delle finestre, schermata dei dati inseriti in SEAS.

Modellazione dei componenti opachi, trasparenti e dei ponti termici

Sono stati inserite le caratteristiche dei componenti opachi e finestrati, suddivisi per tipologia e orientamento. Si faccia riferimento ai dati riportati nel Paragrafo 3.2.1.

Modellazione della ventilazione degli ambienti e degli apporti interni

Nella sezione relativa alla ventilazione e apporti interni in SEAS, si è fatto riferimento ai dati rilevati in fase di sopralluogo per quanto riguarda le richieste di acqua calda sanitaria, gli utilizzi di apparecchiature elettroniche e di illuminazione; per quanto riguarda invece la ventilazione, si è utilizzata la metodologia da UNI 10339 [13], che fornisce volumi di ricambio d’aria in base alla destinazione d’uso degli ambienti (si veda la Figura 21).

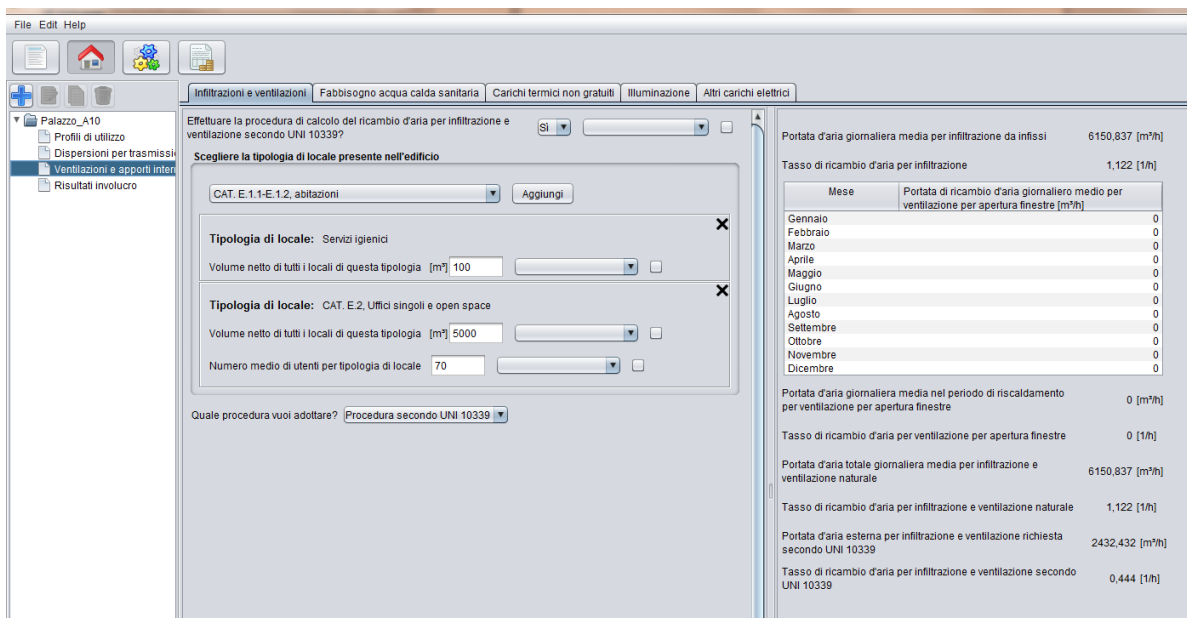


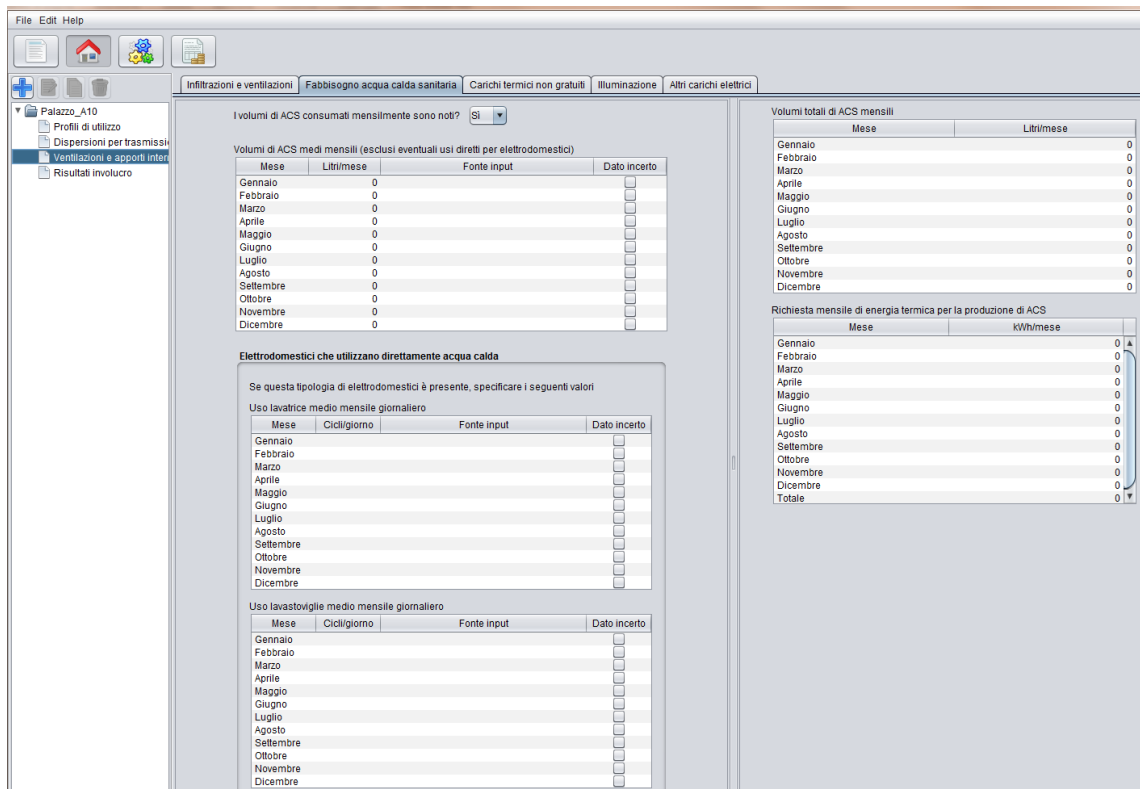
Figura 21: Calcolo delle perdite per ventilazione secondo UNI 10339, schermata dei dati inseriti in SEAS.

Per quanto riguarda invece gli altri profili di richieste energetiche o apporti, si sono riportati i seguenti dati:

- Come specificato nel paragrafo 3.2.1, non è presente il servizio di acqua calda sanitaria, quindi nella relativa schermata si sono riportati nulli tutti i valori di volume di ACS richiesti mensilmente;
- È presente un sistema di illuminazione d’emergenza, del quale però non è nota la potenza necessaria alla carica delle batterie;
- Sono presenti diverse tipologie di lampade: tubolari (di tre diversi tipi) nelle stanze, nei corridoi, e nei servizi igienici; e lampade da lettura, presenti solo in alcune stanze sulle scrivanie dei docenti;

- Il controllo dell'illuminazione è manuale in tutti gli ambienti;
- L'apparecchiatura elettronica presente nella zona è quella tipica degli ambienti ad uso ufficio, con personal computer, fax, stampanti e fotocopiatrici: su nessun computer è impostata la modalità risparmio energetico. D'altro canto, alcune di queste apparecchiature sono di tipo Energy Star. Da intervista all'utenza, si è verificato un utilizzo ridotto di queste apparecchiature.

Le Figure 22-24 si riferiscono ai dati inseriti su SEAS nelle relative sezioni.



The screenshot shows the SEAS software interface with the following sections:

- Menu and Toolbar:** File, Edit, Help, and various icons for file operations and navigation.
- Navigation Panel:** Palazzo_A10, Profili di utilizzo, Dispersioni per trasmissi, Ventilazioni e apporti inter, Risultati involucro.
- Tabbed Interface:** Infiltrazioni e ventilazioni, Fabbisogno acqua calda sanitaria, Carichi termici non gratuiti, Illuminazione, Altri carichi elettrici.
- Main Content Area:**
 - I volumi di ACS consumati mensilmente sono noti?** Si
 - Volumi di ACS medi mensili (esclusi eventuali usi diretti per elettrodomestici)**

Mese	Litri/mese	Fonte input	Dato incerto
Gennaio	0		<input type="checkbox"/>
Febbraio	0		<input type="checkbox"/>
Marzo	0		<input type="checkbox"/>
Aprile	0		<input type="checkbox"/>
Maggio	0		<input type="checkbox"/>
Giugno	0		<input type="checkbox"/>
Luglio	0		<input type="checkbox"/>
Agosto	0		<input type="checkbox"/>
Settembre	0		<input type="checkbox"/>
Ottobre	0		<input type="checkbox"/>
Novembre	0		<input type="checkbox"/>
Dicembre	0		<input type="checkbox"/>
 - Elettrodomestici che utilizzano direttamente acqua calda**

Se questa tipologia di elettrodomestici è presente, specificare i seguenti valori

Usò lavatrice medio mensile giornaliero

Mese	Cicli/giorno	Fonte input	Dato incerto
Gennaio			<input type="checkbox"/>
Febbraio			<input type="checkbox"/>
Marzo			<input type="checkbox"/>
Aprile			<input type="checkbox"/>
Maggio			<input type="checkbox"/>
Giugno			<input type="checkbox"/>
Luglio			<input type="checkbox"/>
Agosto			<input type="checkbox"/>
Settembre			<input type="checkbox"/>
Ottobre			<input type="checkbox"/>
Novembre			<input type="checkbox"/>
Dicembre			<input type="checkbox"/>

Usò lavastoviglie medio mensile giornaliero

Mese	Cicli/giorno	Fonte input	Dato incerto
Gennaio			<input type="checkbox"/>
Febbraio			<input type="checkbox"/>
Marzo			<input type="checkbox"/>
Aprile			<input type="checkbox"/>
Maggio			<input type="checkbox"/>
Giugno			<input type="checkbox"/>
Luglio			<input type="checkbox"/>
Agosto			<input type="checkbox"/>
Settembre			<input type="checkbox"/>
Ottobre			<input type="checkbox"/>
Novembre			<input type="checkbox"/>
Dicembre			<input type="checkbox"/>
 - Volumi totali di ACS mensili**

Mese	Litri/mese
Gennaio	0
Febbraio	0
Marzo	0
Aprile	0
Maggio	0
Giugno	0
Luglio	0
Agosto	0
Settembre	0
Ottobre	0
Novembre	0
Dicembre	0
 - Richiesta mensile di energia termica per la produzione di ACS**

Mese	kWh/mese
Gennaio	0
Febbraio	0
Marzo	0
Aprile	0
Maggio	0
Giugno	0
Luglio	0
Agosto	0
Settembre	0
Ottobre	0
Novembre	0
Dicembre	0
Totale	0

Figura 22: Servizio di ACS, schermata dei dati inseriti in SEAS.

Esiste un sistema di illuminazione di emergenza? **Si**

E' nota la potenza necessaria alla carica delle batterie del sistema di emergenza? **No**

Tipologia di controllo dell'illuminazione **Manuale**

Lampade

Aggiungi lampada

Descrizione	Numero di apparecchi	Potenza nominale [W]	Potenza media impegnata per tipologia [kW]
tubolari 1	24	49	1,176
tubolari 2	80	55	4,4
servizi igienici	20	50	1
lampade da lettura	10	40	0,4

Energia elettrica totale

Mese	kWh
Gennaio	853,65
Febbraio	1.085,8
Marzo	1.223,67
Aprile	1.021,59
Maggio	1.223,67
Giugno	1.177,66
Luglio	1.223,67
Agosto	305,41
Settembre	1.177,66
Ottobre	1.223,67
Novembre	1.177,66
Dicembre	559,14

Figura 23: Caratteristiche del sistema di illuminazione, schermata dei dati inseriti in SEAS.

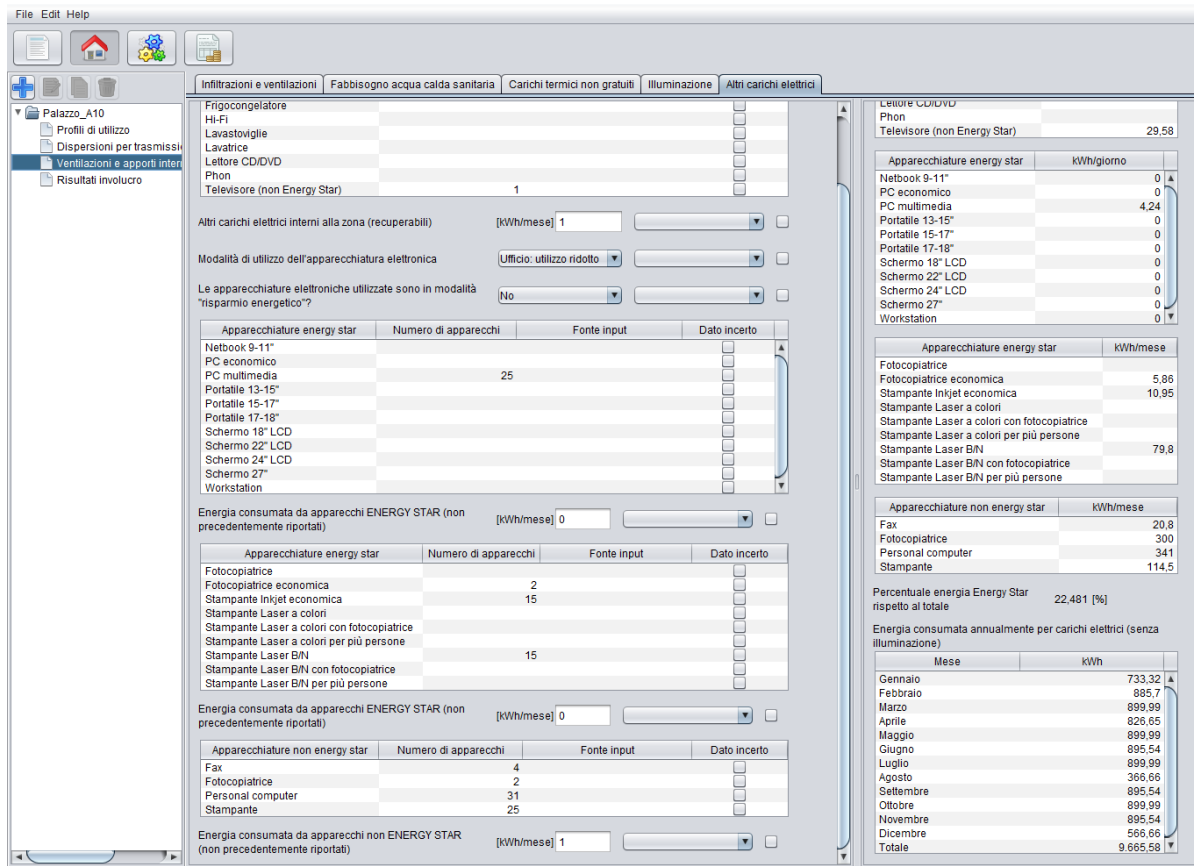


Figura 24: Altri carichi elettrici usati in Palazzo A10, schermata di alcuni dei dati inseriti in SEAS.

Risultati relativi all'involucro edilizio

Come primo output di SEAS, vengono forniti i valori mensili di perdite per trasmissione (attraverso le pareti opache, le finestre, i ponti termici) e per ventilazione, confrontati con gli apporti solari (attraverso l'involucro opaco e trasparente), gli apporti dovuti alla presenza di persone e gli apporti interni non gratuiti (dovuti al recupero negli ambienti dell'energia usata per illuminazione ed apparecchiatura elettronica). Si veda la Figura 25. Questi risultati sono stati utilizzati per la validazione del modello dell'involucro tramite confronto con gli output del software TRNSYS (la validazione è riportata nel successivo paragrafo 3.3.3).

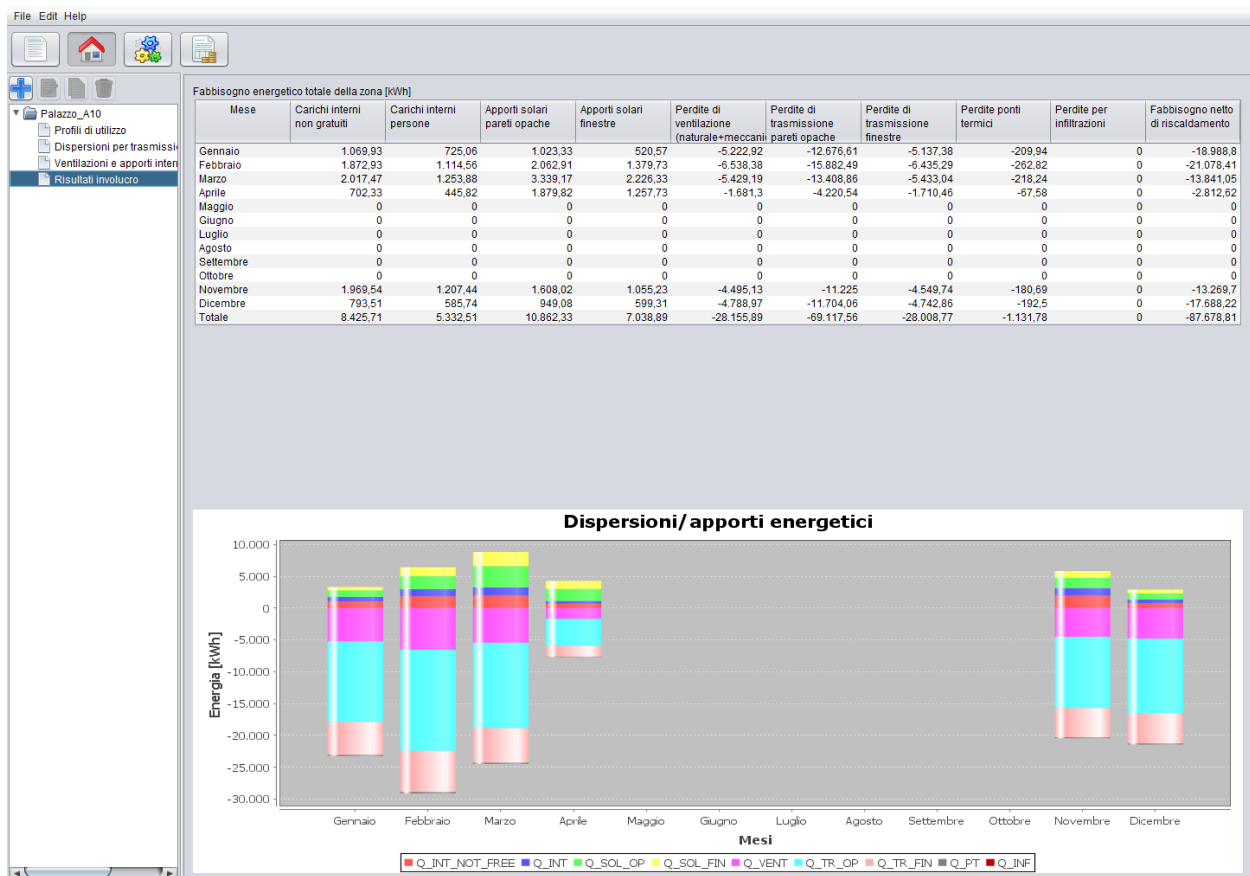


Figura 25: Termini del bilancio energetico della zona a livello di involucro, schermata dei risultati intermedi in SEAS.

Dati relativi all'impianto: millesimi

L'inserimento dei millesimi suddivisi per servizio elettrico e riscaldamento serve per riportare i consumi relativi alla singola zona in esame a quelli relativi all'intero edificio.

La suddivisione millesimale per servizio di riscaldamento è stata fatta sulla base della potenza termica installata nelle due zone: i tre piani centrali dell'edificio, oggetto della diagnosi, e la zona costituita dal piano terra e dall'ultimo piano (non simulati nella diagnosi, ma serviti dallo stesso generatore a gas naturale). La potenza installata di quest'ultima zona tiene conto delle maggiori dispersioni della zona dovute allo scambio col terreno e col tetto. Dalla potenza installata nelle due zone, si è scelto il valore 499 come millesimi di riscaldamento per la zona oggetto di audit.

Per quanto riguarda il servizio elettrico, i millesimi della zona in esame rispetto all'edificio nel suo complesso sono stati presi pari anch'essi a 499, con una ripartizione interna basata sul numero medio di persone presenti.

Con l'inserimento dei millesimi per servizio di riscaldamento, si possono confrontare direttamente le richieste energetiche calcolate con SEAS con quelle desunte dalle fatturazioni energetiche del gas naturale che serve la caldaia. Per quanto riguarda invece il servizio elettrico, non si può effettuare direttamente il confronto tra i risultati di SEAS e quelli da fatturazione a causa della presenza di un unico contatore generale che serve diversi edifici oltre a Palazzo A10. In particolare, fino alla fine del 2016 il contatore serviva quattro edifici, ma nell'ultimo anno altri due edifici sono stati collegati al contatore.

Sempre nella schermata nei millesimi di SEAS, è stata inserita la stima dei consumi elettrici annuali dovuti al raffrescamento di Palazzo A10 con un gruppo frigorifero. Per la stima delle richieste elettriche, si è usato il software TRNSYS, effettuando la simulazione dinamica dell'edificio durante i mesi estivi (SEAS non può infatti essere utilizzato per la simulazione estiva, in quanto il metodo quasi-stazionario usato nel software non è adatto per la simulazione dei flussi di energia fortemente dinamici che caratterizzano invece la stagione di raffrescamento). L'analisi relativa alla simulazione estiva è riportata nel successivo paragrafo 3.3.4.

I carichi elettrici aggiuntivi da pompa di calore in raffrescamento sono stati inseriti nella cella relativa ai "carichi elettrici annuali esterni alla zona": questo porta ad una stima inesatta delle richieste elettriche su SEAS su base mensile. Il software, infatti, ripartisce il consumo annuale riportato dall'utente su tutti i mesi, quando nel caso specifico il carico aggiuntivo si riferisce solamente ai mesi estivi. Di conseguenza, la stima delle richieste energetiche mensili non riprodurrà fedelmente il reale andamento dei consumi; su base annuale, invece, il risultato complessivo della richiesta elettrica dovrà essere confrontabile con le richieste effettive desunte dalle fatturazioni.

Dati relativi all'impianto: sistemi di emissione e regolazione

La procedura di calcolo di SEAS prevede che fino al sistema di regolazione si debbano inserire i dati relativi alla zona in esame, mentre a partire dalla distribuzione devono essere inseriti i dati relativi all'intero edificio.

Da sopralluogo si è verificata l'installazione di una potenza complessiva di 130 kW di ventilconvettori, notevolmente superiore a quella necessaria di progetto. La potenza totale dei ventilatori associata ai fancoil è 3.75 kW. Per quanto riguarda la regolazione degli ambienti, si ha una regolazione di tipo on-off per singolo ambiente, mentre per i ventilatori è prevista la tipologia "Ventilatore sempre in funzione".

Si vedano gli screenshot in Figura 26 e Figura 27.

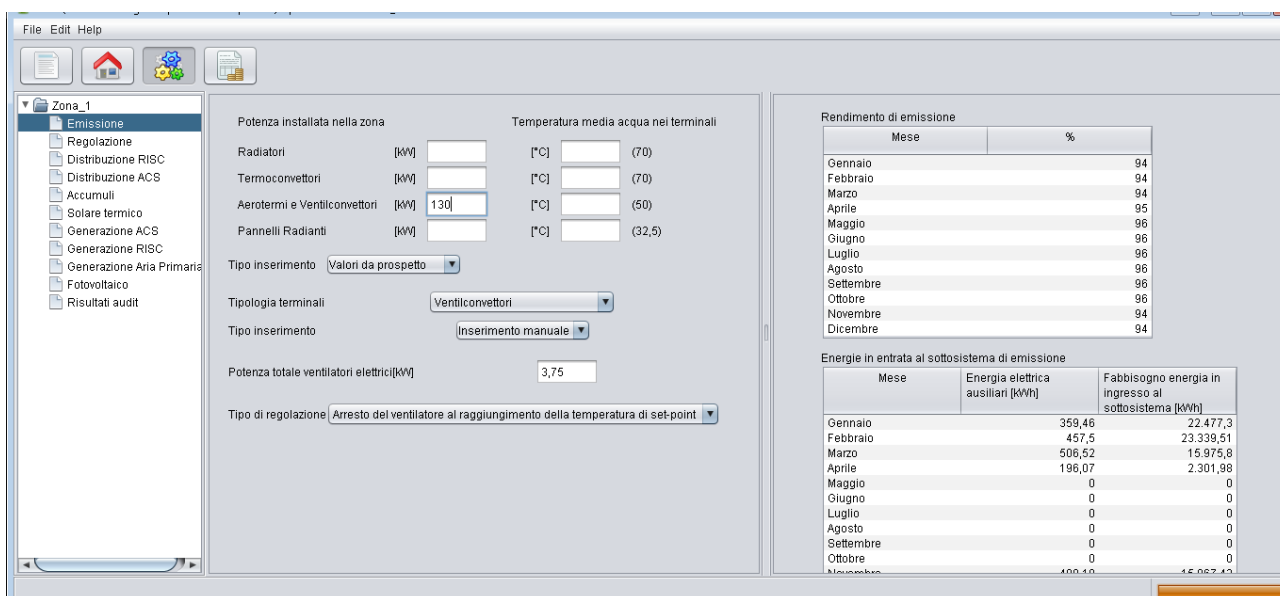


Figura 26: Sottosistema di emissione, schermata dei dati inseriti in SEAS.

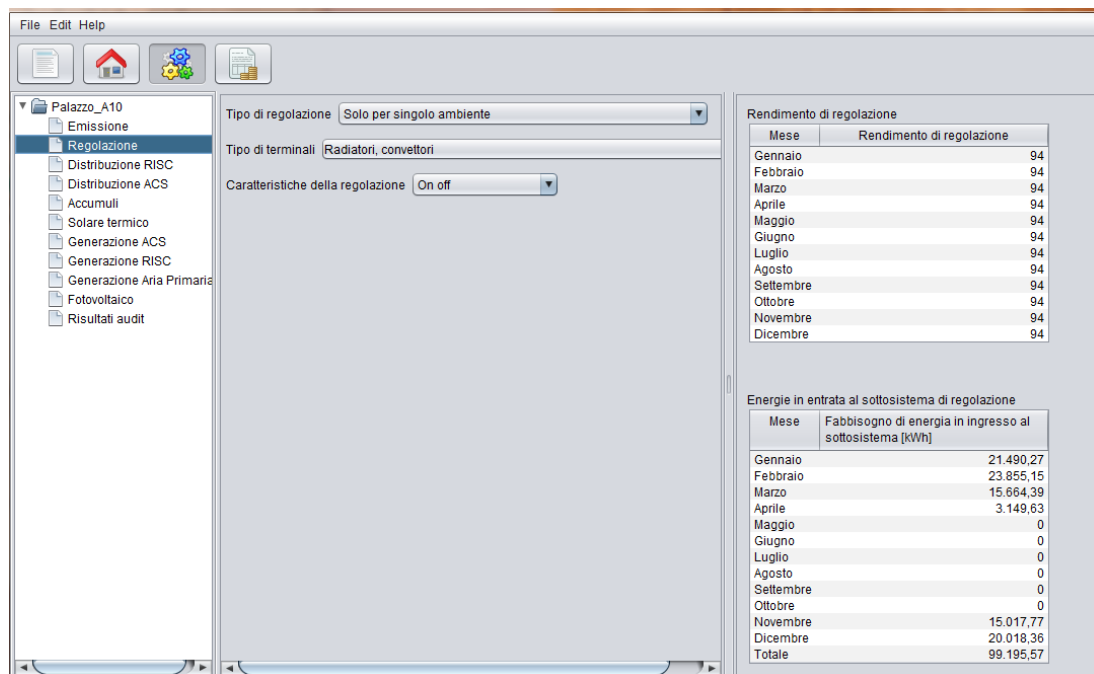


Figura 27: Sottosistema di regolazione, schermata dei dati inseriti in SEAS.

Dati relativi all’impianto: sistemi di distribuzione e generazione

Il sottosistema di distribuzione è stato modellato con la procedura analitica prevista dalla UNI TS 11300-2 [15]. Nell’edificio, infatti, le tubazioni del sottosistema di distribuzione sono incassate nella struttura opaca, non isolata, con uno strato di isolante di 2 cm intorno alla tubazione. La pompa di distribuzione ha potenza elettrica nominale di 2.2 kW e funziona a velocità fissa nel periodo di accensione dell’impianto (ha quindi funzionamento intermittente). Un breve riepilogo dei dati inseriti per quanto riguarda il sistema di distribuzione è riportato negli screenshot in Figura 28 e Figura 29.

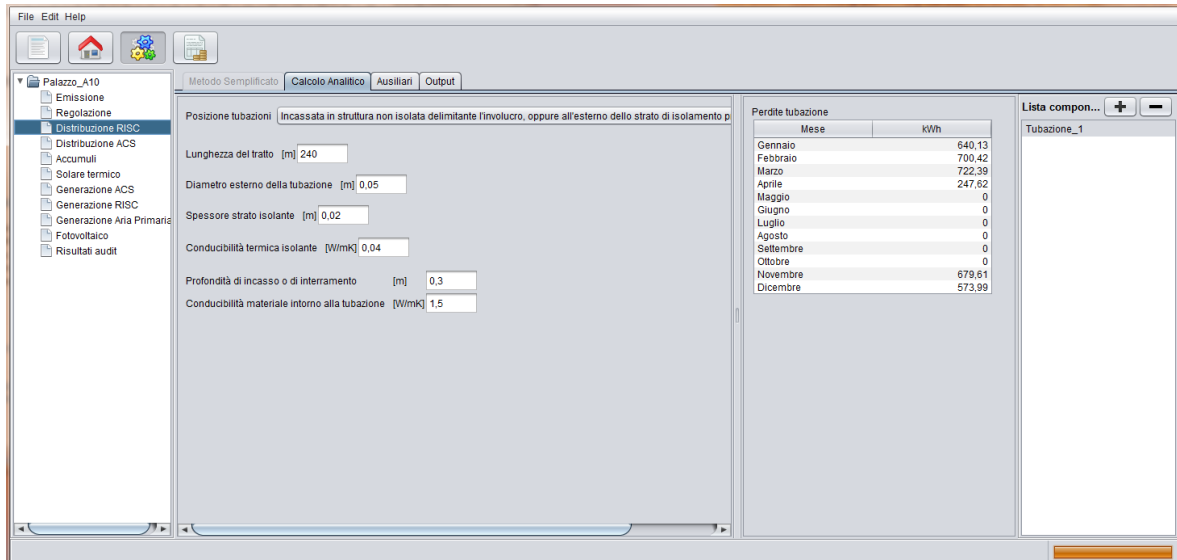


Figura 28: Sottosistema di distribuzione, schermata dei dati inseriti in SEAS.

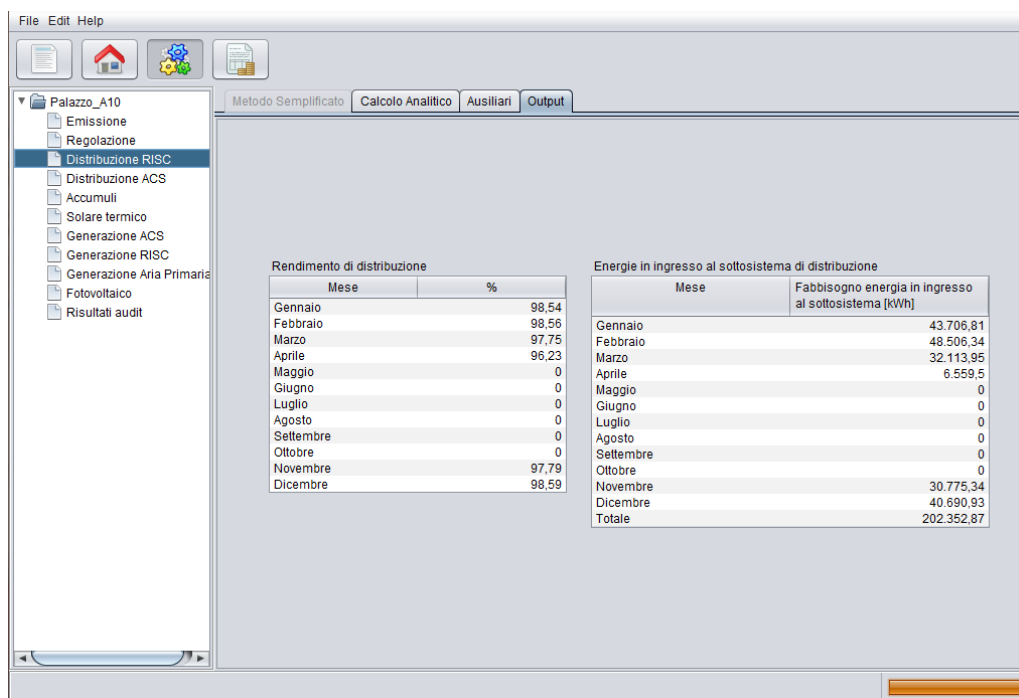


Figura 29: Sottosistema di distribuzione, schermata di risultati intermedi di SEAS.

Sono stati infine inseriti i dati relativi al sistema di generazione, che è una caldaia a gas naturale. Il modello della caldaia è UNICAL MODULEX EXT da 250 kW, con rapporto di modulazione 1:20.8 e rendimento a

potenza nominale pari a 97.8 % (con temperatura di mandata 80 °C e di ritorno a 60 °C). Poiché la caldaia è a condensazione, la scheda tecnica del generatore riporta un rendimento di 100.5 % a potenza nominale con temperatura di mandata 50 °C e di ritorno a 30 °C (si veda la Figura 30 che evidenzia le caratteristiche della caldaia, così come riportate nella scheda tecnica fornita dal costruttore). La Figura 31 riporta i dati di output forniti da SEAS riguardanti il sottosistema di generazione.

MODULEX		EXT 100	EXT 116	EXT 150	EXT 200	EXT 250	EXT 300	EXT 350
Categoria della caldaia		II _{2H3P}	II _{2H3P}	II _{2H3P}	II _{2H3P}	II _{2H3P}	II _{2H3P}	
Rapporto di modulazione		1:8,3	1:9,7	1:12,5	1:16,7	1:20,8	1:25	1:29
Portata termica nominale su P.C.I. Qn	kW	100	116	150	200	250	300	348
Portata termica minima su P.C.I. Qmin	kW	12	12	12	12	12	12	12
Potenza utile nominale (Tr 60 / Tm 80 °C) Pn	kW	97,2	112,9	146,1	195,2	244,5	294	341,7
Potenza utile minima (Tr 60 / Tm 80 °C) Pn min	kW	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Potenza utile nominale (Tr 30 / Tm 50 °C) Pcond	kW	100,1	116	150	200,4	251,3	302,7	354,6
Potenza utile minima (Tr 30 / Tm 50 °C) Pcond min	kW	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
Rendimento a potenza nominale (Tr 60 / Tm 80°C)	%	97,2	97,3	97,4	97,6	97,8	98,0	98,2
Rendimento a potenza minima (Tr 60 / Tm 80°C)	%	97,16	97,16	97,16	97,16	97,16	97,16	97,16
Rendimento a potenza nominale (Tr 30 / Tm 50°C)	%	100,1	100,0	100,0	100,2	100,5	100,9	101,9
Rendimento al potenza minima (Tr 30 / Tm 50°C)	%	106,5	106,5	106,5	106,5	106,5	106,5	106,5
Rendimento al 30% del carico (Tr 30°C)		107,3	107,3	107,3	107,3	107,3	107,3	107,3
Rendimento di combustione a carico nominale	%	97,8	97,8	97,8	97,8	98,0	98,1	98,3
Rendimento di combustione a carico ridotto	%	98,3	98,3	98,3	98,3	98,3	98,3	98,3
Perdite al mantello bruciatore funzionante (Qmin)	%	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Perdite al mantello bruciatore funzionante (Qn)	%	0,6	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
Temperatura fumi netta tf-ta (min)(*)	°C	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4
Temperatura fumi netta tf-ta (max)(*)	°C	44,2	45,1	45,1	46,5	47,3	48,2	49,1
Temperatura massima ammissibile	°C	100	100	100	100	100	100	100
Temperatura massima di funzionamento	°C	85	85	85	85	85	85	85

Figura 30: Caratteristiche della caldaia installata in Palazzo A10, dati forniti dal costruttore.

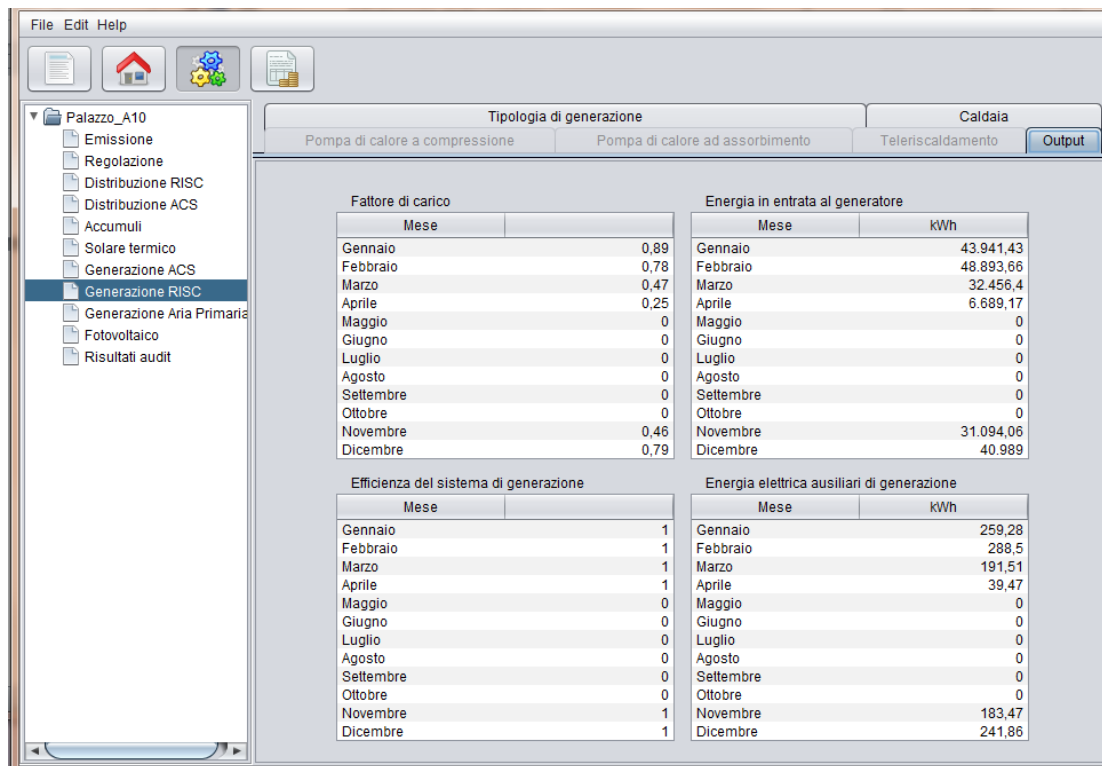


Figura 31: Sottosistema di generazione, schermata dei risultati intermedi in SEAS.

3.3 Risultati delle simulazioni dello stato di fatto

Nel seguito sono riportati i risultati delle simulazioni con il software commerciale (Paragrafo 3.3.1) e con SEAS (Paragrafo 3.3.2).

3.3.1 Risultati ottenuti secondo UNI/TS 11300 (software commerciale)

Nelle Tabelle 11-16 sono riportati in dettaglio i principali risultati ottenuti dalla simulazione per quanto riguarda i servizi di riscaldamento, raffrescamento estivo e illuminazione. Ricordiamo che all'interno della Zona_T1 non sono presenti i servizi di ventilazione e di acqua calda sanitaria. La definizione di ciascun parametro riportato nelle Tabelle 11-16 è riportato in Tabella 17.

Tabella 11: Indici di prestazione energetica ai fini NZEB della Zona_T1 nella situazione attuale.

Parametro	Descrizione	Valore	Valore	Unità di	Esito
-----------	-------------	--------	--------	----------	-------

		effettivo	limite	misura	
$EP_{H,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale	65.24	21.61	kWh/m ²	Red
$EP_{C,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva	11.20	12.46	kWh/m ²	Green
$EP_{gl,tot}$	Indice prestazione energetica globale dell'edificio, totale	142.36	80.63	kWh/m ²	Red
η_H	Efficienza per climatizzazione invernale	0.72	0.73		Red
η_C	Efficienza per climatizzazione estiva	0.75	0.84		Red
H'_t	Coefficiente globale di scambio termico DM 26/06/2015	2.96	0.80	W / (m ² K)	Red
$A_{sol,est} / A_{sup,utile}$	Frazione di area solare equivalente estiva DM 26/06/2015	0.03	0.04		Green
$\%ren$	% del Fabbisogno di Energia Primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili (punto 1, lett. b), all. 3, D.Lgs. 28/2011)	5.94	50.00	%	Red

I risultati riportati nella Tabella 11 testimoniano l'insufficiente prestazione energetica dell'attuale sistema edificio-impianto. Infatti, con la sola eccezione degli indici relativi alla prestazione dell'involucro per la climatizzazione estiva, $EP_{C,nd}$ e $A_{sol,est} / A_{sup,utile}$, tutti gli indicatori non raggiungono il valore limite richiesto. Si può infine notare come l'attuale contributo di energia primaria da fonti rinnovabili ricompra una percentuale molto modesta. Il gruppo di interventi necessari per la trasformazione di Palazzo A10 in *edificio a energia quasi zero* dovranno quindi prevedere sia interventi sull'involucro, sia sull'impianto.

Tabella 12: Servizio di riscaldamento: dispersioni, apporti e fabbisogno mensili della Zona_T1 nella situazione attuale.

Unità di misura	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	Totale
-----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--------

$Q_{H,tr}$	kWh	15523	23943	24441	21778	17372	6672	109728
$Q_{H,ve}$	kWh	4110	6348	6501	5826	4759	1884	29429
$Q_{H,ht}$	kWh	19633	30291	30942	27604	22131	8556	139157
$Q_{sol,w}$	kWh	1833	1437	1651	2137	3230	1958	12246
Q_{int}	kWh	6362	6574	6574	5938	6574	3181	35202
$Q_{H,nd,inv}$	kWh	12334	22699	23151	20031	13500	4362	96077
$Q_{H,nd}$	kWh	12334	22699	23151	20031	13500	4362	96077
Q'_H	kWh	12334	22699	23151	20031	13500	4362	96077
η_E	%	95.0 %	95.0 %	95.0 %	95.0 %	95.0 %	95.0 %	
$Q_{H,l,e}$	kWh	649	1195	1218	1054	711	230	5057
η_{Rg}	%	94.0 %	94.0 %	94.0 %	94.0 %	94.0 %	94.0 %	
$Q_{H,l,rg}$	kWh	829	1525	1556	1346	907	293	6455

Tabella 13: Servizio di riscaldamento: dispersioni, apporti e fabbisogni mensili di Palazzo A10 (impianto centralizzato) nella situazione attuale.

	Unità di misura	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	Totale
$Q_{H,d,out}$	kWh	26231	48273	49235	42598	28710	9276	204324
η_D	%	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	
$Q_{H,l,d}$	kWh	535	985	1,005	869	586	189	4170
$Q_{H,gn,out}$	kWh	26767	49258	50240	43468	29296	9465	208494
η_{Gn}	%	102.18	101.86	101.85	101.89	102.15	102.49	
$Q_{H,gn,in}$	kWh	26196	48359	49329	42661	28680	9235	204460
$Q_{H,aux,el}$	kWh	3136	4493	4550	3998	3335	1341	20852
$EP_{H,ren}$	kWh	1474	2112	2138	1879	1568	630	9801
$EP_{H,nren}$	kWh	33621	59537	60667	52591	36618	12311	255345
$EP_{H,tot}$	kWh	35094	61649	62805	54471	38186	12941	265146

Tabella 14: Servizio di raffrescamento: dispersioni, apporti e fabbisogni mensili della Zona_T1 nella situazione attuale.

	Unità di misura	GIU	LUG	AGO	SET	Totale
$Q_{C,tr}$	kWh	7411	4274	4173	2516	18374
$Q_{C,ve}$	kWh	2369	1583	1481	757	6190
$Q_{C,ht}$	kWh	9780	5857	5653	3273	24564
$Q_{sol,w}$	kWh	5418	6522	5861	1359	19159
Q_{int}	kWh	5726	6574	6574	1909	20782
$A_{sol,est}$	m ²	46	48	43	34	
$Q_{Cnd,inv}$	kWh	2067	7248	6791	393	16499
$Q_{C,nd}$	kWh	2067	7248	6791	393	16499
$Q_{C,l,e}$	kWh	42	148	139	8	337
$Q_{C,l,rg}$	kWh	135	472	442	26	1075

Tabella 15: Servizio di raffrescamento: dispersioni, apporti e fabbisogni mensili di Palazzo A10 (impianto centralizzato) nella situazione attuale.

	Unità di misura	GIU	LUG	AGO	SET	Totale
$Q_{C,l,dw}$	kWh	45	159	149	9	362
$Q_{C,gn,out}$	kWh	4533	15894	14893	862	36183
η_{mm}	%	200,87	302,33	295,25	144,24	
$Q_{C,gn,in}$	kWh	2257	5257	5044	598	13156
$Q_{C,aux,el}$	kWh	1063	1861	1801	316	5040
$EP_{C,ren}$	kWh	1560	3345	3217	429	8552
$EP_{C,nren}$	kWh	6474	13880	13348	1781	35482
$EP_{C,tot}$	kWh	8035	17225	16565	2210	44034

Tabella 16: Servizio di illuminazione: fabbisogni mensili della Zona_T1 nella situazione attuale.

	Unità di misura	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Totale
$Q_{L,int,el}$	kWh	1932	1745	1932	1870	1932	1870	1932	1932	1870	1932	1870	1932	22747
$Q_{L,el}$	kWh	1932	1745	1932	1870	1932	1870	1932	1932	1870	1932	1870	1932	22747
Ep,L,ren	kWh	908	820	908	879	908	879	908	908	879	908	879	908	10691
$Ep,L,nren$	kWh	3767	3403	3767	3646	3767	3646	3767	3767	3646	3767	3646	3767	44357
Ep,L,tot	kWh	4675	4223	4675	4525	4675	4525	4675	4675	4525	4675	4525	4675	55048

Tabella 17: Nomenclatura per le tabelle.

Simbolo	Descrizione
$Q_{H,tr}$	Scambio termico per trasmissione
$Q_{H,ve}$	Scambio termico per ventilazione
$Q_{H,ht}$	Scambio termico totale
$Q_{sol,w}$	Apporti solari su elementi vetrati
Q_{int}	Apporti interni
$Q_{H,nd,inv}$	Fabbisogno termico utile ideale dell'involucro per riscaldamento
$Q_{H,nd}$	Fabbisogno di energia termica utile ideale per riscaldamento
Q'_H	Fabbisogno ideale netto per riscaldamento
η_E	Rendimento sottosistema di emissione
$Q_{H,l,e}$	Perdite di emissione per riscaldamento
η_{Rg}	Rendimento sottosistema di regolazione
$Q_{H,l,rg}$	Perdite di regolazione per riscaldamento
$Q_{H,d,out}$	Fabbisogno di energia termica in uscita alla distribuzione
η_D	Rendimento sottosistema di distribuzione
$Q_{H,l,d}$	Perdite di distribuzione per riscaldamento
$Q_{H,gn,out}$	Fabbisogno di energia termica in uscita alla generazione
η_{Gn}	Rendimento sottosistema di generazione
$Q_{H,gn,in}$	Fabbisogno di energia in ingresso alla generazione
$Q_{H,aux,el}$	Energia elettrica per gli ausiliari
$Q_{H,el}$	Fabbisogno totale di energia elettrica per riscaldamento
$Q_{H,el,used}$	Fabbisogno di energia elettrica per riscaldamento da produzione locale

$E_{H,pdc,res}$	Energia termica estratta da PdC per riscaldamento
$EP_{H,ren}$	Energia primaria rinnovabile per riscaldamento
$EP_{H,nren}$	Energia primaria non rinnovabile per riscaldamento
$EP_{H,tot}$	Energia primaria per riscaldamento
$E_{el,pv,out}$	Energia elettrica prodotta da fotovoltaico
$EP_{pv,out}$	Energia primaria prodotta da fotovoltaico
$A_{sol,est}$	Area solare equivalente estiva
$Q_{C,nd,inv}$	Fabbisogno termico utile ideale dell'involucro per raffrescamento
$Q_{C,nd}$	Fabbisogno di energia termica utile ideale per raffrescamento
$Q_{C,l,e}$	Perdite di emissione per raffrescamento
$Q_{C,l,rg}$	Perdite di regolazione per raffrescamento
$Q_{C,l,dw}$	Perdite di distribuzione nelle tubazioni d'acqua
$Q_{C,gn,out}$	Fabbisogno di energia termica in uscita alla generazione
η_{mm}	Coefficiente medio mensile di generazione
$Q_{C,gn,in}$	Fabbisogno di energia in ingresso alla generazione
$Q_{C,aux,el}$	Energia elettrica per gli ausiliari per raffrescamento
$Q_{C,el}$	Fabbisogno totale di energia elettrica per il raffrescamento
$Q_{C,el,used}$	Fabbisogno di energia elettrica per raffrescamento da produzione locale
$EP_{C,ren}$	Energia primaria rinnovabile per raffrescamento
$EP_{C,nren}$	Energia primaria non rinnovabile per raffrescamento
$EP_{C,tot}$	Energia primaria per raffrescamento
$Q_{L,int,el}$	Fabbisogno di energia elettrica per illuminazione d'interni

$Q_{L,el}$	Fabbisogno di energia elettrica per illuminazione edificio
$Q_{L,el,used}$	Fabbisogno di energia elettrica per illuminazione da produzione locale
$EP_{L,ren}$	Energia primaria rinnovabile per illuminazione
$EP_{L,nren}$	Energia primaria non rinnovabile per illuminazione
$EP_{L,tot}$	Energia primaria per illuminazione

3.3.2 Risultati ottenuti con SEAS

Risultati dell'audit e confronto con le fatturazioni energetiche

Come risultati della diagnosi energetica, SEAS fornisce le richieste energetiche suddivise per vettore energetico. Tali valori possono essere confrontati con i dati da fatturazioni energetiche negli anni analizzati. Com'è stato detto nel paragrafo 3.1, si hanno a disposizione i consumi di gas metano dell'edificio A10, mentre per i consumi di energia elettrica si dispone delle fatturazioni di un unico contatore generale che serve palazzo A10 e altri edifici. Con una opportuna contabilizzazione dell'energia elettrica (effettuata con un contatore a defalco) si sono inseriti in SEAS solamente i relativi consumi elettrici da fatturazione energetica.

Le Tabelle 18 e 19 riportano i confronti tra risultati dell'audit e fatturazioni energetiche relative all'intero edificio A10 per i due vettori energetici. Ogni confronto è relativo all'anno in esame: in SEAS sono stati infatti inseriti i dati climatici corrispondenti per una migliore accuratezza dei risultati.

In tutti gli anni considerati, le percentuali di scarto tra le richieste energetiche da fatturazione e da audit energetico sono minori del 10% in valore assoluto. Si può quindi affermare che il modello costruito in SEAS sia validato. Nel successivo paragrafo 3.3.5, sono riportati le richieste energetiche suddivise per vettore energetico e per servizio, sia su base mensile che annuale, usando come dati climatici quelli dell'anno climatico medio (TMY) definito nella UNI 10349 [23]. Questo modello, che nel seguito sarà chiamato "Caso base", rappresenta la baseline su cui verificare l'efficacia degli interventi di riqualificazione ipotizzati, in termini energetici.

Tabella 18: Confronto tra richieste di energia elettrica da fatturazioni energetiche e da audit con SEAS.

Anno	Consumi da fatturazioni [kWh]	Consumi da audit [kWh]	Percentuale di scarto [%]
2009	48651	52938	8.8
2010	48385	53003	9.5
2011	50729	52850	4.2
2014	58071	52385	-9.7
2015	55786	52671	-5.5

Tabella 19: Confronto tra richieste di energia termica (con gas naturale) da fatturazioni energetiche e da audit con SEAS.

Anno	Consumi da fatturazioni [kWh]	Consumi da audit [kWh]	Percentuale di scarto [%]
2009	219064	230589	5.3
2010	255047	237325	-6.9
2011	208174	211469	6.4
2014	188689	173376	-8.1
2015	198926	204064	2.6

3.3.3 Confronto dei risultati di involucro con TRNSYS

Un secondo livello di validazione del modello di Palazzo A10 con SEAS è stato fatto con l'utilizzo del software TRNSYS (i cui modelli sono descritti in [24]), simulando dinamicamente il comportamento dell'edificio durante la stagione invernale. Il confronto con una simulazione dinamica consente di verificare non solo che le richieste energetiche complessive siano in linea con i reali fabbisogni, ma anche che i singoli componenti del bilancio energetico siano giusti. Si potrebbe infatti verificare il caso in cui errori sia nel

calcolo delle perdite termiche che nel calcolo degli apporti portino a risultati complessivi comunque validi e confrontabili con le fatturazioni energetiche. Con una simulazione dinamica, invece, si possono individuare i singoli elementi del bilancio termico-energetico e confrontare questi con i risultati intermedi che SEAS fornisce alla fine della sezione sull'involucro.

Palazzo A10 è stato quindi modellato anche su TRNSYS 17. In particolare:

- Le superfici opache e finestrate sono state inserite su TRNBuild, rispettando la reale stratigrafia, l'esposizione solare e le dimensioni;
- Sei diversi nodi sono stati creati relativi all'unica zona considerata in SEAS: i sei nodi differiscono per esposizione (est o ovest) e per piano (primo, secondo, terzo);
- La presenza di schermi (aggetto verticale e tetto) è stata modellata con l'apposito Type 34, che consente di stabilire il reale irraggiamento incidente sulla parete dell'edificio in base alle dimensioni degli schermi;
- La presenza di un palazzo di fronte che riduce la radiazione solare incidente è stata modellata con l'apposito Type 67 (si veda la Figura 32 come esempio per gli effetti di ombreggiamento del palazzo antistante sulla parete frontale di Palazzo A10);
- I profili di persone e utilizzo degli apparecchi di illuminazione e della apparecchiatura da ufficio è stata modellata ricreando gli stessi profili inseriti in SEAS;
- Si sono utilizzati i dati climatici forniti dal CTI, che riportano l'andamento orario della temperatura esterna, umidità relativa, irraggiamento totale su piano orizzontale e velocità del vento (reperibili, per ogni provincia italiana, al sito riportato in [25]);
- Per quanto riguarda le perdite relative ad infiltrazioni, si sono inseriti i valori tipici di ricambio orario previsti da UNI 10339 [13], in analogia a quanto riportato su SEAS;
- Per i fancoil è stato utilizzato un modello in-house che calcola l'effettivo scambio ai sistemi di emissione: da catalogo è stato calcolato il prodotto UA (prodotto tra coefficiente di scambio termico e area di scambio della batteria del fancoil); lo scambio effettivo è calcolato considerando la temperatura dell'aria in ogni nodo e la temperatura di mandata.



Figura 32: I tre piani analizzati di Palazzo A10, con gli effetti di ombreggiamento dovuti alla presenza del palazzo antistante.

La Figura 33 riporta lo schema di TRNSYS Simulation Studio che è stato utilizzato per la simulazione di Palazzo A10. Come output, TRNSYS fornisce i flussi di energia in ingresso ed in uscita per ogni quarto d'ora (time-step scelto per la simulazione).

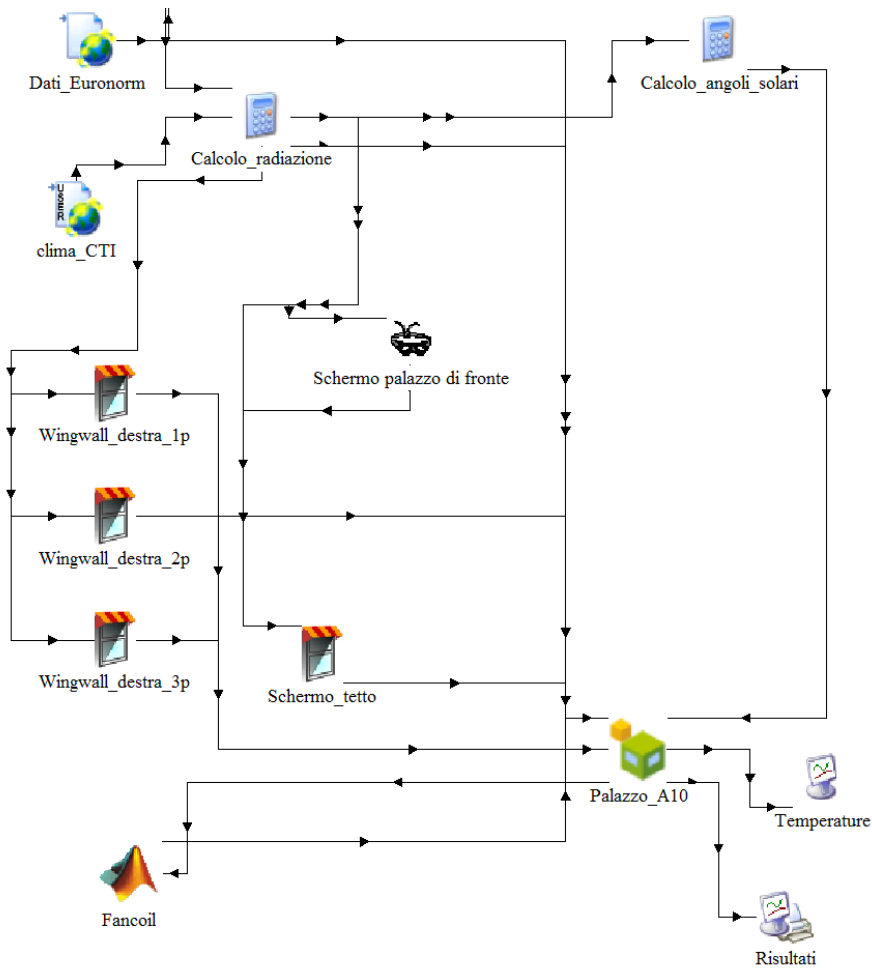


Figura 33: Rappresentazione schematica del modello TRNSYS per la simulazione dinamica di Palazzo A10.

Si sono quindi confrontati i flussi di energia in ingresso ed in uscita al sistema calcolati con TRNSYS con le perdite e gli apporti riportati da SEAS nella schermata “Risultati involucro”, con la modellazione descritta nei precedenti paragrafi per le sezioni di SEAS ma utilizzando i dati climatici del CTI, riportati su media mensile. La

Tabella 20 riporta i risultati del confronto tra TRNSYS e SEAS sulla stagione di riscaldamento.

Tabella 20: Validazione del modello SEAS di Palazzo A10 con simulazione dinamica con TRNSYS.

Elementi del bilancio [kWh]	TRNSYS	SEAS	Percentuale di scarto [%]
Apporti solari (su pareti opache e vetrate)	17786	17901	0.6
Apporti interni (persone, illuminazione, apparecchiatura elettronica e fancoil)	122194	109635	10.2
Perdite per trasmissione (pareti opache, finestre, ponti termici)	-106389	-104567	-1.7
Perdite per infiltrazioni	-29472	-30078	-2.0

I risultati evidenziano un sostanziale accordo tra i termini del bilancio di SEAS e di TRNSYS a livello di involucro, con percentuale di scarto sostanzialmente ridotta. La simulazione in SEAS può quindi essere ritenuta validata dal confronto con TRNSYS.

3.3.4 Simulazione energetica estiva con TRNSYS

Usando lo stesso modello descritto nel precedente paragrafo, è stata condotta un'altra simulazione volta a determinare i fabbisogni energetici richiesti per mantenere la zona in analisi nelle condizioni di comfort durante la stagione estiva. I dati climatici utilizzati sono quelli forniti dal CTI su base oraria [25]. La simulazione è stata condotta con time-step 15 minuti dal primo maggio al 30 settembre, imponendo una temperatura di 26 °C durante le ore diurne, con gli stessi orari previsti per il riscaldamento invernale. Per i 20 giorni centrali di agosto, inoltre, l'edificio è stato considerato non utilizzato ed il servizio di

raffrescamento spento. TRNSYS ha fornito come output il fabbisogno energetico necessario per mantenere la temperatura desiderata nella zona, complessivo sulla stagione di raffrescamento. Tale valore si riferisce alla quantità di energia necessaria in ingresso all'involucro; sono state quindi aggiunte le perdite relative ai vari sottosistemi di impianto, usando i seguenti valori di rendimento:

- Rendimento di emissione: 98%;
- Rendimento di regolazione: 94%;
- Rendimento di distribuzione: 98%.

Tali valori sono ricavati dall'applicazione della UNI TS 11300-3 [19] al caso in esame.

Il gruppo frigorifero utilizzata per il raffrescamento estivo è una RC GROUP modello EASY A, di potenza frigorifera nominale 312.3 kW, con refrigerante R407C, sei compressori e due circuiti dell'acqua. In condizioni nominali, temperatura esterna dell'aria 35 °C, temperatura dell'acqua di mandata e di ritorno rispettivamente 7 °C e 12 °C, l'EER risulta essere 3.4. Il gruppo frigo ha la capacità di modulare la potenza frigorifera variando il numero dei compressori in funzione. Purtroppo non sono disponibili valori dell'EER né al variare delle temperature delle sorgenti, né al variare del fattore di carico della macchina: gli unici dati a disposizione forniti dal costruttore sono riportati in Figura 34.

EASY.A.STD T.300.Z.6.W2		
SERIE		EASY.A.STD
MODELLO		T.300.Z.6.W2
CAPACITA' FRIGORIFERA	[kW]	312,3
COMPRESSORI	[N°]	6
Potenza impegnata	[kW]	104,1
Corrente assorbita	[A]	178,1
Massima corrente assorbita	[A]	228
Corrente di avviamento	[A]	398
VENTILATORI	[N°]	6
Portata aria	[m³/h]	117000
Temp. aria esterna	[°C]	35,0
Potenza meccanica nominale	[kW]	12,00
Massima corrente assorbita	[A]	24,00
EVAPORATORE	[N°]	1
Portata acqua	[m³/h]	53,7
Perdita di carico	[kPa]	35,7
Contenuto d'acqua	[l]	59
Massima portata acqua	[m³/h]	75,0
Temp. acqua evap. (in/out)	[°C]	12,0 / 7,0
Anticongelante	[%]	0
Fattore di sporcamento	[m² °C/kW]	0,043

Figura 34: Caratteristiche del gruppo frigorifero installato a Palazzo A10, dati forniti dal costruttore.

Il valore medio stagionale dell'EER è stato cautelativamente posto pari a 2.5, considerando un funzionamento intermittente: con questo valore si è trovata la richiesta di energia elettrica necessaria alla

pompa di calore per fornire il fabbisogno di refrigerazione richiesto. L'energia elettrica richiesta è pari a circa 950 kWh stagionali. A questo valore sono stati aggiunte le richieste elettriche necessarie per l'azionamento dei fan coil nelle stanze dei docenti, contando le ore in cui il servizio di raffrescamento risulta effettivamente acceso in ciascun nodo (primo piano lato est, secondo piano lato est, terzo piano lato est, primo piano ovest, secondo piano ovest, terzo piano ovest). Complessivamente, sommando i consumi elettrici da pompa di calore e dai ventilatori dei fan coil, ed applicando il valore dei millesimi elettrici pari a 0.499, si arriva ad un valore complessivo di energia elettrica richiesta per raffrescamento pari a 2017 kWh all'anno. Tale valore è stato inserito in SEAS nella voce "Carichi elettrici annuali esterni alla zona", in modo tale da rendere comparabili le richieste elettriche dell'edificio A10 con quelle effettive ricavabili da fatturazione. I fabbisogni energetici suddivisi mese per mese sono riportati nel successivo paragrafo 3.3.5.

3.3.5 Risultati relativi all'anno climatico tipo (CASO BASE)

Di seguito si riportano i risultati intermedi e finali dell'audit di Palazzo A10 usando i dati climatici dell'anno meteorologico tipo, da UNI 10349 [23].

Tale simulazione rappresenta il "caso base": i fabbisogni di energia sono quelli che verranno utilizzati per il confronto con le richieste a seguito di interventi di riqualificazione energetica.

In Tabella 21 si riportano i risultati intermedi di SEAS a livello di involucro, suddivisi per mese e per tipologia (si ricordi che SEAS riporta solamente i dati per il servizio di riscaldamento). In particolare, sono riportati i seguenti termini del bilancio energetico di involucro:

- $E_{in,ng}$ in kWh, carichi interni non gratuiti;
- $E_{in,per}$ in kWh, carichi interni dovuti alla presenza di persone;
- $E_{sol,op}$ in kWh, apporti solari attraverso le pareti opache;
- $E_{sol,fin}$ in kWh, apporti solari attraverso le finestre;
- E_{vent} in kWh, perdite di ventilazione naturale e infiltrazione;
- $E_{t,op}$ in kWh, perdite per trasmissione attraverso le pareti opache;
- $E_{t,fin}$ in kWh, perdite per trasmissione attraverso le finestre;
- E_{pt} in kWh, perdite attraverso i ponti termici;

- E_{risc} , in kWh, fabbisogno netto di riscaldamento.

Tabella 21: Risultati intermedi, in termini di apporti e perdite, a livello di involucro di Palazzo A10, per la stagione di riscaldamento.

	$E_{in,ng}$	E_{per}	$E_{sol,op}$	$E_{sol,fin}$	E_{vent}	$E_{t,op}$	$E_{t,fin}$	E_{pt}	E_{risc}
Gen	1070	725	1023	521	-5694	-13763	-5577	-229	-20993
Feb	1873	1115	2063	1380	-7029	-17014	-6893	-283	-23147
Mar	2017	1254	3339	2226	-6153	-15079	-6109	-247	-16823
Apr	702	446	1880	1258	-1401	-3574	-1449	-56	-1795
Mag	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Giu	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lug	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Set	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ott	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	1970	1207	1608	1055	-4904	-12168	-4932	-197	-14977
Dic	794	586	949	599	-4878	-11911	-4826	-196	-18069
TOT	8426	5333	10862	7039	-30059	-73508	-29787	-1208	-95804

SEAS riporta infine i fabbisogni energetici suddivisi per vettore e servizio. Le Tabella 22 e Tabella 23 si riferiscono, rispettivamente, ai fabbisogni richiesti per il servizio di riscaldamento, per illuminazione e carichi elettrici e consumi energetici totali della Zona_T1.

Tabella 22: Fabbisogno per il servizio di riscaldamento per la Zona_T1, suddivisi per vettore energetico.

	Fabbisogno di energia elettrica per servizio di riscaldamento [kWh]	Fabbisogno di gas naturale per servizio di riscaldamento [kWh]
Gen	592	24150
Feb	713	26626
Mar	693	19458
Apr	216	2140
Mag	0	0
Giu	0	0
Lug	0	0
Ago	0	0
Set	0	0
Ott	0	0
Nov	656	17341
Dic	576	20798
TOT	3447	110513

Tabella 23: Fabbisogni di energia elettrica per la Zona_T1, suddivisi per servizi di illuminazione e altri carichi.

	Fabbisogno di energia elettrica per illuminazione [kWh]	Fabbisogno di energia elettrica per altri carichi [kWh]
Gen	854	733
Feb	1086	886
Mar	1224	900
Apr	1022	827
Mag	1224	900
Giu	1178	896
Lug	1224	900
Ago	305	367
Set	1178	896
Ott	1224	900
Nov	1178	896
Dic	559	567
TOT	12253	9666

Dai risultati della simulazione in TRNSYS è poi possibile ricavare i fabbisogni energetici per il servizio di raffrescamento estivo, limitatamente ai mesi di giugno, luglio, agosto e settembre.

Tali consumi, che comprendono le richieste di energia elettrica per l'azionamento dei ventilatori dei fancoil e quelle per il funzionamento del gruppo frigorifero, sono riportati in Tabella 24. Come specificato nel

paragrafo 3.3.2, i fabbisogni energetici per il mese di agosto risultano bassi per effetto dello spegnimento dell'impianto di raffrescamento durante i 20 giorni centrali del mese.

Tabella 24: Fabbisogni di energia elettrica per raffrescamento per la Zona_T1.

Fabbisogno di energia elettrica per raffrescamento [kWh]	
Giugno	244
Luglio	267
Agosto	215
Settembre	283
TOT	1009

Le Tabelle 25 e 26 riportano i consumi energetici complessivi per tutti i mesi, rispettivamente per servizio e per vettore energetico.

Tabella 25: Fabbisogni energetici, suddivisi per servizio e vettore, relativi alla Zona_T1.

	Fabbisogno di energia elettrica per illuminazione e carichi elettrici [kWh]	Fabbisogno di energia elettrica per riscaldamento [kWh]	Fabbisogno di gas naturale per riscaldamento [kWh]	Fabbisogno di energia elettrica per raffrescamento [kWh]
Gen	1587	592	24150	0
Feb	1972	713	26626	0
Mar	2124	693	19458	0
Apr	1848	216	2140	0
Mag	2124	0	0	0
Giu	2073	0	0	244
Lug	2124	0	0	267
Ago	672	0	0	215
Set	2073	0	0	283
Ott	2124	0	0	0
Nov	2073	656	17341	0
Dic	1126	576	20798	0
TOT	21919	3447	110513	1009

Tabella 26: Fabbisogni, suddivisi per vettore energetico, per la Zona_T1.

	Fabbisogno di energia elettrica [kWh]	Fabbisogno di gas naturale [kWh]
Gen	2179	24150
Feb	2685	26626
Mar	2817	19458
Apr	2064	2140
Mag	2124	0
Giu	2317	0
Lug	2391	0
Ago	887	0
Set	2356	0
Ott	2124	0
Nov	2729	17341
Dic	1702	20798
TOT	26378	110513

Infine, per completezza, l'ultima tabella (Tabella 27) riporta i consumi energetici relativi all'intero edificio.

Tabella 27: Fabbisogni, suddivisi per vettore energetico, per Palazzo A10.

	Fabbisogno di energia elettrica [kWh]	Fabbisogno di gas naturale [kWh]
Gen	4367	48397
Feb	5381	53359
Mar	5645	38994
Apr	4136	4289
Mag	4257	0
Giu	4643	0
Lug	4792	0
Ago	1778	0
Set	4721	0
Ott	4257	0
Nov	5469	34752
Dic	3411	41679
TOT	52856	221469

4 Analisi degli interventi di retrofit

4.1 Definizione degli interventi di retrofit

La seconda fase della ricerca prevede la scelta degli interventi di retrofit da simulare nel caso studio proposto. Nel caso in questione, si sono definiti due livelli di analisi:

- Il primo livello di analisi prevede l'individuazione di quegli interventi che portano l'edificio a NZEB in accordo alla legislazione italiana;
- Il secondo livello di analisi serve alla scelta di quegli interventi che riducono significativamente l'energia (termica ed elettrica) richiesta dall'edificio, ma in un'ottica di ottimizzazione costi-benefici.

In generale, gli interventi scelti per il miglioramento energetico nell'ottica costi-benefici non saranno necessariamente quelli utilizzati per portare a NZEB l'edificio.

Per entrambi questi approcci, si è proceduto considerando gli interventi incrementalmente, di modo da valutare il miglioramento energetico dovuto al singolo intervento, l'influenza di questo nel raggiungimento dell'obiettivo preposto (NZEB nel primo caso, ottimo costi-benefici nel secondo caso) e gli effetti sinergici dovuti all'applicazione di più interventi. Nel caso di analisi per NZEB, in particolare, si può notare come l'aggiunta di interventi a partire da un primo intervento base (autonomia della Zona_T1, che acquista così valenza di "edificio") porta man mano al soddisfacimento dei vari indicatori utilizzati. Si può quindi anche verificare su quali indicatori i vari interventi siano più influenti.

4.2 Interventi finalizzati all'NZEB: descrizione e risultati

Nell'analisi degli interventi necessari per il soddisfacimento dei requisiti *edifici a energia quasi zero* [6], sono stati valutati gli effetti incrementali di quattro differenti possibili misure di efficientamento energetico, analizzandone l'impatto sul soddisfacimento dei singoli requisiti NZEB.

Per tutti gli interventi descritti in seguito, si suppone che la zona termica Zona_T1 venga resa autonoma per tutti i servizi energetici. Tale intervento preliminare, denominato *Intervento NZEB_0*, consiste nell'installazione di un nuovo sottosistema di generazione costituito da una pompa di calore aria-acqua reversibile per riscaldamento e raffrescamento, una caldaia di integrazione a condensazione e un sistema fotovoltaico. Le caratteristiche di ciascun generatore sono riportate in dettaglio nel paragrafo 4.2.1.

In base a quanto definito all'Art. 2 del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, a seguito dell'intervento NZEB_0, la Zona_T1 può quindi essere classificata come "edificio", in quanto risulta utilizzata come unità immobiliare a sé stante a seguito di una ristrutturazione.

4.2.1 Intervento NZEB_0. Installazione del nuovo sottosistema di generazione.

Il nuovo sottosistema di generazione è costituito da una pompa di calore reversibile aria-acqua (si veda Tabella 28) e da una caldaia di integrazione invernale (si veda Tabella 29). Inoltre, è prevista l'installazione di un sistema fotovoltaico sulla falda EST del tetto, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 30. Sulla motivazione di tale scelta, si veda il successivo paragrafo 4.2.12.

Tabella 28: Caratteristiche della pompa di calore aria-acqua utilizzata per l'intervento NZEB_0. I parametri si riferiscono alla metodologia di valutazione delle prestazioni presente nella normativa UNI/TS 11300-4:2014 [26].

Parametro	Valore
Potenza nominale di riscaldamento ^a	51.40 kW
Potenza nominale di raffrescamento ^b	43.70 kW
Coefficiente di prestazione nominale invernale ^a	3.54
Coefficiente di prestazione nominale estivo	2.95
Temperatura di switch invernale tra pompa di calore e sistema di integrazione	5 °C
Temperatura massima di cut-off / temperatura di spegnimento della pompa di calore	20 °C
Temperatura di mandata all'impianto	55 °C

^a Acqua scambiatore caldo lato utenza (in/out) 40°C/45°C; aria scambiatore lato sorgente (in) 7°C - U.R. 87%.

^b Acqua scambiatore freddo lato utenza (in/out) 12/7 °C; aria scambiatore lato sorgente (in) 35 °C

Le taglie della pompa di calore e della caldaia di integrazione sono state scelte a partire dal calcolo del carico termico invernale di progetto della Zona_T1, secondo la metodologia descritta nella normativa UNI

EN 12831:2006 [18]. Come anticipato nel paragrafo 3.2, quest'analisi ha evidenziato un sovradimensionamento dei terminali di impianto attualmente installati (circa 130 kW) rispetto al reale fabbisogno (circa 70 kW). Nell'ottica di adottare criteri di buona progettazione e in previsione dell'aumento del livello di coibentazione dell'edificio nei successivi interventi, si è scelto di utilizzare una caldaia a condensazione di circa 25 kW, una pompa di calore con una potenza nominale di circa 50 kW per riscaldamento e 56 kW per raffrescamento. Il dimensionamento e la relativa temperatura di switch invernale tra i due generatori verranno ottimizzati successivamente nell'intervento NZEB_4.

Insieme ai nuovi generatori, viene installata un sistema di regolazione climatica che si affianca all'attuale regolazione di ambiente ON/OFF.

Tabella 29: Caratteristiche della caldaia di integrazione utilizzata per l'intervento NZEB_0. I parametri si riferiscono alla metodologia di valutazione delle prestazioni presente nell'Appendice B.2 della normativa UNI/TS 11300-2:2014.

Parametro	Valore
Potenza termica utile nominale	24.60 kW
Potenza termica utile a carico intermedio	4.80 kW
Rendimento utile al 100% di potenza	101.00 %
Rendimento utile al 30% di potenza	108.30 %
Potenza elettrica ausiliari (a carico nominale)	120.00 W
Potenza elettrica ausiliari (a carico intermedio)	36.00 W
Potenza elettrica ausiliari (a carico nullo)	18.00 W

La taglia del sistema fotovoltaico e la corrispondente superficie è stata valutata sulla base di tre elementi: l'effettiva disponibilità di superficie sulla copertura EST di Palazzo A10 (circa 175 m²), un fattore di potenza pari a 0.15 kW/m² (silicio monocristallino) e gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti (Dlgs 28/2011, Allegato 3, paragrafo 3). La risultante taglia minima

richiesta per il sistema fotovoltaico, al netto della potenza elettrica installata della pompa di calore, è di circa 15 kW. Nel paragrafo 4.2.9 verrà individuata la taglia necessaria al soddisfacimento dei requisiti NZEB.

Tabella 30: Caratteristiche dell’impianto fotovoltaico utilizzato nell’intervento NZEB_0. I parametri si riferiscono alla metodologia di valutazione delle prestazioni presente nella normativa UNI/TS 11300-4:2014 [26].

Parametro	Valore
Potenza nominale (condizioni STC ^a)	15 kW
Inclinazione	25 °
Orientamento (angolo azimutale)	-90 (EST)
Superficie di captazione al netto del telaio	100 m ²
Fattore di efficienza	0.7 (Moduli non ventilati)
Fattore di potenza	0.15 kW/m ² (Silicio monocristallino)

^a Standard Test Condition: Temperatura cella: 25 °C, irraggiamento: 1000 W/m², indice di massa d’aria: 1,5.

4.2.2 Risultati dell’intervento NZEB_0

Nella Tabella 31 sono riassunti i principali indici di prestazione energetica della Zona_T1 a seguito dell’intervento NZEB_0. La sostituzione dei sottosistemi di generazione e regolazione, insieme all’installazione dell’impianto fotovoltaico, ha comportato il soddisfacimento dei requisiti NZEB relativi all’impianto. Tuttavia gli altri indicatori indicano la necessità di un efficientamento dell’involucro al fine di ridurre il fabbisogno energetico di riscaldamento e il coefficiente globale di scambio H'_T .

Tabella 31: Indici di prestazione energetica ai fini NZEB della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_0.

Parametro	Descrizione	Valore effettivo	Valore limite	Unità di misura	Esito
$EP_{H,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale	65.24	21.61	kWh/m ²	Red
$EP_{C,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva	11.20	12.46	kWh/m ²	Green
$EP_{gl,tot}$	Indice prestazione energetica globale dell'edificio, totale	163.68	83.48	kWh/m ²	Red
η_H	Efficienza per climatizzazione invernale	0.52	0.49		Green
η_C	Efficienza per climatizzazione estiva	1.29	1.13		Green
H'_t	Coefficiente globale di scambio termico DM 26/06/2015	1.48	0.80	W/(m ² K)	Red
$A_{sol,est}/A_{sup,utile}$	Frazione di area solare equivalente estiva DM 26/06/2015	0.03	0.04		Green
$\%ren$	% del Fabbisogno di Energia Primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili (punto 1, lett. b), all. 3, D.Lgs. 28/2011)	44.08	50.00	%	Red

L'intervento NZEB_0 non risulta quindi sufficiente per la trasformazione della Zona_T1 in edificio ad energia quasi zero.

4.2.3 Intervento NZEB_1. Coibentazione delle strutture opache e posizionamento di una barriera al vapore.

Questo primo intervento a livello ha l'obiettivo di ridurre il fabbisogno energetico di riscaldamento e il coefficiente globale di scambio H'_T . Non essendo possibile intervenire sulla facciata esterna di Palazzo A10

(l'edificio è protetto dalla Soprintendenza in quanto palazzo storico, si veda Paragrafo 3.1), si è scelto di applicare dei pannelli isolanti sul lato interno delle pareti disperdenti (cappotto interno). L'applicazione di una barriera al vapore si è resa necessaria per evitare fenomeni di condensa interstiziale dovuta al posizionamento dell'isolante.

Le caratteristiche geometriche e termofisiche dei materiali utilizzati sono riportati in Tabella 32.

Tabella 32: Proprietà geometriche e termo-igrometriche dei materiali utilizzati nell'intervento NZEB_1.

Parametro	Spessore [mm]	Densità [kg / m ³]	Conducibilità termica [W / (m K)]	Calore specifico [kJ / (kg K)]	Permeabilità al vapore [kg/(s m Pa)]
Pannello isolante in polistirene	50	30	0.04	1.22	2×10^{-12}
Fogli di materiale sintetico	1	1110	0.23	0.90	1×10^{-15}

4.2.4 Risultati dell'intervento NZEB_1

Nella Tabella 33 sono riassunti i principali indici di prestazione energetica della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_1. L'isolamento delle strutture opache ha ridotto sufficientemente il valore del coefficiente globale di scambio H'_{T} , mentre gli altri indici non soddisfano i requisiti. Al contrario, si può notare come la riduzione del fabbisogno di riscaldamento abbia peggiorato l'efficienza per la climatizzazione invernale, η_H , che non raggiunge più il valore minimo richiesto. Questo risultato si deve al minore fattore di carico della pompa di calore, la quale risulta sovradimensionata a seguito della coibentazione dell'edificio.

Anche l'indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva non rispetta più il valore richiesto. Infatti, a parità di condizioni, il maggiore isolamento riduce la dispersione dei carichi interni verso l'esterno.

L'intervento NZEB_1 non risulta quindi idoneo per la trasformazione della Zona_T1 in edificio ad energia quasi zero.

Tabella 33: Indici di prestazione energetica ai fini NZEB della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_1.

Parametro	Descrizione	Valore effettivo	Valore limite	Unità di misura	Esito
$EP_{H,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale	32.05	21.68	kWh/m ²	Red
$EP_{C,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva	14.71	12.29	kWh/m ²	
$EP_{gl,tot}$	Indice prestazione energetica globale dell'edificio, totale	108.21	82.85	kWh/m ²	
η_H	Efficienza per climatizzazione invernale	0.47	0.49		Green
η_C	Efficienza per climatizzazione estiva	1.44	1.13		
H'_t	Coefficiente globale di scambio termico DM 26/06/2015	0.78	0.80	W / (m ² K)	
$A_{sol,est} / A_{sup,utile}$	Frazione di area solare equivalente estiva DM 26/06/2015	0.03	0.04		
$\%ren$	% del Fabbisogno di Energia Primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili (punto 1, lett. b), all. 3, D.Lgs. 28/2011)	45.41	50.00	%	Red

4.2.5 Intervento NZEB_2. Ulteriore coibentazione delle strutture opache, posizionamento di una barriera al vapore, modifica di alcune finestre tramite l'installazione di un ulteriore infisso interno (controfinestra).

Questo secondo intervento ha l'obiettivo di ridurre ulteriormente il fabbisogno energetico di riscaldamento e il coefficiente globale di scambio H'_t rispetto all'intervento NZEB_1. Come detto in precedenza (paragrafo 3.1), non essendo possibile intervenire sulla facciata esterna di Palazzo A10 (edificio vincolato), si è scelto di applicare dei pannelli isolanti sul lato interno delle pareti disperdenti (cappotto interno). L'applicazione di

una barriera al vapore si è resa necessaria per evitare fenomeni di condensa interstiziale dovuta al posizionamento dell'isolante. Inoltre, lo spessore del pannello isolante interno è stato portato a 12 cm.

Le caratteristiche geometriche e termofisiche dei materiali utilizzati per l'isolamento delle strutture opache sono riportati in Tabella 34. Per quanto riguarda gli infissi, si è ipotizzata l'installazione di una doppia finestra (o controfinestra) sul lato interno, per non modificare l'infisso già esistente, di importanza storica. Come controfinestra si è scelta un infisso a doppio vetro con telaio in PVC (effetto legno). L'intervento si applica a tutti gli infissi ad eccezione di OE, ON giardino, ON corte e Fcorte (si veda la Tabella 35).

Tabella 34: Proprietà geometriche e termo-igrometriche dei materiali utilizzati nell'intervento NZEB_2.

Parametro	Spessore [mm]	Densità [kg / m ³]	Conducibilità termica [W / (m K)]	Calore specifico [kJ / (kg K)]	Permeabilità al vapore [kg/(s m Pa)]
Pannello isolante in polistirene	120	30	0.04	1.22	2 x 10 ⁻¹²
Fogli di materiale sintetico	1	1110	0.23	0.9	1 x 10 ⁻¹⁵

Tabella 35: Caratteristiche principali dei componenti trasparenti a seguito dell'intervento NZEB_2.

Codice	Numero componenti identici	Area (incluso telaio) [m ²]	tot % superficie vetrata	Trasmittanza (incluso telaio) [W / (m ² K)]	Esposizione	Trasmittanza solare verso l'interno ^a	Fattore di ombreggiatura ^b	Fattore di rimozione dovuto a tendaggi
J	22	3.1	54%	1.67	O	0.75	0.24	0.95
IE	3	2.3	53%	1.59	E	0.75	0.99	0
IN	1	2.3	53%	1.60	N	0.75	0.80	0
L1p1	7	3.1	60%	1.73	E	0.75	1	0
M1P	1	3.0	67%	1.78	E	0.75	1	0.45
A1pE	2	3.8	54%	1.68	E	0.75	0.42	0
A1pN	3	3.8	54%	1.68	N	0.75	0.85	0
B1P	3	2.4	60%	1.73	E	0.75	1	0
E1p	4	1.8	43%	1.57	N	0.75	0.25	0
R3Pn	4	1.8	49%	1.63	N	0.75	0.25	0
R3PE	4	1.8	49%	1.63	E	0.75	1	0.95
P2P	4	2.3	57%	1.69	N	0.75	0.24	0
U3P	11	2.2	52%	1.72	E	0.75	0.70	0.95

^a Prospetto B.5, Appendice B – UNI/TS 11300-1:2014.

^b Appendice D - UNI/TS 11300-1:2014.

4.2.6 Risultati dell'intervento NZEB_2

Nella Tabella 36 sono riassunti i principali indici di prestazione energetica della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_2. L'elevato isolamento delle strutture opache ha ridotto sufficientemente il valore del coefficiente globale di scambio $H'T$ e dell'indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale $EP_{H,nd}$.

Tuttavia, a seguito dell'intervento NZEB_2, si è ulteriormente ridotto l'indice di efficienza per la climatizzazione invernale, η_H , a causa del sempre maggiore sovradimensionamento dei generatori rispetto al ridotto fabbisogno dell'edificio.

Anche l'indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva si è ulteriormente allontanato dal valore richiesto. Infatti, a parità di condizioni, il maggiore isolamento riduce la dispersione dei carichi interni verso l'esterno.

L'intervento NZEB_2 non risulta quindi sufficiente per la trasformazione della Zona_T1 in edificio ad energia quasi zero, richiedendo ulteriori interventi per quanto concerne le prestazioni estive e dell'impianto.

Tabella 36: Indici di prestazione energetica ai fini NZEB della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_2.

Parametro	Descrizione	Valore effettivo	Valore limite	Unità di misura	Esito
$EP_{H,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale	20.34	21.72	kWh/m ²	Red
$EP_{C,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva	17.35	12.16	kWh/m ²	
$EP_{gl,tot}$	Indice prestazione energetica globale dell'edificio, totale	92.88	82.77	kWh/m ²	
η_H	Efficienza per climatizzazione invernale	0.40	0.50		
η_c	Efficienza per climatizzazione estiva	1.46	1.13		Green
H'_t	Coefficiente globale di scambio termico DM 26/06/2015	0.52	0.80	W / (m ² K)	
$A_{sol,est} / A_{sup,utile}$	Frazione di area solare equivalente estiva DM 26/06/2015	0.02	0.04		
$\%ren$	% del Fabbisogno di Energia Primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili (punto 1, lett. b), all. 3, D.Lgs. 28/2011)	41.13	50.00	%	

4.2.7 Intervento NZEB_3. Intervento NZEB_2 e installazione di tendaggi alla veneziana di colore bianco interni per la riduzione degli apporti solari.

Questo terzo intervento, incrementale rispetto all'*intervento NZEB_2*, ha l'obiettivo di ridurre l'indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva. Nell'ottica di individuare una soluzione con un basso rapporto costi-benefici, si è deciso di analizzare l'effetto della riduzione degli apporti solari attraverso i componenti finestrati. Si sono quindi installati dei tendaggi alla veneziana per la schermatura delle finestre. L'*intervento NZEB_3* non si applica per gli infissi orientati a nord. In Tabella 37 sono riportati le caratteristiche delle finestre su cui è stato ipotizzato l'intervento.

Tabella 37: Caratteristiche principali dei componenti trasparenti utilizzati nell'intervento NZEB_3.

Cod.	Numero componenti identici	Area tot (incluso telaio) [m ²]	% superficie vetrata	Trasmittanza (incluso telaio) [W / (m ² K)]	Esposizione	Trasmittanza solare verso l'interno ^a	Fattore di ombreggiatura ^b	Fattore di rimozione dovuto a tendaggi
J	22	3.06	54%	1.67	O	0.75	0.24	0.25
IE	3	2.28	53%	1.59	E	0.75	0.99	0.25
L1p1	7	3.05	60%	1.73	E	0.75	1	0.25
M1P	1	2.95	67%	1.78	E	0.75	1	0.25
A1pE	2	3.84	54%	1.68	E	0.75	0.42	0.25
B1P	3	2.45	60%	1.73	E	0.75	1	0.25
R3PE	4	1.82	49%	1.63	E	0.75	1	0.25
P2P	4	2.34	57%	1.72	E	0.75	0.70	0.25
U3P	11	2.23	52%	1.66	O	0.75	0.70	0.25

^a Prospetto B.5, Appendice B – UNI/TS 11300-1:2014.

^b Appendice D - UNI/TS 11300-1:2014.

4.2.8 Risultati dell'intervento NZEB_3

Nella Tabella 38 sono riassunti i principali indici di prestazione energetica della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_3. L'installazione dei tendaggi alla veneziana per la schermatura delle finestre ha ridotto sufficientemente il valore dell'indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva $EP_{C,nd}$. L'involucro soddisfa tutti i requisiti richiesti per la classificazione NZEB.

Si può comunque notare che l'indice di efficienza per la climatizzazione invernale, η_H , e l'indice prestazione energetica globale dell'edificio, $EP_{gl,tot}$, continuano a non rispettare i limiti richiesti.

L'intervento NZEB_3 non risulta quindi sufficiente per la trasformazione della Zona_T1 in edificio ad energia quasi zero, richiedendo ulteriori interventi per incrementare le prestazioni dell'impianto.

Tabella 38: Indici di prestazione energetica ai fini NZEB della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_3.

Parametro	Descrizione	Valore effettivo	Valore limite	Unità di misura	Esito
$EP_{H,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale	21.47	21.72	kWh/m ²	Green
$EP_{C,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva	12.06	12.16	kWh/m ²	
$EP_{gl,tot}$	Indice prestazione energetica globale dell'edificio, totale	90.82	82.77	kWh/m ²	Red
η_H	Efficienza per climatizzazione invernale	0.41	0.50		
η_c	Efficienza per climatizzazione estiva	1.40	1.13		Green
H'_t	Coefficiente globale di scambio termico DM 26/06/2015	0.52	0.80	W / (m ² K)	
$A_{sol,est} / A_{sup,utile}$	Frazione di area solare equivalente estiva DM 26/06/2015	0.01	0.04		Red
%ren	% del Fabbisogno di Energia Primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili (punto 1, lett. b), all. 3, D.Lgs. 28/2011)	42.23	50.00	%	

4.2.9 Intervento NZEB_4. Tutti gli interventi NZEB_3 ed ottimizzazione del dimensionamento e della temperatura di switch invernale della pompa di calore e della superficie dell'sistema fotovoltaico.

Il quarto intervento, incrementale rispetto all'intervento NZEB_3, ha l'obiettivo di aumentare le prestazioni dell'impianto, andando a soddisfare tutti i requisiti NZEB per la Zona_T1. Nello specifico, verranno individuati la taglia della pompa di calore, la temperatura di switch invernale tra la pompa di calore e la caldaia di integrazione e la superficie dei pannelli fotovoltaici.

Come descritto nel paragrafo 4.2.1, la taglia di riferimento della pompa di calore è stata decisa sulla base del carico invernale di progetto della Zona_T1 (UNI EN 12831:2006 [18]). Questa valutazione aveva portato alla scelta di una pompa di calore di circa 50 kW e una caldaia di integrazione di circa 25 kW. Tuttavia, a seguito dell'intervento NZEB_3, il ridotto fabbisogno di riscaldamento della Zona_T1 rende necessaria una rivalutazione della taglia dei componenti di impianto, al fine di massimizzare le prestazioni del sottosistema di generazione evitando penalizzazioni dovuti al sovradimensionamento della pompa di calore.

A seguito dell'efficientamento dell'edificio, il nuovo carico termico di progetto della Zona_T1 è di circa 32 kW. Considerando la necessità di mantenere comunque una caldaia di integrazione e cercando di garantire un funzionamento quanto più possibile regolare della pompa di calore, la nuova taglia è stata decisa in base al carico medio mensile del mese di gennaio, pari a circa 13 kW. La corrispondente potenza di riferimento estiva è di circa 11 kW.

Le caratteristiche della pompa di calore aria-acqua utilizzata nell'intervento NZEB_4 sono riportate nella Tabella 39. La caldaia di integrazione utilizzata rimane quella prevista dall'intervento NZEB_0 (si veda Tabella 29). I valori testati/simulati per la temperatura di switch invernale sono 0, 2, 4, 8 e 10 °C, quelli della superficie del sistema fotovoltaico sono 100, 200, 300, 400 e 500 m².

Tabella 39: Caratteristiche della pompa di calore aria-acqua nell'intervento NZEB_4. I parametri si riferiscono alla metodologia di valutazione nelle prestazioni presente nella normativa UNI TS 11300-4 [26].

Parametro	Valore
Potenza nominale di riscaldamento ^a	12.85 kW
Potenza nominale di raffrescamento ^b	10.93 kW
Coefficiente di prestazione nominale in modalità riscaldamento ^a	3.54
Coefficiente di prestazione nominale in modalità raffrescamento ^b	2.95
Temperatura di switch invernale tra pompa di calore e sistema di integrazione	Parametro obiettivo (vedi paragrafo 4.2.10)
Temperatura massima di cut-off / temperatura di spegnimento della pompa di calore in modalità riscaldamento	20 °C
Temperatura di mandata all'impianto di riscaldamento	55 °C
Temperatura di mandata all'impianto di raffrescamento	7 °C

^a Acqua scambiatore caldo lato utenza (in/out) 40°C/45°C; Aria scambiatore lato sorgente (in) 7°C - U.R. 87%.

^b Acqua scambiatore freddo lato utenza (in/out) 12/7 °C; aria scambiatore lato sorgente (in) 35 °C

4.2.10 Risultati dell'intervento NZEB_4

Nelle Figure 35-38 sono riportate le analisi di sensitività di quattro indicatori NZEB (indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale, efficienza per climatizzazione invernale, efficienza per climatizzazione estiva e percentuale di fabbisogno di energia primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili), relativi all'impianto in funzione della temperatura di switch invernale tra la pompa di calore e la caldaia di integrazione e la superficie totale dei pannelli fotovoltaici. Come si può vedere, la superficie minima di pannelli fotovoltaici necessaria a soddisfare tutti i requisiti è pari a 400 m², utilizzando una temperatura di switch invernale pari a 8 °C.

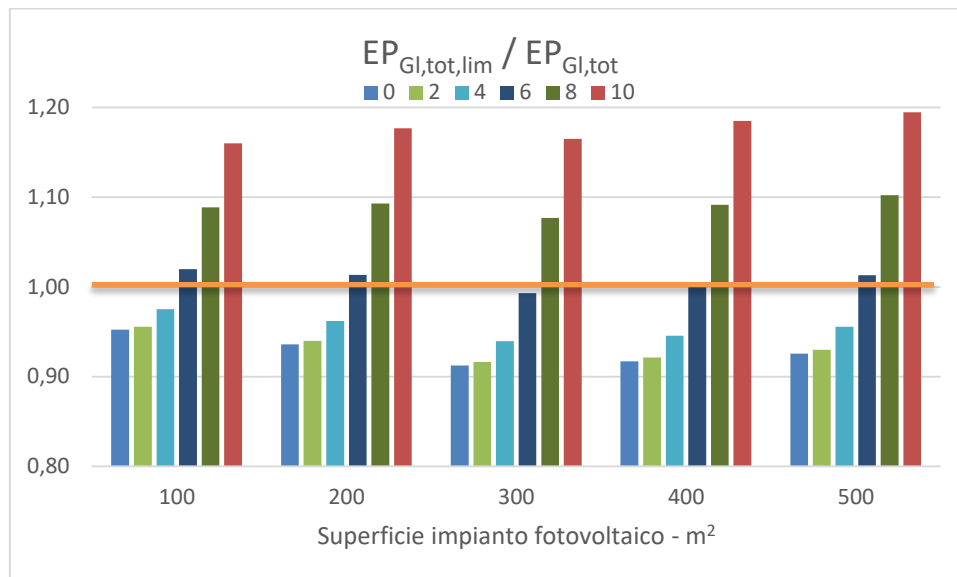


Figura 35: Rapporto tra il valore limite ed effettivo del parametro $EP_{gl,tot}$ al variare della temperatura di switch invernale e della superficie di captazione solare del sistema fotovoltaico. Soddisfano i requisiti NZEB le soluzioni impiantistiche con valore superiore all'unità.

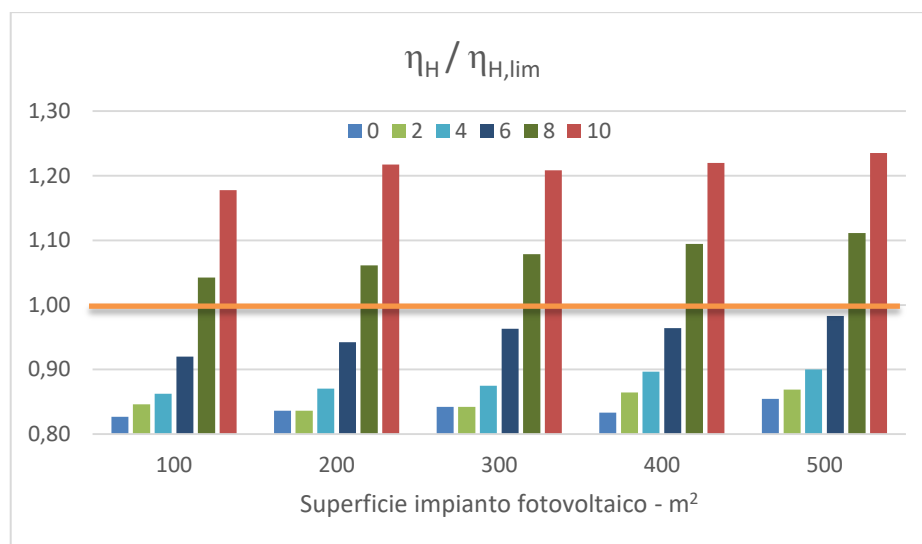


Figura 36: Rapporto tra il valore effettivo e limite del parametro η_H al variare della temperatura di switch invernale e della superficie di captazione solare del sistema fotovoltaico. Soddisfano i requisiti NZEB le soluzioni impiantistiche con valore superiore all'unità.

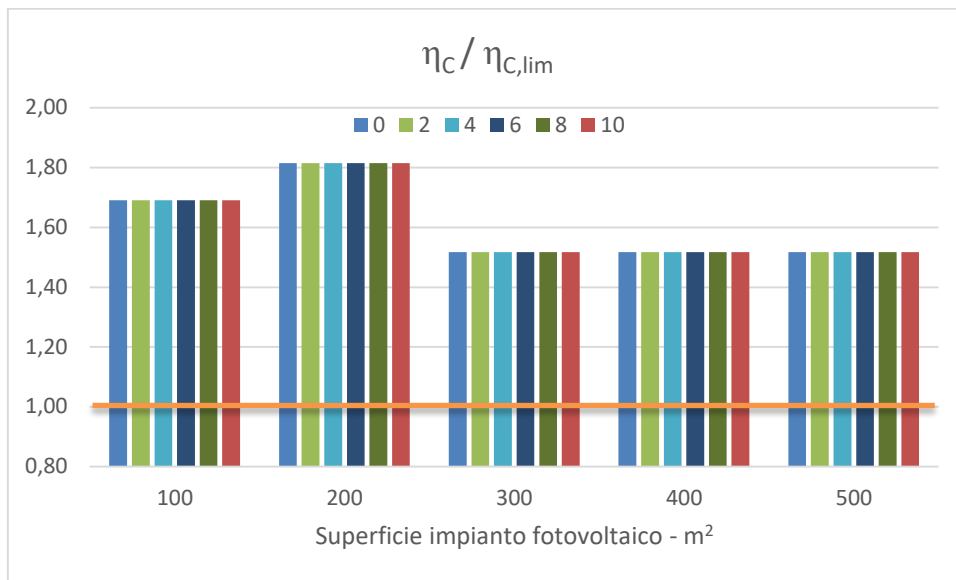


Figura 37: Rapporto tra il valore effettivo e limite del parametro η_c al variare della temperatura di switch invernale e della superficie di captazione solare del sistema fotovoltaico. Soddisfano i requisiti NZEB le soluzioni impiantistiche con valore superiore all'unità.

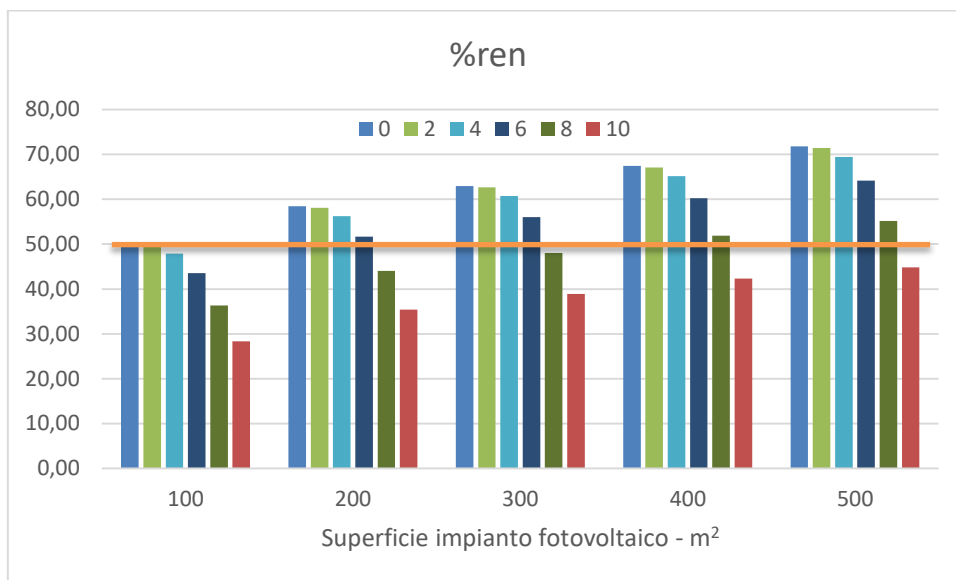


Figura 38: Percentuale del fabbisogno di energia primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili al variare della temperatura di switch invernale e della superficie di captazione solare del sistema fotovoltaico. Soddisfano i requisiti NZEB le soluzioni impiantistiche con valore pari o superiore al 50%.

In Tabella 40 sono riportati gli indicatori di prestazione energetica a seguito dell'intervento NZEB_4: tutti gli indici per la classifica di NZEB sono rispettati. Nelle Tabelle 41-43 sono riportati in dettaglio i risultati della

simulazione, suddivisi per i servizi di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione. Per la definizione di ciascun parametro riportato in queste tabelle, si rimanda alla Tabella 17.

Tabella 40: Indici di prestazione energetica ai fini NZEB della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_4.

Parametro	Descrizione	Valore effettivo	Valore limite	Unità di misura	Esito
$EP_{H,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale	21.47	21.72	kWh/m ²	
$EP_{C,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva	12.06	12.16	kWh/m ²	
$EP_{gl,tot}$	Indice prestazione energetica globale dell'edificio, totale	59.96	65.44	kWh/m ²	
η_H	Efficienza per climatizzazione invernale	0.58	0.53		
η_C	Efficienza per climatizzazione estiva	3.08	2.03		
H'_t	Coefficiente globale di scambio termico DM 26/06/2015	0.52	0.80	W / (m ² K)	
$A_{sol,est} / A_{sup,utile}$	Frazione di area solare equivalente estiva DM 26/06/2015	0.01	0.04		
$\%ren$	% del Fabbisogno di Energia Primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili (punto 1, lett. b), all. 3, D.Lgs. 28/2011)	51.88	50.00	%	

Tabella 41: Servizio di riscaldamento: dispersioni, apporti e fabbisogni mensili della Zona_T1 nella situazione attuale (intervento NZEB_4).

	Unità di misura	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	Totale
$Q_{H,tr}$	kWh	5532	8505	8691	7770	6260	2436	39193
$Q_{H,ve}$	kWh	4110	6348	6501	5826	4759	1884	29429
$Q_{H,ht}$	kWh	9642	14852	15192	13595	11019	4320	68621
$Q_{sol,w}$	kWh	1055	846	971	1227	1601	942	6642
Q_{int}	kWh	6362	6574	6574	5938	6574	3181	35202
$Q_{H,nd,inv}$	kWh	3407	7913	8129	6955	4062	1147	31613
$Q_{H,nd}$	kWh	3407	7913	8129	6955	4062	1147	31613
Q'_H	kWh	3407	7913	8129	6955	4062	1147	31613
η_E	%	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	0.00
$Q_{H,l,e}$	kWh	142	330	339	290	169	48	1317
η_{Rg}	%	97.00	97.00	97.00	97.00	97.00	97.00	0.00
$Q_{H,l,rg}$	kWh	110	255	262	224	131	37	1018
$Q_{H,d,out}$	kWh	3469	8057	8277	7082	4136	1168	32188
η_D	%	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	0.00
$Q_{H,l,d}$	kWh	71	164	169	145	84	24	657
$Q_{H,gn,out}$	kWh	3540	8221	8446	7226	4220	1192	32845
η_{Gn}	%	131.66	117.57	116.31	116.73	126.12	114.33	0.00
$Q_{H,gn,in}$	kWh	2688	6993	7262	6191	3346	1042	27522
$Q_{H,aux,el}$	kWh	1788	2109	2124	1895	1881	862	10659
$Q_{H,el}$	kWh	2769	3167	3087	2742	2832	1293	15891

$Q_{H,el,used}$	kWhl	1380	1114	1261	1565	2422	1229	8971
$E_{H,pdc,res}$	kWh	2220	2433	2235	1963	2143	760	11754
$EP_{H,ren}$	kWh	4625	4802	4594	4297	5099	2191	25608
$EP_{H,nren}$	kWh	3038	8658	8738	6644	1895	126	29099
$EP_{H,tot}$	kWh	7664	13460	13331	10941	6994	2317	54707
$E_{el,pv,out}$	kWh	2372	1897	2179	2715	4204	5330	58983
$EP_{pv,out}$	kWh	5741	4590	5272	6571	10173	12898	142739

Tabella 42: Servizio di raffrescamento: dispersioni, apporti e fabbisogni mensili della Zona_T1 nella situazione attuale (intervento NZEB_4).

	Unità di misura	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	Totale
$Q_{C,tr}$	kWh	3175	3226	1783	1707	3287	13178
$Q_{C,ve}$	kWh	2538	2672	1583	1481	2587	10861
$Q_{C,ht}$	kWh	5714	5898	3366	3188	5874	24040
$Q_{sol,w}$	kWh	1795	2757	2917	2604	1671	11743
Q_{int}	kWh	4241	6362	6574	6574	5513	29264
$A_{sol,est}$	m ²	20.37	20.86	21.36	19.07	14.59	0.00
$Q_{Cnd,inv}$	kWh	815	3281	6125	5990	1556	17767
$Q_{C,nd}$	kWh	815	3281	6125	5990	1556	17767
$Q_{C,l,e}$	kWh	17	67	125	122	32	363
$Q_{C,l,rg}$	kWh	53	214	399	390	101	1157
$Q_{C,l,dw}$	kWh	18	73	136	133	34	394
$Q_{C,gn,out}$	kWh	903	3634	6784	6635	1724	19680
η_{mm}	%	326.89	524.54	410.32	406.79	331.58	0.00
Q_{Cgnin}	kWh	276	693	1653	1631	520	4773
Q_{Cauxel}	kWh	45	183	341	334	87	990
Q_{Cel}	kWh	322	876	1995	1965	606	5763
$Q_{Celused}$	kWh	322	876	1995	1965	606	5763
EP_{Cren}	kWh	322	876	1995	1965	606	5763
EP_{Cnren}	kWh	0	0	0	0	0	0
EP_{Ctot}	kWh	322	876	1995	1965	606	5763

Tabella 43: Servizio di illuminazione: fabbisogni mensili della Zona_T1 nella situazione attuale (intervento NZEB_4).

	Unità di misura	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Totale
$Q_{L,int,el}$	kWh	1917	1731	1917	1855	1917	1855	1917	1917	1855	1917	1855	1917	22565
$Q_{L,el}$	kWh	1917	1731	1917	1855	1917	1855	1917	1917	1855	1917	1855	1917	22565
$Q_{L,el,used}$	kWh	918	1150	1781	1855	1917	1855	1917	1917	1855	1917	992	783	18855
$EP_{L,ren}$	kWh	1387	1423	1845	1855	1917	1855	1917	1917	1855	1917	1398	1316	20599
$EP_{L,nren}$	kWh	1948	1132	263	0	0	0	0	0	0	0	1682	2210	7236
$EP_{L,tot}$	kWh	3335	2556	2108	1855	1917	1855	1917	1917	1855	1917	3079	3526	27835

4.2.11 Descrizione e risultati dell'intervento NZEB_4_175

Considerata l'impossibilità di installare la superficie fotovoltaica necessaria per la trasformazione della Zona_T1 in edificio NZEB, si riporta nel seguito la soluzione impiantistica che consente di soddisfare il massimo numero di requisiti possibili, andando a massimizzare (per quanto possibile) la percentuale di produzione di energia da fonti rinnovabili.

I risultati dell'analisi di sensitività presentati nelle Figure 35-38 mostrano come l'installazione di 200 m² di superficie fotovoltaica e l'adozione di una temperatura di switch di 8 °C garantiscano il soddisfacimento dei requisiti per tutti gli indici, ad eccezione della percentuale di fabbisogno soddisfatta da rinnovabili, che si attesta intorno al 44 %. Questo valore è comunque vicino al limite imposto di 50% e viene raggiunto con una superficie fotovoltaica molto vicina alla massima superficie disponibile sulla copertura dell'edificio (175 m²). Si decide quindi di riferirsi a questa superficie massima e alla temperatura di switch di 8 °C come la migliore soluzione possibile per la riqualificazione energetica della Zona_T1. Questo nuovo intervento è denominato *Intervento NZEB_4_175*.

Nella Tabella 44 sono riassunti i principali indici di prestazione energetica della Zona_T1 a seguito dell'*Intervento NZEB_4_175*.

Nelle Tabelle 45-47 sono riportati in dettaglio i risultati della simulazione, suddivisi per i servizi di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione. Per la definizione di ciascun parametro riportato in queste tabelle, si rimanda alla Tabella 17.

Tabella 44: Indici di prestazione energetica ai fini NZEB della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_4_175.

Parametro	Descrizione	Valore effettivo	Valore limite	Unità di misura	Esito
$EP_{H,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale	21.47	21.72	kWh/m ²	Esito
$EP_{C,nd}$	Indice prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva	12.06	12.16	kWh/m ²	
$EP_{gl,tot}$	Indice prestazione energetica globale dell'edificio, totale	69.16	75.76	kWh/m ²	
η_H	Efficienza per climatizzazione invernale	0.52	0.49		
η_c	Efficienza per climatizzazione estiva	2.80	1.52		
H'_t	Coefficiente globale di scambio termico DM 26/06/2015	0.52	0.80	W / (m ² K)	
$A_{sol,est} / A_{sup,utile}$	Frazione di area solare equivalente estiva DM 26/06/2015	0.01	0.04		
$\%ren$	% del Fabbisogno di Energia Primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili (punto 1, lett. b), all. 3, D.Lgs. 28/2011)	42.39	50.00	%	Esito

Tabella 45: Servizio di riscaldamento: dispersioni, apporti e fabbisogni mensili della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_4_175.

	Unità di misura	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	Totale
$Q_{H,tr}$	kWh	5532	8505	8691	7770	6260	2436	39193
$Q_{H,ve}$	kWh	4110	6348	6501	5826	4759	1884	29429
$Q_{H,ht}$	kWh	9642	14852	15192	13595	11019	4320	68621
$Q_{sol,w}$	kWh	1055	846	971	1227	1601	942	6642
Q_{int}	kWh	6362	6574	6574	5938	6574	3181	35202
$Q_{H,nd,inv}$	kWh	3407	7913	8129	6955	4062	1147	31613
$Q_{H,nd}$	kWh	3407	7913	8129	6955	4062	1147	31613
Q'_H	kWh	3407	7913	8129	6955	4062	1147	31613
η_E	%	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	
$Q_{H,l,e}$	kWh	142	330	339	290	169	48	1317
η_{Rg}	%	97.00	97.00	97.00	97.00	97.00	97.00	0.00
$Q_{H,l,rg}$	kWh	110	255	262	224	131	37	1018
$Q_{H,d,out}$	kWh	3469	8057	8277	7082	4136	1168	32188
η_D	%	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	
$Q_{H,l,d}$	kWh	71	164	169	145	84	24	657
$Q_{H,gn,out}$	kWh	3540	8221	8446	7226	4220	1192	32845
η_{Gn}	%	131.66	117.57	116.31	116.73	126.12	114.33	
$Q_{H,gn,in}$	kWh	2688	6993	7262	6191	3346	1042	27522
$Q_{H,aux,el}$	kWh	1788	2109	2124	1895	1881	862	10659
$Q_{H,el}$	kWh	2769	3167	3087	2742	2832	1293	15891

Q_{H,el,used}	kWh	604	487	552	685	1060	929	4316
E_{H,pdc,res}	kWh	2220	2433	2235	1963	2143	760	11754
EP_{H,ren}	kWh	4214	4470	4218	3831	4377	2032	23141
EP_{H,nren}	kWh	4552	9880	10121	8360	4552	710	38175
EP_{H,tot}	kWh	8766	14350	14339	12191	8928	2742	61316
E_{el,pv,out}	kWh	1038	830	953	1188	1839	2332	25805
EP_{pv,out}	kWh	2512	2008	2307	2875	4451	5643	62448

Tabella 46: Servizio di raffrescamento: dispersioni, apporti e fabbisogni mensili della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_4_175.

	Unità di misura	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	Totale
$Q_{C,tr}$	kWh	3175	3226	1783	1707	3287	13178
$Q_{C,ve}$	kWh	2538	2672	1583	1481	2587	10861
$Q_{C,ht}$	kWh	5714	5898	3366	3188	5874	24040
$Q_{sol,w}$	kWh	1795	2757	2917	2604	1671	11743
Q_{int}	kWh	4241	6362	6574	6574	5513	29264
$A_{sol,est}$	m ²	20.37	20.86	21.36	19.07	14.59	0.00
$Q_{Cnd,inv}$	kWh	815	3281	6125	5990	1556	17767
$Q_{C,nd}$	kWh	815	3281	6125	5990	1556	17767
$Q_{C,l,e}$	kWh	17	67	125	122	32	363
$Q_{C,l,rg}$	kWh	53	214	399	390	101	1157
$Q_{C,l,dw}$	kWh	18	73	136	133	34	394
$Q_{C,gn,out}$	kWh	903	3634	6784	6635	1724	19680
η_{mm}	%	326.89	524.54	410.32	406.79	331.58	0.00
Q_{Cgnin}	kWh	276	693	1653	1631	520	4773
Q_{Cauxel}	kWh	45	183	341	334	87	990
Q_{Cel}	kWh	322	876	1995	1965	606	5763
$Q_{Celused}$	kWh	322	876	1907	1653	594	5351
EP_{Cren}	kWh	322	876	1948	1800	600	5545
EP_{Cnren}	kWh	0	0	171	608	25	803
EP_{Ctot}	kWh	322	876	2119	2407	625	6348

Tabella 47: Servizio di illuminazione: fabbisogni mensili della Zona_T1 a seguito dell'intervento NZEB_4_175.

	Unità di misura	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Totale
$Q_{L,int,el}$	kWh	1917	1731	1917	1855	1917	1855	1917	1917	1855	1917	1855	1917	22565
$Q_{L,el}$	kWh	1917	1731	1917	1855	1917	1855	1917	1917	1855	1917	1855	1917	22565
$Q_{L,el,used}$	kWh	401	503	779	1403	1917	1855	1832	1613	1815	1494	434	343	14389
$EP_{L,ren}$	kWh	1114	1080	1314	1615	1917	1855	1872	1755	1834	1693	1102	1082	18232
$EP_{L,nren}$	kWh	2954	2394	2217	882	0	0	164	593	77	824	2770	3069	15945
$EP_{L,tot}$	kWh	4068	3474	3531	2497	1917	1855	2036	2348	1911	2516	3872	4152	34176

4.2.12 Fattibilità del posizionamento di un sistema fotovoltaico sulla falda ad est di Palazzo A10

Per poter soddisfare i requisiti di NZEB, è necessario utilizzare una quota di rinnovabili (superiore al 50%) per le richieste energetiche dell'edificio. Un sistema fotovoltaico contribuisce al soddisfacimento di tale quota.

Il documento PANZEB [7], citato precedentemente nel paragrafo 1.3, raccomanda infatti l'analisi dell'utilizzo di un sistema fotovoltaico nella riqualificazione di un edificio a NZEB. Negli ultimi anni, alcuni studi si sono concentrati sull'integrazione dei moduli fotovoltaici sui tetti di palazzi storici. Un esempio ne è il progetto SUPSI CCEM SuRHIB (Sustainable Renovation of Historical Buildings), che ha definito i criteri di valutazione architettonica per il posizionamento di pannelli solari e fotovoltaici nei nuclei storici dell'area del Ticino [27]. I risultati di tale studio evidenziano un'alta potenzialità di sfruttamento della risorsa solare anche sui tetti dei palazzi storici. La Figura 39 riporta una tabella esemplificativa della casistica studiata nel report, dove il colore verde significa "Il criterio è facilmente rispettabile", il colore giallo "Il criterio può essere rispettato a seguito di un'attenta progettazione del sistema" ed il colore rosso "Il criterio non può essere rispettato o può esserlo solo di un'attenta considerazione di tutti gli aspetti. Le linee guida per l'installazione di pannelli solari e moduli fotovoltaici su palazzi storici sono riportati in [28].

Con il suo tetto a doppia falda, Palazzo A10 rientrerebbe nella categoria 2 o nella categoria 10 (considerando la presenza dei palazzi adiacenti). In entrambi i casi, per quanto la progettazione del posizionamento ed installazione del sistema fotovoltaico debba necessariamente essere attentamente pianificata, l'intervento risulterebbe fattibile secondo quanto riportato dalla ricerca SUPSI.

Tuttavia, nel momento di un'effettiva valutazione, la progettazione deve soddisfare anche vincoli normativi ed ambientali, che spesso in Italia possono risultare in contrasto con quanto delineato dalla ricerca SUPSI. È spesso necessaria, infatti, l'autorizzazione paesaggistica da parte degli uffici competenti, che verifica l'integrazione con i palazzi circostanti e l'effettiva visibilità non solo dalla strada, ma anche da spazi pubblici nelle vicinanze (mentre la ricerca SUPSI fa riferimento solamente alla visibilità dal livello stradale).

Se si considera, ad esempio, il Regolamento Edilizio Unificato di Pisa, Calci, Cascina, San Giuliano Terme, Vecchiano e Vicopisano [29], all'Articolo 62 si trova infatti:

“1. Negli interventi di nuova edificazione, sostituzione edilizia e ristrutturazione urbanistica, l'installazione di pannelli solari termici e fotovoltaici deve essere prevista all'interno di un progetto organico e coerente che coinvolga l'edificio nella sua totalità, anche in rapporto all'ambiente circostante [...]. Le soluzioni progettuali saranno rivolte a minimizzare i dimensionamenti e l'impatto visivo, al fine di ottimizzare l'integrazione dell'impianto con i caratteri dell'edificio e del paesaggio;

2. Negli edifici vincolati ai sensi della Parte Seconda del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio e a quelli classificati di interesse storico l'installazione di impianti alimentati a fonti rinnovabili è ammessa solo a seguito dell'acquisizione del preventivo parere favorevole da parte rispettivamente della Soprintendenza o dell'Amministrazione Comunale ove previsto da propri regolamenti;

3. I pannelli solari termici e fotovoltaici installati sulle coperture inclinate devono essere aderenti o integrati nei tetti con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda; tali pannelli devono inoltre essere realizzati con superfici di colore simile a quello della copertura oppure scure non riflettenti, in modo da determinare un impatto visivo assimilabile ai lucernari; l'impianto dovrà avere una

forma quanto più possibile regolare e compatibile con il disegno architettonico della copertura.”

Il Decreto del Presidente della Repubblica n.31/2017 [30], d’altro canto, prova ad definire, a livello nazionale, la lista di interventi per i quali non è necessaria l’autorizzazione paesaggistica. Per quanto riguarda i sistemi solari e fotovoltaici, nell’Allegato A vengono considerati esclusi dall’autorizzazione paesaggistica gli interventi di “installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici, laddove posti su coperture piane e in modo da non essere visibili dagli spazi pubblici esterni; installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici, purché integrati nella configurazione delle coperture, o posti in aderenza ai tetti degli edifici con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda degli edifici, ai sensi dell’art. 7-bis del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28, non ricadenti fra quelli di cui all’art.136, comma 1, lettere b) e c) del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n.42”.

Come scritto nel paragrafo 1.3, Palazzo A10 è un edificio di importanza storica, per cui l’installazione di un sistema fotovoltaico deve ottenere l’autorizzazione da parte degli uffici competenti. Nella progettazione del sistema fotovoltaico, si è scelto quindi il posizionamento ad est: tale falda non è visibile da Via Santa Maria né dai vicini percorsi turistici/punti di interesse.

		Tipi di tetto										
		Una falda	Due Falde	Tetto piramidale	Tetto a Padiglione	Tetto a Mansarda	Doppia inclinazione	Tetto a shed	Tetto piatto	Facciata	Tetto con costruzioni adiacenti	Edificio decentralizzato
Criteri	Coplanarità	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green
	Rispetto delle linee Forma	Green	Green	Red	Yellow	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
	Raggruppamento	Green	Green	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green
	Accuratezza nell'integrazione e nell'estetica	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow
	Visibilità	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Green	Red	Yellow	Yellow

Figura 39: Possibilità di integrazione di pannelli solari/moduli fotovoltaici sui tetti dei centri storici, secondo il progetto SUPSI [27].

4.3 Sintesi dei risultati ottenuti con i diversi interventi NZEB

Le Figure 40-46 riassumono la variazione degli indici di prestazione energetica NZEB in funzione dei diversi interventi di efficientamento energetico. La Figura 47 riassume il rapporto tra il valore effettivo e quello richiesto per tutti gli indici: per soddisfare i requisiti NZEB, tutti gli indici devono essere superiori all'unità.

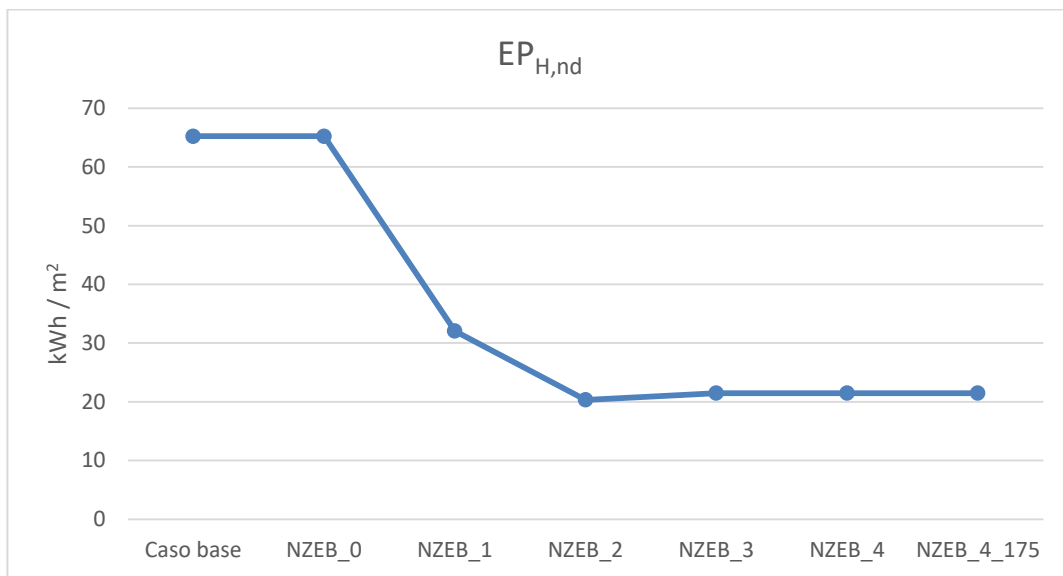


Figura 40: Andamento dell'indice di prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione invernale, $EP_{H,nd}$, nei diversi interventi di efficientamento simulati.

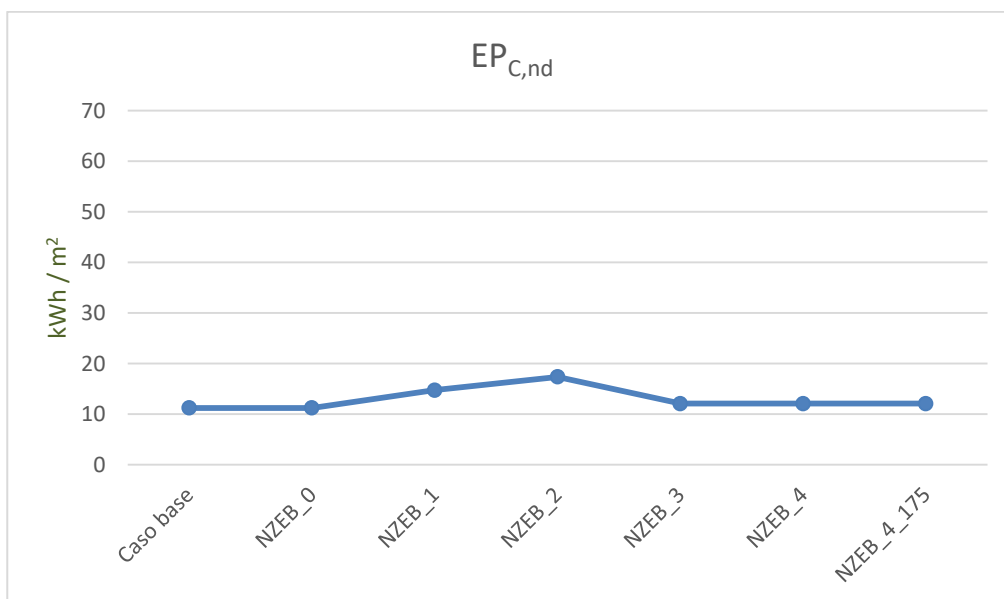


Figura 41: Andamento dell'indice di prestazione energetica dell'involucro per climatizzazione estiva, $EP_{C,nd}$, nei diversi interventi di efficientamento simulati.

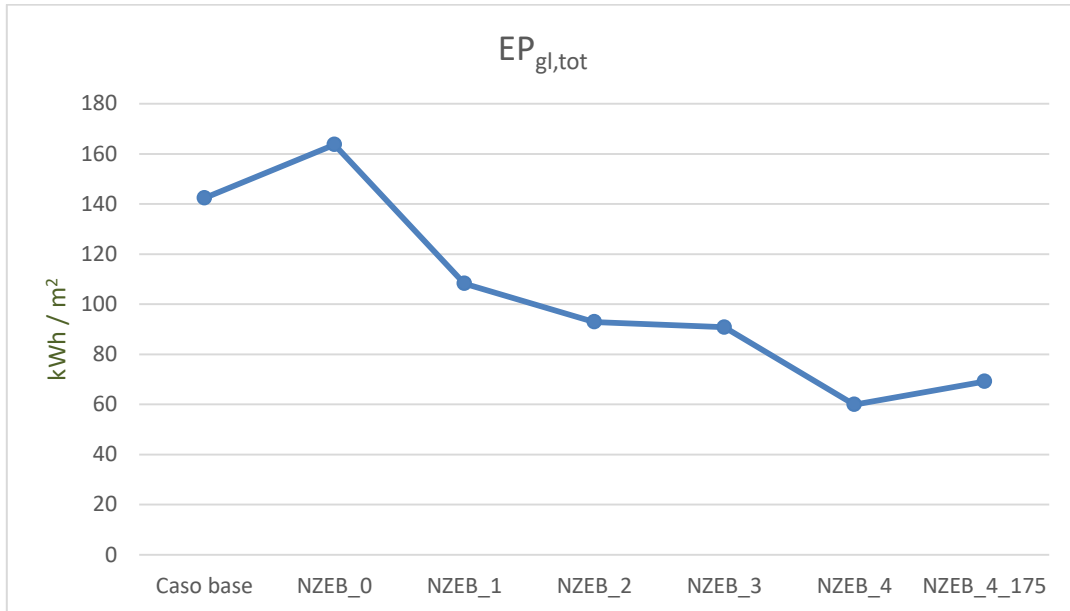


Figura 42: Andamento dell'indice prestazione energetica globale dell'edificio, $EP_{gl,tot}$, nei diversi interventi di efficientamento simulati.

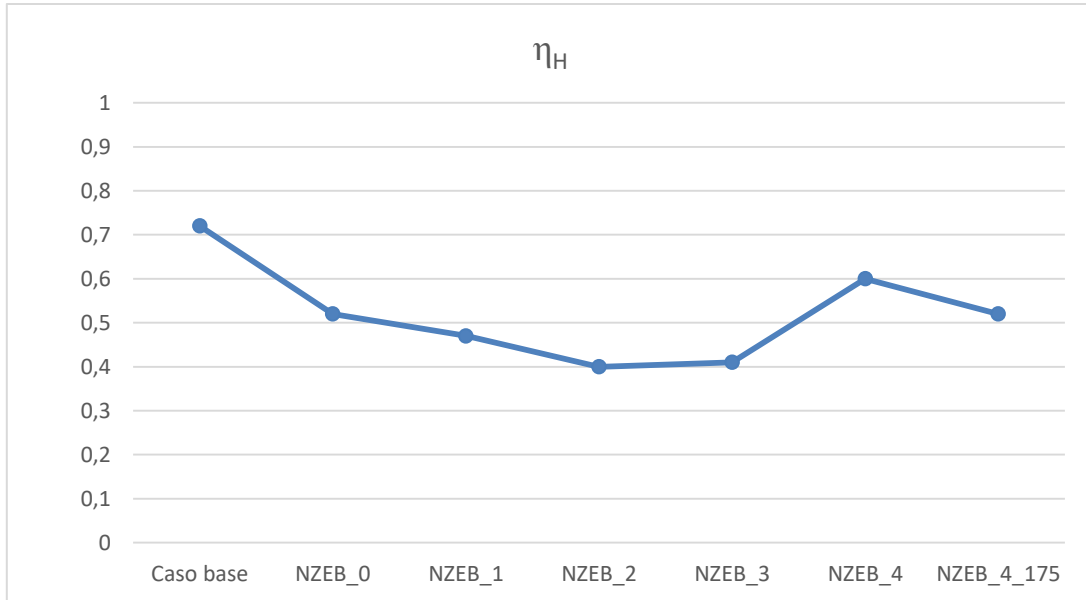


Figura 43: Andamento dell'efficienza per climatizzazione invernale, η_H , nei diversi interventi di efficientamento simulati.

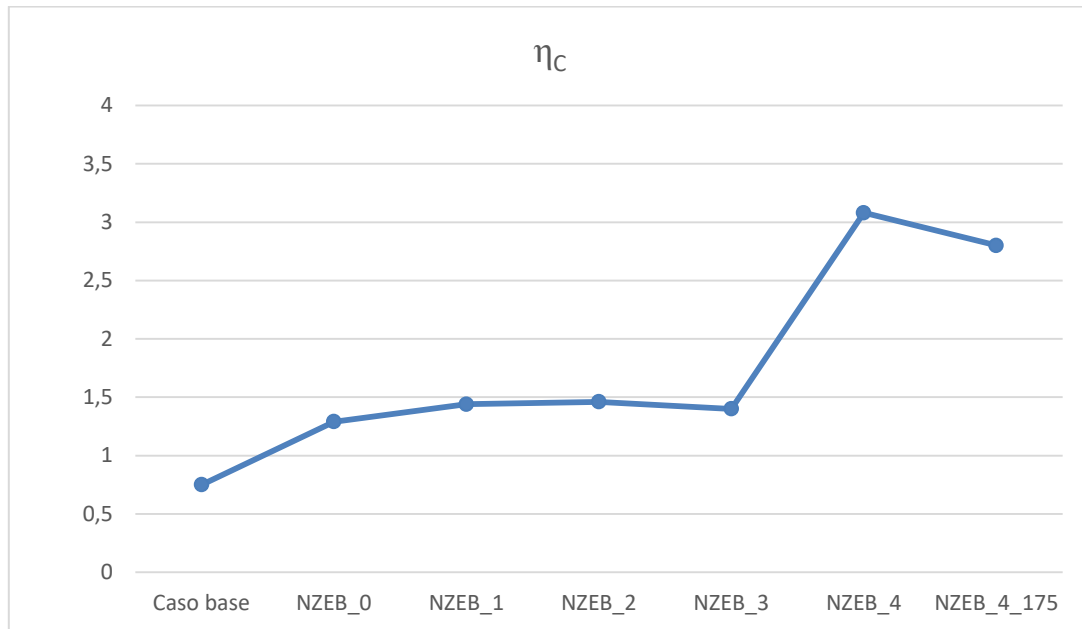


Figura 44: Andamento dell'efficienza per climatizzazione estiva, η_c , nei diversi interventi di efficientamento simulati.

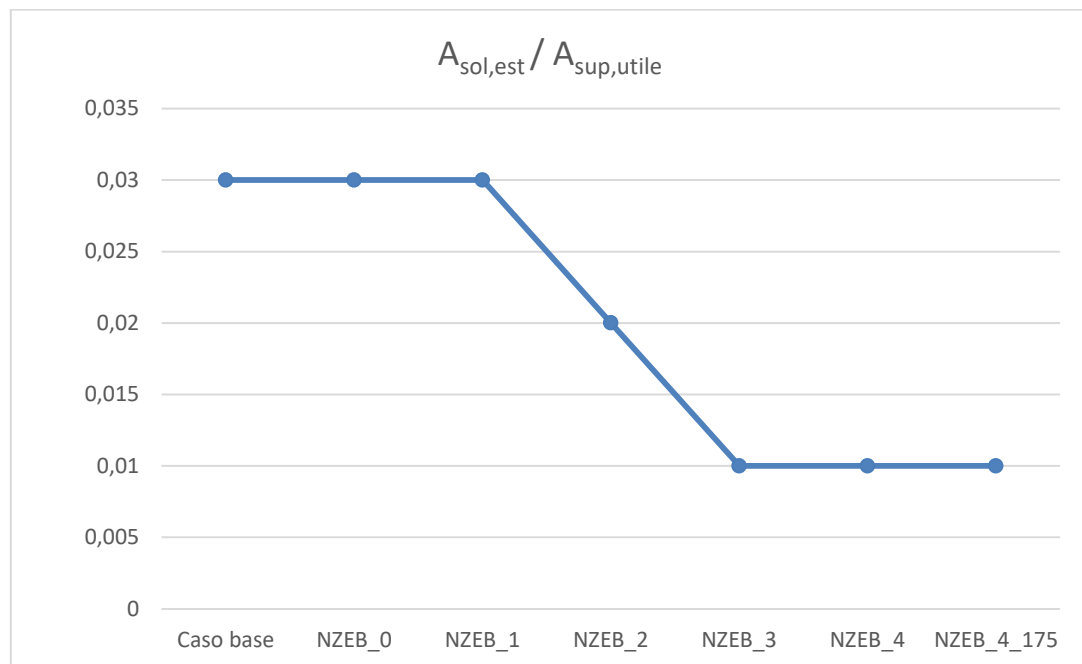


Figura 45: Andamento della frazione di area solare equivalente estiva, $A_{sol,est} / A_{sup,utile}$, nei diversi interventi di efficientamento simulati.

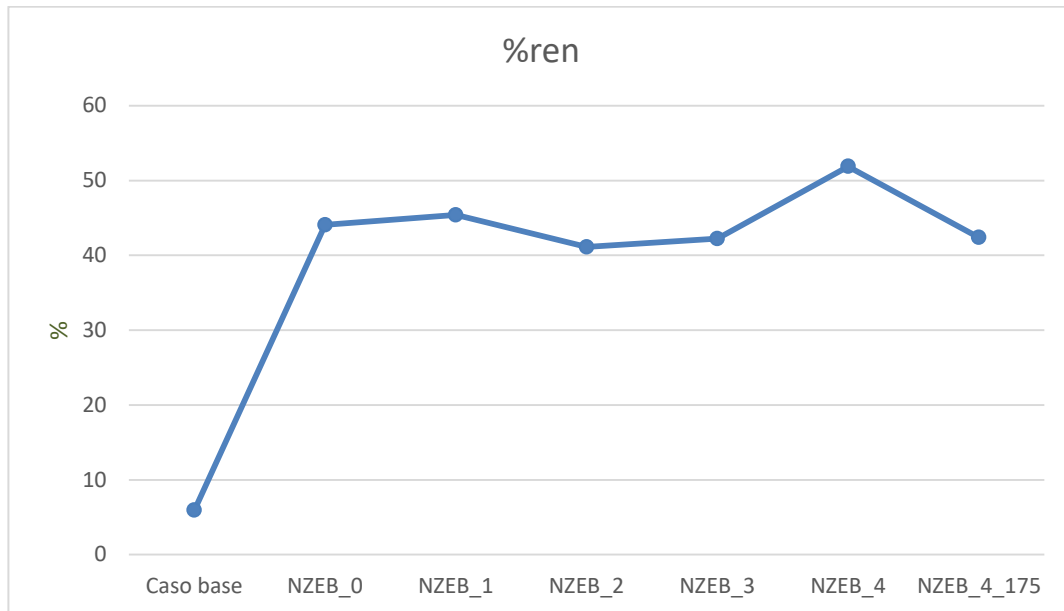


Figura 46: Andamento della percentuale del fabbisogno di energia primaria per riscaldamento, raffrescamento e ACS coperto da fonti rinnovabili, %ren, nei diversi interventi di efficientamento simulati.

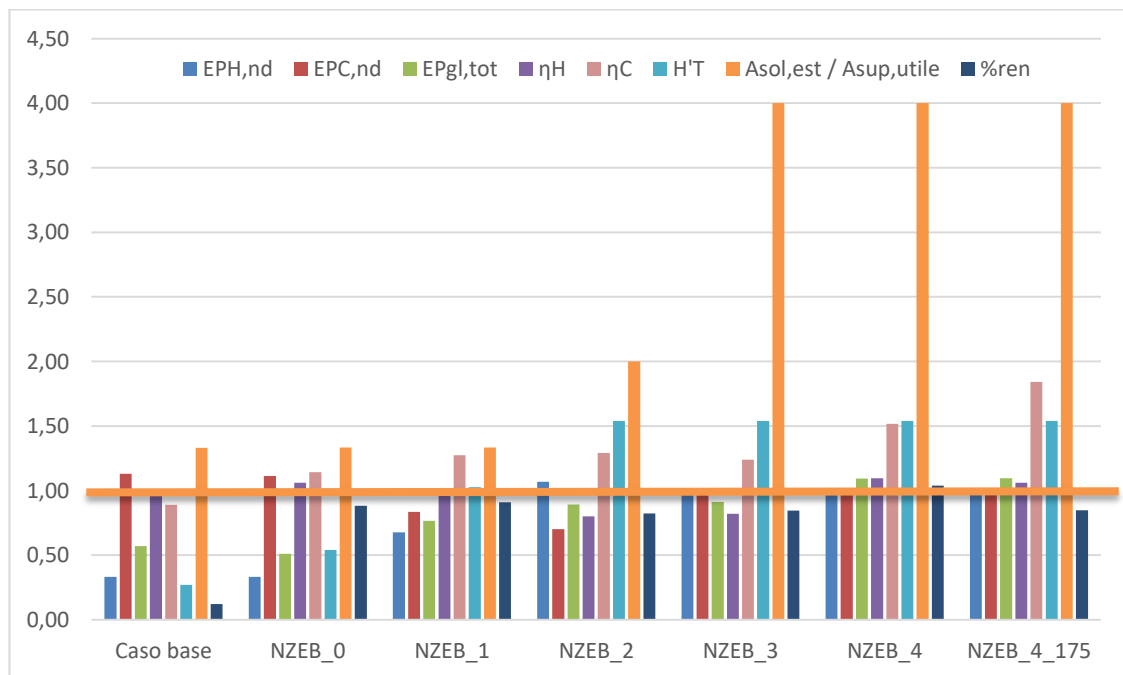


Figura 47: Rapporto tra valore effettivo e limite degli indici NZEB nei diversi interventi di efficientamento simulati. Soddisfano i requisiti le soluzioni impiantistiche con tutti gli indici superiori all'unità (linea verde).

4.4 Interventi conseguenti alla diagnosi energetica tramite SEAS: descrizione

Anche per quanto riguarda la scelta degli interventi da effettuare a Palazzo A10 per la riduzione delle richieste energetiche, è stato scelto un approccio step-by-step: è stata definita una lista di interventi da simulare nel caso studio in maniera incrementale, di modo da verificare l'influenza di ogni intervento nella riduzione dei consumi energetici. I dati climatici dell'anno climatico medio sono stati utilizzati come input, di modo da ottenere i risparmi energetici "medi", non influenzati dalla variabilità climatica di un anno particolare.

La lista degli interventi è la seguente:

- Intervento n.1: sensibilizzazione degli utenti al tema dell'efficienza energetica (Figura 48, Figura 49). Questo intervento prevede che gli utenti dell'edificio utilizzino la modalità "risparmio energetico" per i loro pc, che spengano il ventilatore dei loro fancoil al raggiungimento della temperatura di set-point, e che utilizzino in modo attivo le chiusure oscuranti, chiudendole in ogni mese dell'anno di notte e mantenendole invece aperte di giorno per un numero di ore variabile in base alla stagione. In questo modo, la trasmittanza termica della finestra diminuirà, riducendo le perdite per trasmissione dagli elementi vetrati.
- Intervento 2: intervento 1 + inserimento della sonda climatica per il sottosistema di regolazione (Figura 50). La regolazione quindi sarà di tipo "per singolo ambiente + climatica": la temperatura di mandata ai fancoil dal generatore sarà determinata dalla temperatura esterna, mantenendo comunque la possibilità di regolazione di singolo ambiente.
- Intervento 3: intervento 2 + posa di una seconda finestra in corrispondenza di alcuni gruppi di finestre (Figura 51). Le finestre di Palazzo A10 sono in singolo vetro con telaio in legno, con forte permeabilità all'aria: questo rende significative le perdite termiche sia per trasmissione che per infiltrazione. Essendo finestre storiche, non è possibile la loro sostituzione. Una pratica largamente utilizzata in questi casi è la posa di una seconda finestra (controfinestra) sul lato interno della stanza, con benefici dal punto di vista dell'efficienza energetica, del controllo solare e acustico, della permeabilità all'aria. Questo tipo di intervento è stato previsto solamente per alcuni gruppi di finestre (quelli le cui perdite erano maggiori). Si veda la Tabella 48 per la caratterizzazione delle finestre sostituite.
- Intervento 4: intervento 3 + isolamento delle pareti verticali (Figura 52). La condizione di palazzo di interesse storico non permette l'installazione di un cappotto esterno; anche la soluzione di

isolamento sull'interno non è consigliabile, per evitare la riduzione dei volumi interni degli uffici. Di conseguenza, si è scelta la posa di un intonaco termoisolante sul lato interno, mettendo invece un cappotto esterno solamente sulle pareti che si affacciano sulla corte interna, non protette e non visibili dalla strada. Per quanto riguarda le caratteristiche del pannello isolante, si faccia riferimento alla Tabella 34; per quanto riguarda invece le caratteristiche dell'intonaco termoisolante, si faccia riferimento alla Tabella 49. Le caratteristiche finali importate su SEAS sono quelle riportate in Tabella 50.

- Intervento 5: intervento 4 + utilizzo di veneziane bianche per tutte le finestre, eccetto quelle che si affacciano sulla corte (Figura 53). L'effetto benefico di questo intervento si registra in estate, quando questi schermi riducono gli apporti solari e, di conseguenza, anche le richieste energetiche per raffrescamento. In inverno, il loro effetto è invece negativo: riducendo gli apporti solari, è necessaria una richiesta energetica maggiore. Per raggiungere il livello di NZEB, secondo la legislazione italiana, l'utilizzo di schermi solari diventa necessaria per ridurre l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva ed è stato infatti uno degli interventi descritti nella sezione precedente; la simulazione di questo intervento anche in SEAS serve a quantificare la richiesta energetica aggiuntiva d'inverno ad esso collegata.
- Intervento 6: intervento 5 + sostituzione della pompa di distribuzione con una a velocità variabile + utilizzo di una pompa di calore per riscaldamento e raffrescamento, al servizio solo della zona in esame (Figura 54, Figura 55). La caldaia presente viene mantenuta a servizio del piano terra e del piano quarto (non ad uso uffici) ed, in caso di necessità, fornisce l'integrazione energetica necessaria alla zona in esame. La pompa di calore scelta è di tipo aria-acqua, di potenza nominale 63.7 kW in riscaldamento, COP 2.9 tra le temperature di 7 °C (temperatura esterna) e 45 °C (temperatura di mandata), con compressori scroll modulanti. A partire da questo intervento, viene considerata la zona termica in esame come edificio in sé, quindi sono stati modificati i valori dei millesimi di energia elettrica e di servizio di riscaldamento da 499 a 1000.
- Intervento 7: intervento 6 + installazione di un sistema fotovoltaico su falda del tetto ad est (Figura 56). La falda ad est dell'edificio si affaccia su un giardino interno, non visibile dalla strada e quindi compatibile con l'installazione di un sistema fotovoltaico. Si è ipotizzato l'installazione di 100 m² di moduli fotovoltaici di tipo silicio monocristallino, non ventilati, con inclinazione 25° (inclinazione del tetto).

Per ognuno di questi interventi, è stata condotta anche una simulazione dinamica in TRNSYS, con lo scopo di ricalcolare il fabbisogno energetico per raffrescamento, da inserire in SEAS nella sezione “Carichi elettrici esterni alla zona”.

Non sono stati considerati interventi sul sistema di illuminazione, in quanto, durante il sopralluogo, si è verificato che tutte le lampade sono state recentemente sostituite e quindi la loro sostituzione non sarebbe risultata conveniente.

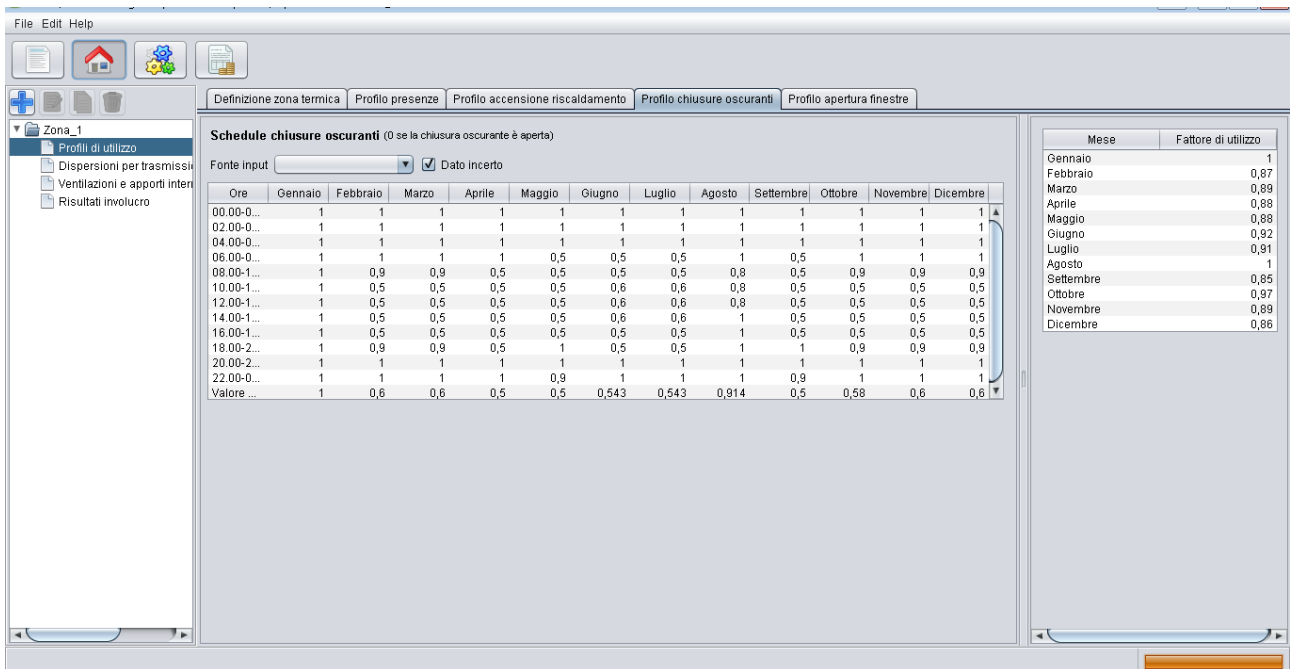


Figura 48: Intervento 1, sensibilizzazione degli utenti nell'utilizzo delle chiusure oscuranti, nuovi profili.

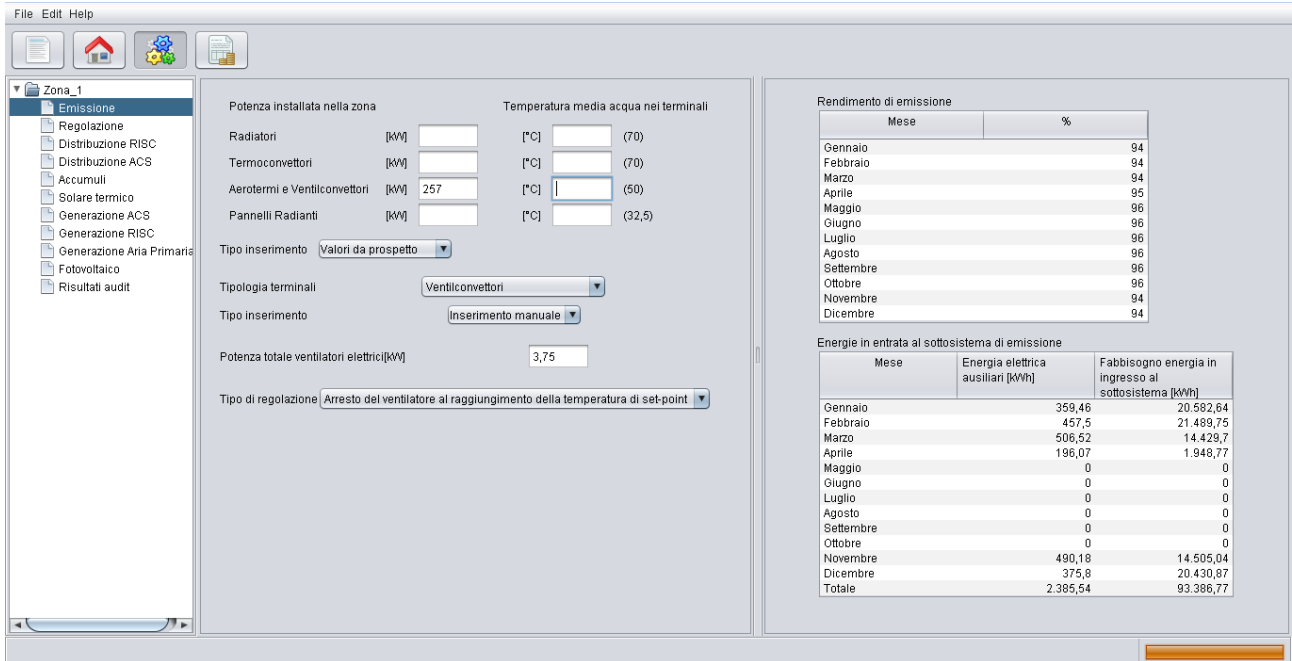


Figura 49: Intervento 1, modifica del funzionamento dei ventilconvettori con arresto del ventilatore al raggiungimento della temperatura di set-point.

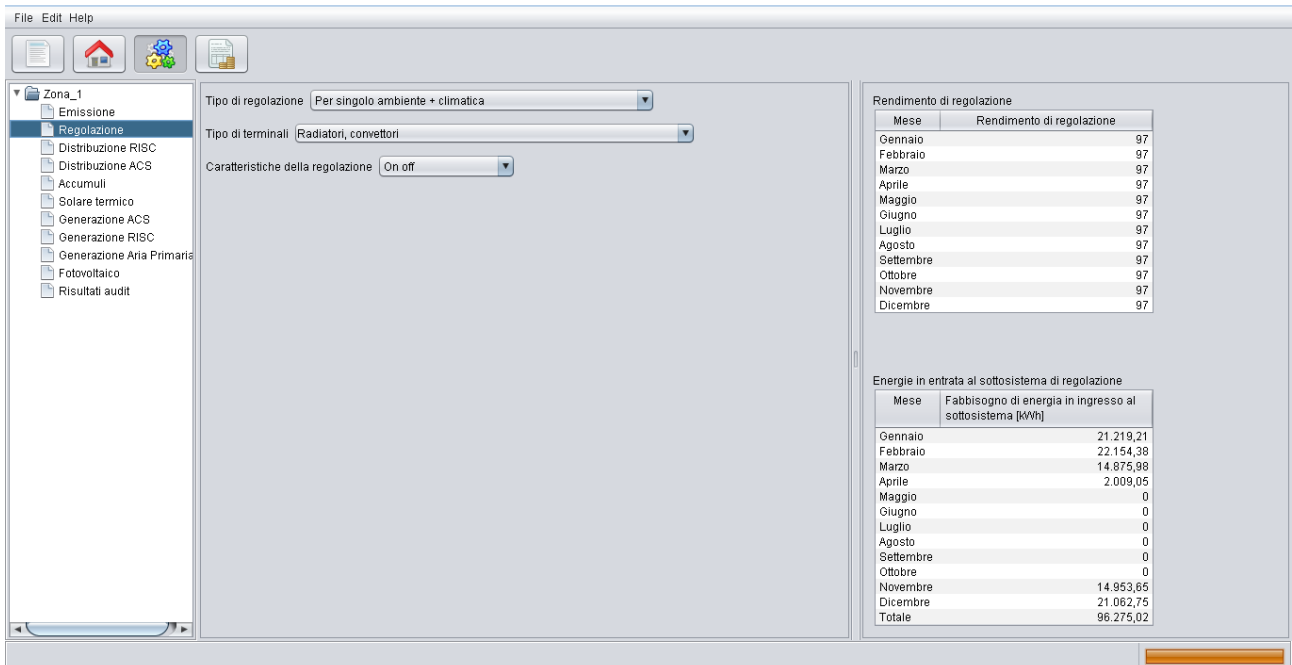


Figura 50: Intervento 2, sonda climatica per il riscaldamento.

Tabella 48: Intervento 3, modifica della trasmittanza di alcune tipologie di finestre a seguito della posa di una controfinestra.

Cod.	N° finestre	Area totale del singolo serramento [m ²]	Trasmittanza finestra pre-intervento [W/m ² K]	Trasmittanza finestra post-intervento [W/m ² K]
J	22	3.1	4.0	1.67
L1P1	7	3.1	4.3	1.73
A1PN	3	3.8	4.0	1.68
U3P	11	2.2	4.0	1.66

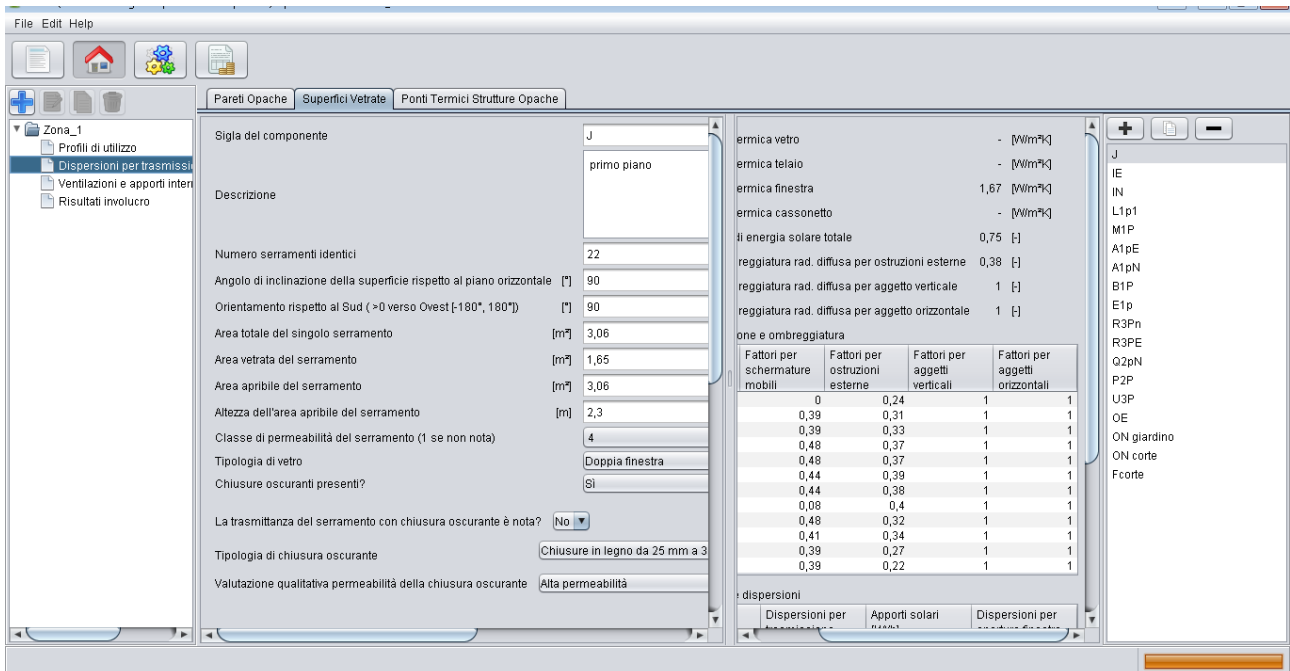


Figura 51: Intervento 3, esempio di inserimento di dati della controfinestra.

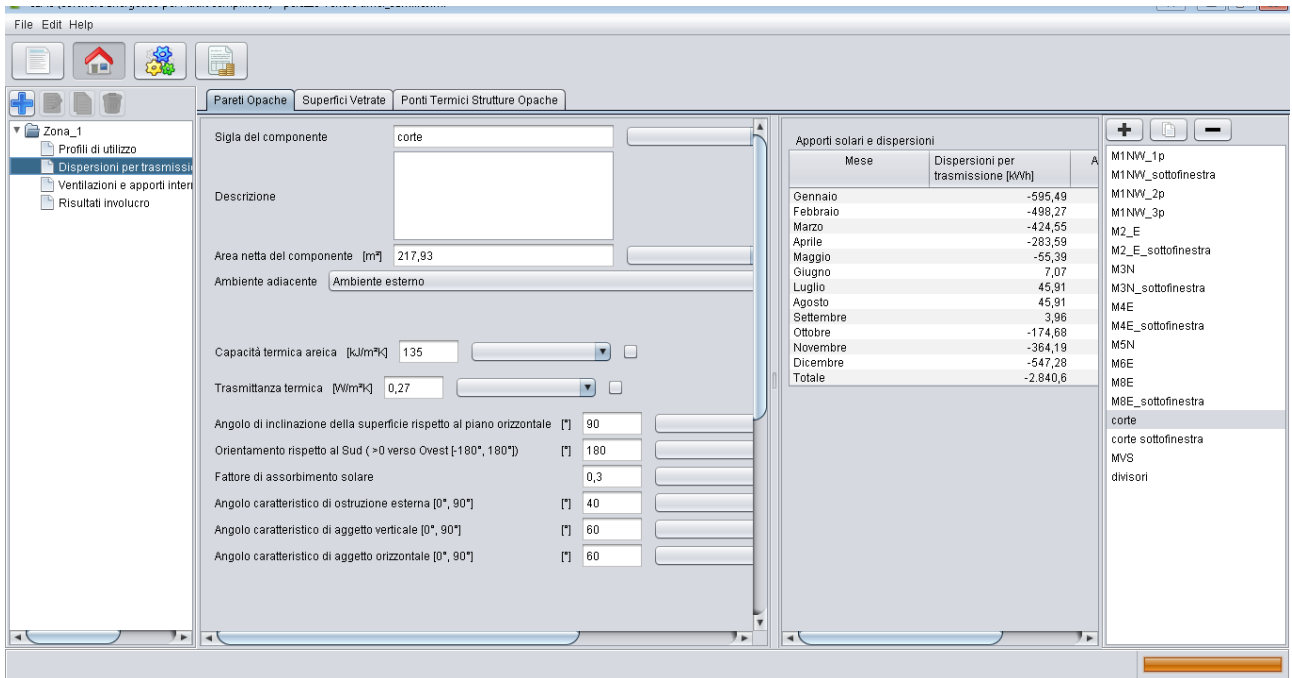


Figura 52: Intervento 4, esempio di modifica dei dati di input per una parete opaca.

Tabella 49: Caratteristiche dell'intonaco termoisolante.

Caratteristiche	
Base	Vetro espanso con legante cemento
Densità in opera	410 kg/m ³
Conducibilità termica	0.086 W/(mK)
Fattore di resistenza al vapor d'acqua (μ)	6-10
Capacità termica specifica	1000 J/(kgK)

Tabella 50: Intervento 4, modifica della trasmittanza di alcune tipologie di pareti opache con l'installazione o di intonaco termo-isolante sul lato interno o di cappotto sul lato esterno.

Cod.	Area netta del componente [m²]	Trasmittanza parete pre-intervento [W/m²K]	Trasmittanza parete post-intervento [W/m²K]
M1NW_1P	123.7	1.06	0.77
M1NW_2P	120.0	1.06	0.77
M1NW_3P	88.5	1.48	0.97
M2_E	168.9	1.74	1.07
M3N	32.6	1.64	1.00
M4E	65.6	1.27	0.87
M5N	102.3	1.56	1.00
M6E	80.3	1.92	1.03
M8E	34.9	1.56	1.00
CORTE	217.9	1.39	0.27

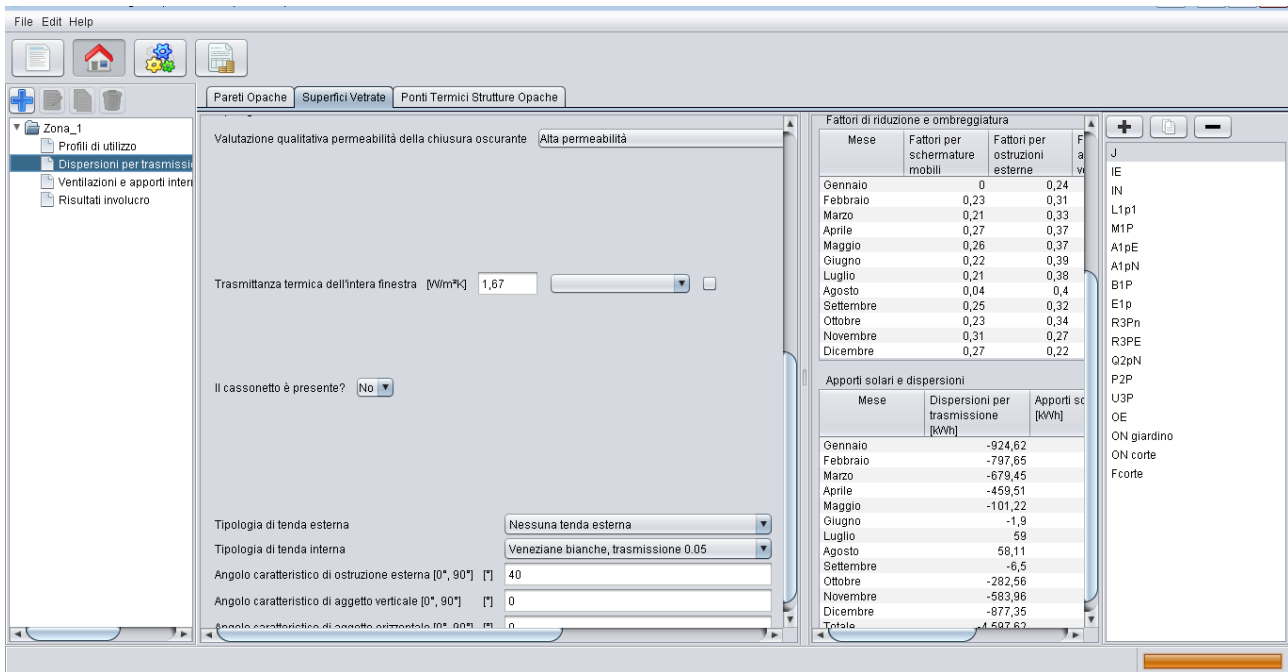


Figura 53: Intervento 5, esempio di modifica dei dati di input per inserire una veneziana bianca.

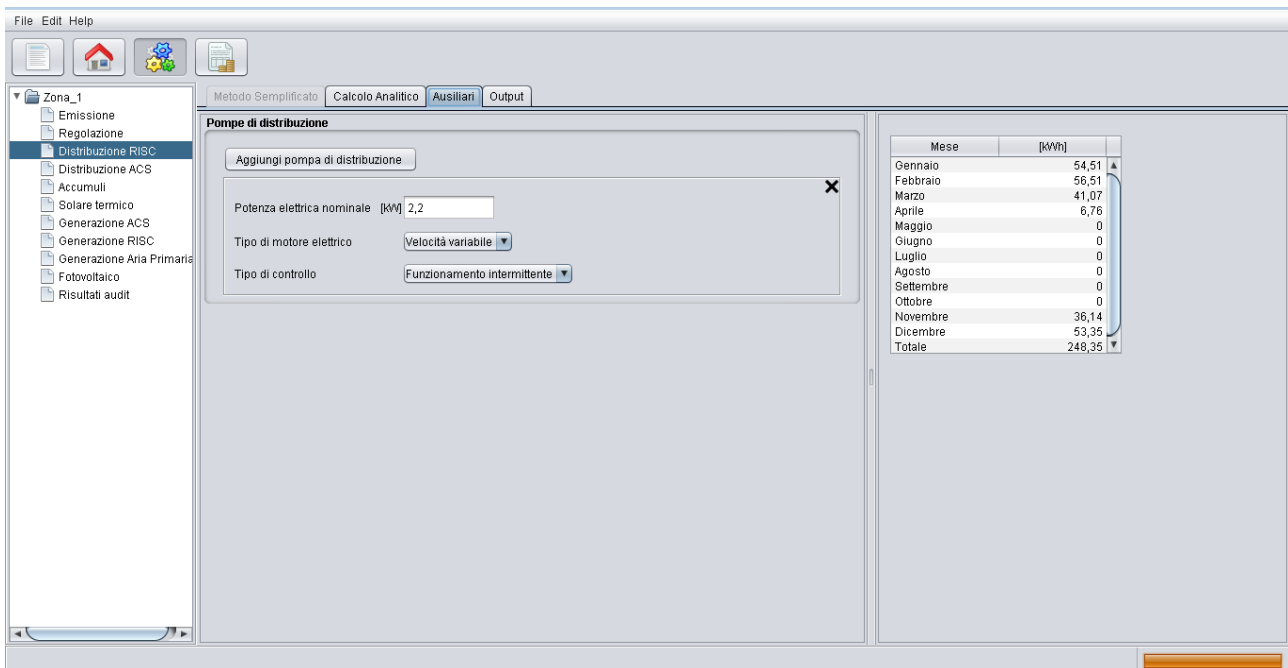


Figura 54: Intervento 6, modifica del controllo di funzionamento della pompa di distribuzione.

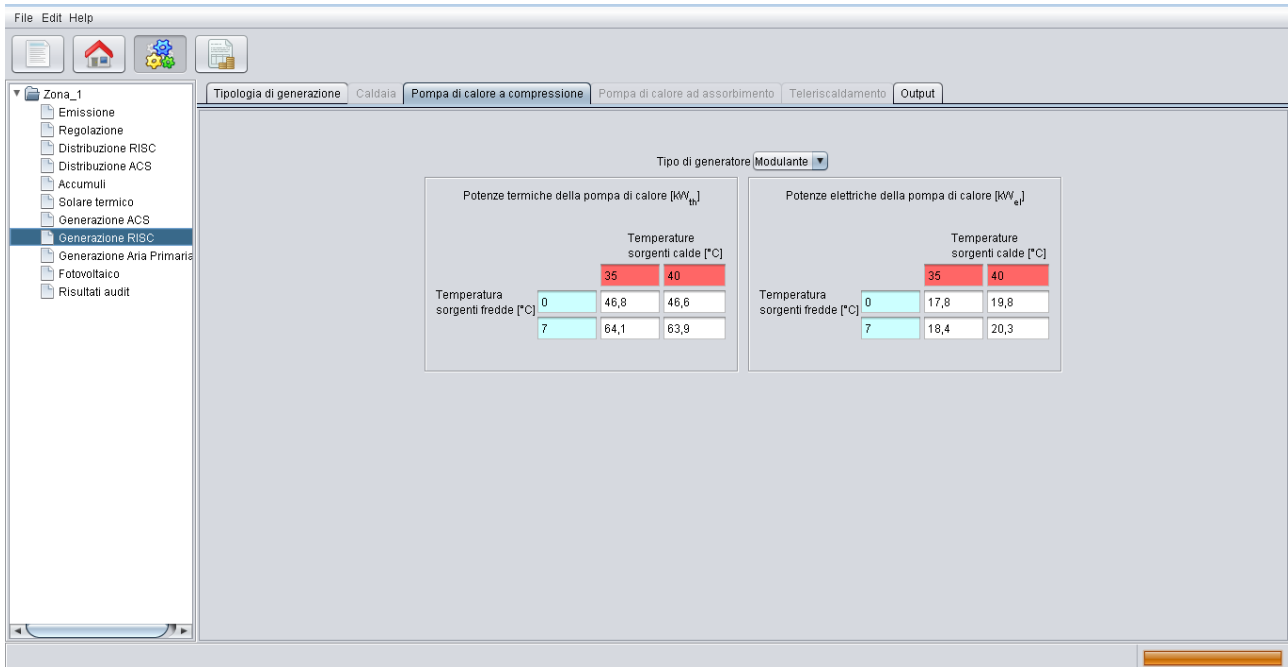


Figura 55: Intervento 6, dati caratteristici della pompa di calore.

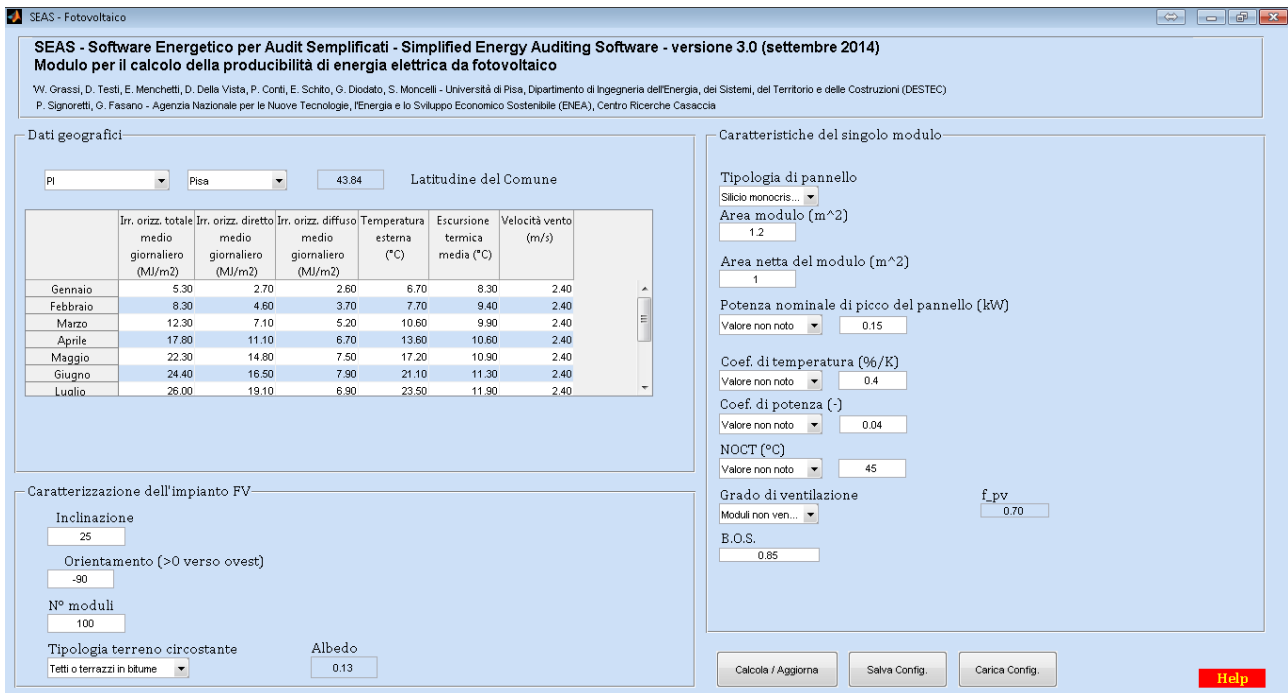


Figura 56: Intervento 7, inserimento dei dati di input per il sistema fotovoltaico nell'applicazione SEAS.

4.4.1 Analisi di sensitività energetica

In aggiunta agli interventi prima descritti, sono state effettuate tre analisi di sensitività ai fabbisogni energetici (per i risultati, si veda il Paragrafo 4.5.2):

- Sensitività all'isolamento: la soluzione scelta nell'intervento 4 è stata confrontata con l'utilizzo di un cappotto esterno così come descritto nella lista di interventi su software commerciale. Diversi spessori di isolamento sono stati confrontati, verificando la relativa riduzione delle richieste energetiche.
- Sensitività alla taglia della pompa di calore: la pompa di calore scelta nell'intervento 6 è stata confrontata con altre pompe di calore di taglia diversa, sia minore che maggiore, al fine di verificare e comparare le richieste di energia primaria nei vari casi. Tra le opzioni considerate, sono stati inseriti anche i dati riguardanti la pompa di calore utilizzata come intervento nel software commerciale.
- Sensitività alla superficie di moduli fotovoltaici: la superficie di moduli utilizzata nell'intervento 7 (100 m²) è stata sostituita con due altri valori, 50 e 150 m². Si sono quindi confrontati i risultati in termini di energia primaria richiesta all'edificio, al netto di quella elettrica prodotta col fotovoltaico.

Anche in questi casi, per ognuno dei vari interventi simulati in SEAS, è stata eseguita la corrispondente simulazione dinamica in TRNSYS, per ricalcolare il fabbisogno estivo per raffrescamento.

4.5 Simulazione degli interventi di retrofit su SEAS

4.5.1 Simulazione degli interventi di retrofit su SEAS

Come specificato nel Paragrafo 4.1.2, la lista di interventi è stata simulata step-by-step, con l'aggiunta incrementale di un intervento oltre a quelli già ipotizzati per il livello precedente.

In questo modo, è possibile verificare la riduzione dei consumi energetici da imputare a ciascun miglioramento, tenendo anche in conto gli eventuali effetti sinergici con gli interventi precedenti.

La Tabella 51 riporta il confronto tra i vari interventi simulati, in termini di:

- Energia elettrica per illuminazione e altri carichi (es. computer, apparecchiatura da ufficio), $E_{el, ce}$

- Energia elettrica associata al servizio di riscaldamento, $E_{el, risc}$;
- Energia termica (gas naturale) associata al servizio di riscaldamento, $E_{gas, risc}$;
- Energia elettrica associata al servizio di raffrescamento estivo, $E_{el, raffr}$;
- Energia elettrica annuale fornita dal sistema fotovoltaico, $E_{FV, tot}$;
- Energia elettrica annuale utilizzata dall'edificio (e quindi non venduta alla rete) proveniente da fotovoltaico, $E_{FV, u}$;
- Energia primaria complessiva, E_p , ottenuta utilizzando i fattori di conversione in energia primaria, con la formula $E_p = (E_{el, ce} + E_{el, risc} - E_{FV, u}) \cdot f_{el} + E_{gas, risc} \cdot f_{gas}$ ³.

Il confronto è effettuato considerando la singola zona, non l'edificio nel suo complesso.

Per quanto riguarda la suddivisione tra energia elettrica complessiva prodotta da fotovoltaico e quella utilizzata subito nell'edificio, si è fatto riferimento agli output specifici forniti da SEAS. Il surplus di energia elettrica da fotovoltaico, relativo ai soli mesi estivi, è stato considerato venduto in rete. Si faccia riferimento alla Tabella 52. Si noti che i valori in verde rappresentano proprio il surplus prodotto in estate dal sistema fotovoltaico.

³ I fattori di conversione sono riportati nel D.l. 26 giugno 2015 [6] e valgono: f_{el} 2.42, f_{gas} 1.05.

Tabella 51: Confronto dei vari fabbisogni energetici, tra caso base e i 7 livelli di interventi definiti.

	Caso base	Int. 1	Int. 2	Int. 3	Int. 4	Int. 5	Int. 6	Int. 7
		Sensibilizz. utenti	Reg. climatica	Doppia finestra	Isolam. pareti	Veneziane	Pompa di calore	Fotovoltaico
$E_{el, ce}$ [kWh]	21918	21015	21015	21015	21015	21015	21015	21015
$E_{el, risc}$ [kWh]	3447	3359	3341	3297	3093	3119	16433	16433
$E_{gas, risc}$ [kWh]	110513	102240	100349	93870	73006	75690	0	0
$E_{el, raffr}$ [kWh]	1009	1009	1009	608	942	364	199	199
$E_{FV, tot}$ [kWh]	0	0	0	0	0	0	0	15393
$E_{FV, u}$ [kWh]	0	0	0	0	0	0	0	13939
E_p [kWh]	179864	168779	166750	158870	137277	138760	91106	57373

Tabella 52: Bilancio di energia elettrica a Palazzo A10, a seguito dell'intervento 7. I valori in verde sono le quantità di energia elettrica prodotta dal fotovoltaico in surplus rispetto ai consumi della Zona_T1.

Energia elettrica per	Energia elettrica per	Energia elettrica per	Energia elettrica per	Energia elettrica prodotta da	Energia elettrica
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------------	-------------------

	riscaldamento [kWh]	illuminazione [kWh]	altri carichi elettrici [kWh]	raffrescamento [kWh]	sistema fotovoltaico [kWh]	prelevata dalla rete [kWh]
Gen.	3273	854	665	0	483	4308
Feb.	3546	1086	803	0	676	4759
Mar.	2955	1224	816	0	1095	3899
Apr.	666	1022	749	0	1518	918
Mag.	0	1224	816	0	1951	88
Giu.	0	1178	812	64	2059	-5
Lug.	0	1224	816	41	2272	-192
Ago.	0	305	332	40	1936	-1258
Set.	0	1178	812	53	1429	614
Ott.	0	1224	816	0	1010	1030
Nov.	2718	1178	812	0	536	4171
Dic.	3277	559	514	0	430	3920

La Figura 57 riporta il grafico con le richieste di energia primaria a seguito dei vari interventi. Come si nota, i primi due interventi non comportano elevati risparmi energetici, che invece si osservano a partire da interventi più importanti come l'isolamento delle finestre, l'utilizzo della pompa di calore e l'installazione del sistema fotovoltaico. D'altra parte, sia la sensibilizzazione degli utenti che l'installazione della centralina climatica sono interventi con minimo investimento economico. In Figura 58 è riportato invece il grafico dei risparmi energetici relativi ai vari interventi, rispetto al caso base.

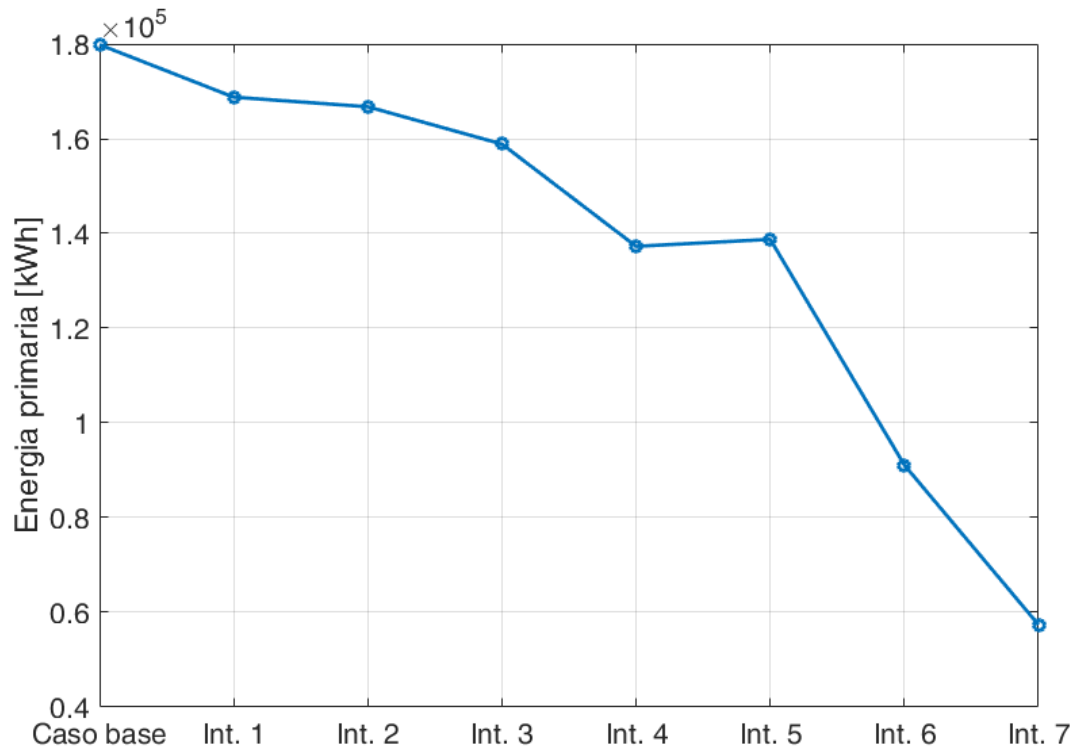


Figura 57: Confronto dei fabbisogno di energia primaria tra caso base ed i vari interventi proposti.

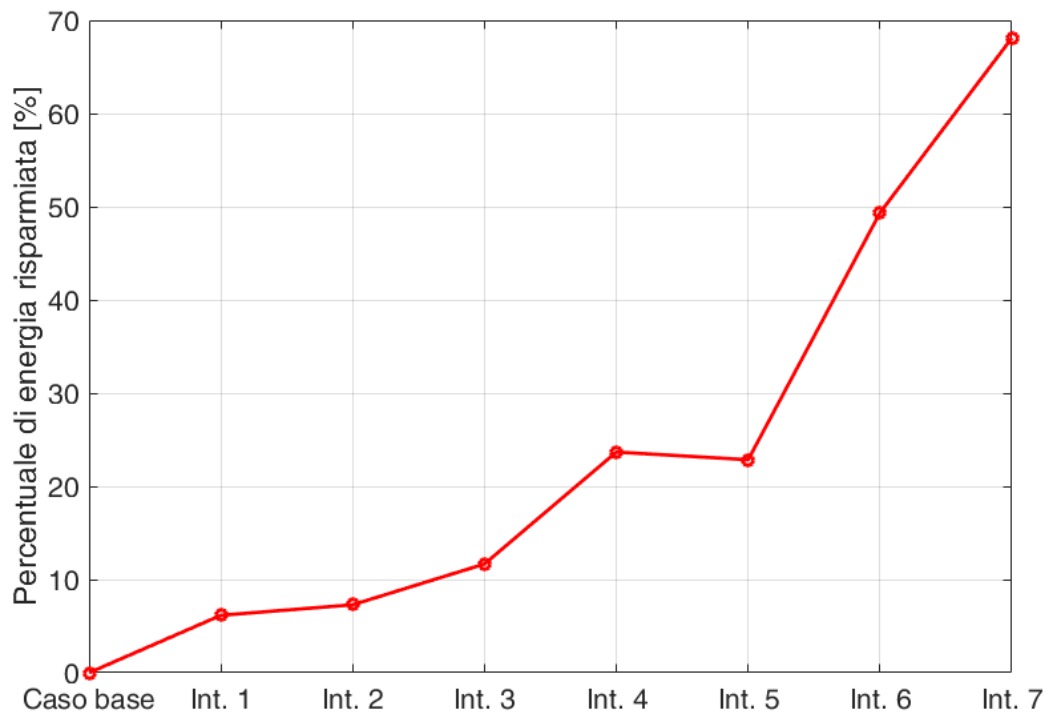


Figura 58: Risparmi percentuali di energia primaria tra caso base ed i vari interventi proposti.

4.5.2 Risultati dell'analisi di sensitività energetica

Come descritto precedentemente nel paragrafo 4.1.3, sono state condotte anche tre analisi di sensitività che avevano lo scopo di confrontare le richieste di energia primaria al variare dell'isolamento delle pareti esterne, della taglia della pompa di calore e della superficie del sistema fotovoltaico.

[Variazione delle richieste energetiche al variare dell'isolamento delle pareti](#)

Nella descrizione del tipo di isolamento scelto per la riduzione delle richieste al paragrafo 4.1.2, si è visto come, a causa dei vincoli architettonici posti dalla Soprintendenza, non sia possibile utilizzare la soluzione di cappotto esterno per la riduzione della trasmittanza termica delle pareti. Dall'altro lato, per non ridurre gli spazi interni e per non creare disagi agli utenti, anche la soluzione del cappotto interna è stata scartata. Di conseguenza, è stata simulata la soluzione con un intonaco termoisolante sull'interno delle pareti e il posizionamento di un cappotto esterno solamente su parte della superficie esterna.

Per raggiungere il livello di NZEB, invece, è necessaria l'installazione di un cappotto interno dello spessore di 12 cm. La prima analisi di sensitività è servita quindi a confrontare le richieste di energia primaria relative all'intervento 4 (intonaco termoisolante e cappotto esterno su corte) e quelle che si otterrebbero con l'installazione di un cappotto interno su tutte le pareti esterne. In particolare, 4 spessori sono stati presi in considerazione per l'isolante posto uniformemente su tutte le pareti: 5 cm, 8 cm, 10 cm e 12 cm. Per le caratteristiche dell'isolante simulato, si faccia riferimento alla Tabella 34. In Tabella 53 sono riportati i risultati di questa analisi, suddivisi sempre in:

- Energia elettrica per illuminazione e altri carichi (es. computer, apparecchiatura da ufficio), $E_{el, ce}$;
- Energia elettrica associata al servizio di riscaldamento, $E_{el, risc}$;
- Energia termica (gas naturale) associata al servizio di riscaldamento, $E_{gas, risc}$;
- Energia elettrica associata al servizio di raffrescamento, $E_{el, raffr}$;
- Energia primaria complessiva, E_p .

Si veda anche la Figura 59, in cui è riportata la percentuale di energia primaria risparmiata nei 5 casi considerati. Si nota che l'effetto di riduzione delle richieste energetiche ha quasi una "saturazione" all'aumentare dei centimetri di isolante.

L'intervento 4 consente già di ridurre di quasi il 25% le richieste di energia primaria rispetto al caso attuale. L'utilizzo di un cappotto interno di 12 cm porterebbe ad una riduzione ulteriore del 10%; tuttavia l'intervento avrebbe un costo elevato, molto maggiore rispetto a quello del caso 4.

Tabella 53: Confronto tra diversi spessore di isolante in termini dei vari componenti del bilancio energetico.

	Caso base	Int. 4	Int. 4a	Int. 4b	Int. 4c	Int. 4d
		Intonaco termoisolante + cappotto su corte				
			5 cm	8 cm	10 cm	12 cm
$E_{el, ce}$ [kWh]	21918	21015	21015	21015	21015	21015
$E_{el, risc}$ [kWh]	3447	3093	2995	2934	2909	2890
$E_{gas, risc}$ [kWh]	110513	73006	62998	56796	54237	52286
$E_{el, raffr}$ [kWh]	1009	942	617	538	537	532
E_p [kWh]	179864	137277	125745	118894	116144	114038

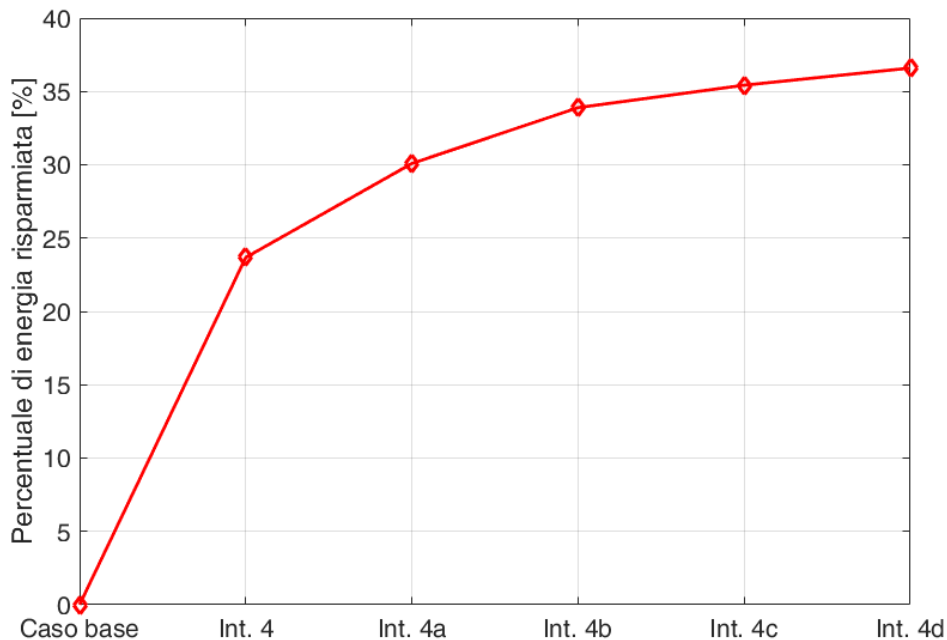


Figura 59: Risparmi percentuali di energia primaria al variare dello spessore di isolante.

[Variazione delle richieste energetiche al variare della taglia della pompa di calore](#)

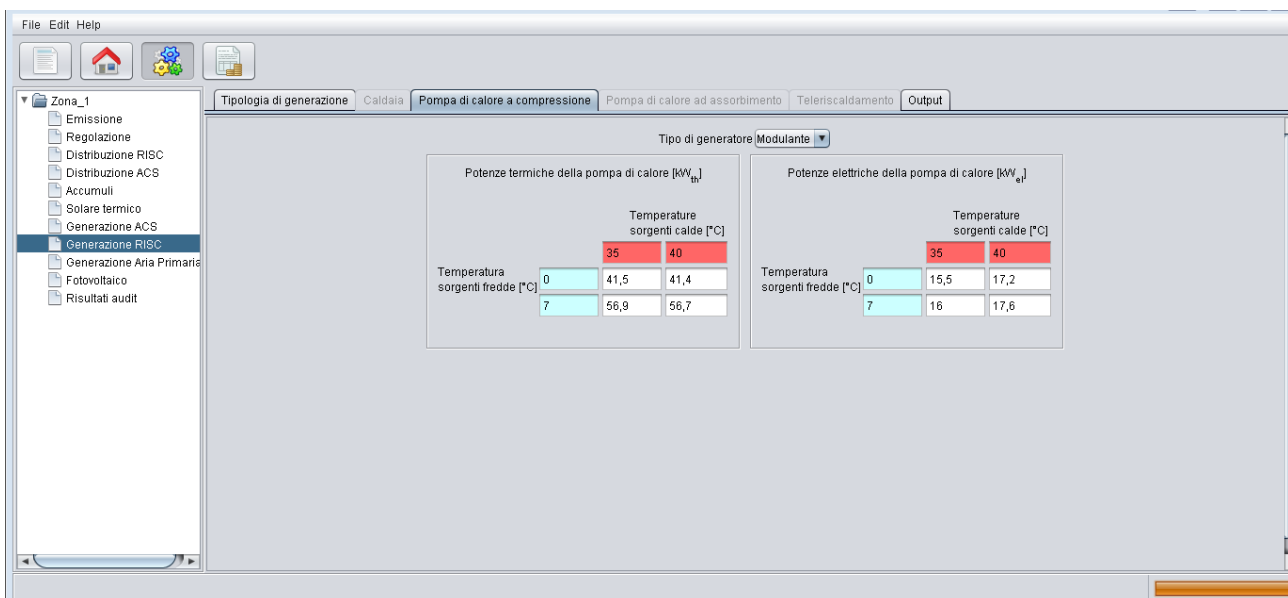
Un'altra analisi di sensitività che è stata effettuata è quella che confronta le richieste energetiche in seguito all'installazione di pompe di calore di taglie diverse.

Nell'intervento 6, la pompa di calore scelta ha potenza nominale 63.7 kW, con COP alle condizioni nominali di 2.9 (temperatura esterna: 7 °C, temperatura di mandata: 45 °C). Veniva comunque mantenuta la possibilità di utilizzare la caldaia attualmente presente nel caso in cui la pompa di calore non potesse soddisfare le richieste della zona.

Sono state prese in analisi altre 4 pompe di calore, che possono soddisfare anche al fabbisogno estivo di raffrescamento:

- Pompa di calore di taglia 56.5 kW, COP nominale 2.85 (temperatura esterna: 7 °C, temperatura di mandata: 45 °C), COP a diversi valori di temperatura esterna e temperatura di mandata come in Figura 60;

- Pompa di calore di taglia 70.9 kW, COP nominale 2.91 (temperatura esterna: 7 °C, temperatura di mandata: 45 °C), COP a diversi valori di temperatura esterna e temperatura di mandata come in Figura 61;
- Pompa di calore di taglia 82.8 kW, COP nominale 2.92 (temperatura esterna: 7 °C, temperatura di mandata: 45 °C), COP a diversi valori di temperatura esterna e temperatura di mandata come in Figura 62;
- Pompa di calore di taglia 51.3 kW, COP nominale 3.56 (temperatura esterna: 7 °C, temperatura di mandata: 45 °C), COP a diversi valori di temperatura esterna e temperatura di mandata come in Figura 63: questa pompa di calore è quella descritta al paragrafo 4.2.1, tra gli interventi necessari per rendere autonoma la Zona_T1 (Intervento NZEB_0). Questa pompa di calore è stata scelta perché di taglia simile a quella dell'intervento 6, mentre la pompa di calore dell'intervento NZEB_4 risulterebbe eccessivamente sottodimensionata.



Potenze termiche della pompa di calore [kW _{th}]			
		Temperature sorgenti calde [°C]	
		35	40
Temperatura sorgenti fredde [°C]	0	41,5	41,4
	7	56,9	56,7

Potenze elettriche della pompa di calore [kW _{el}]			
		Temperature sorgenti calde [°C]	
		35	40
Temperatura sorgenti fredde [°C]	0	15,5	17,2
	7	16	17,6

Figura 60: Caratteristiche della pompa di calore dell'intervento 6a.

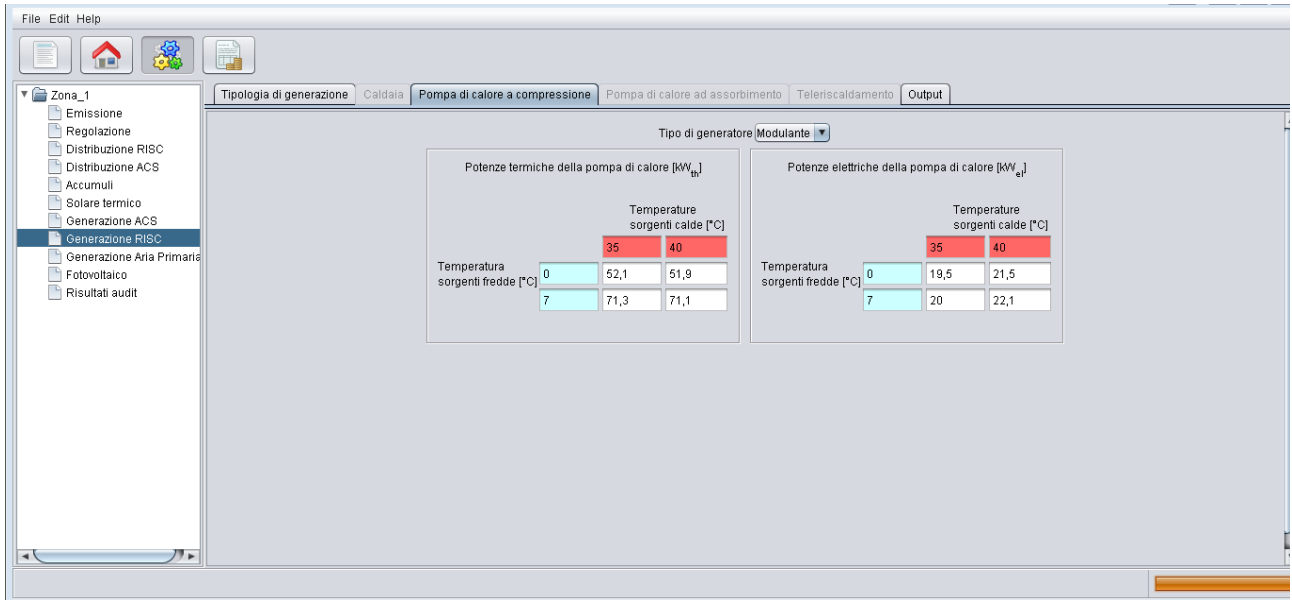


Figura 61: Caratteristiche della pompa di calore dell'intervento 6b.

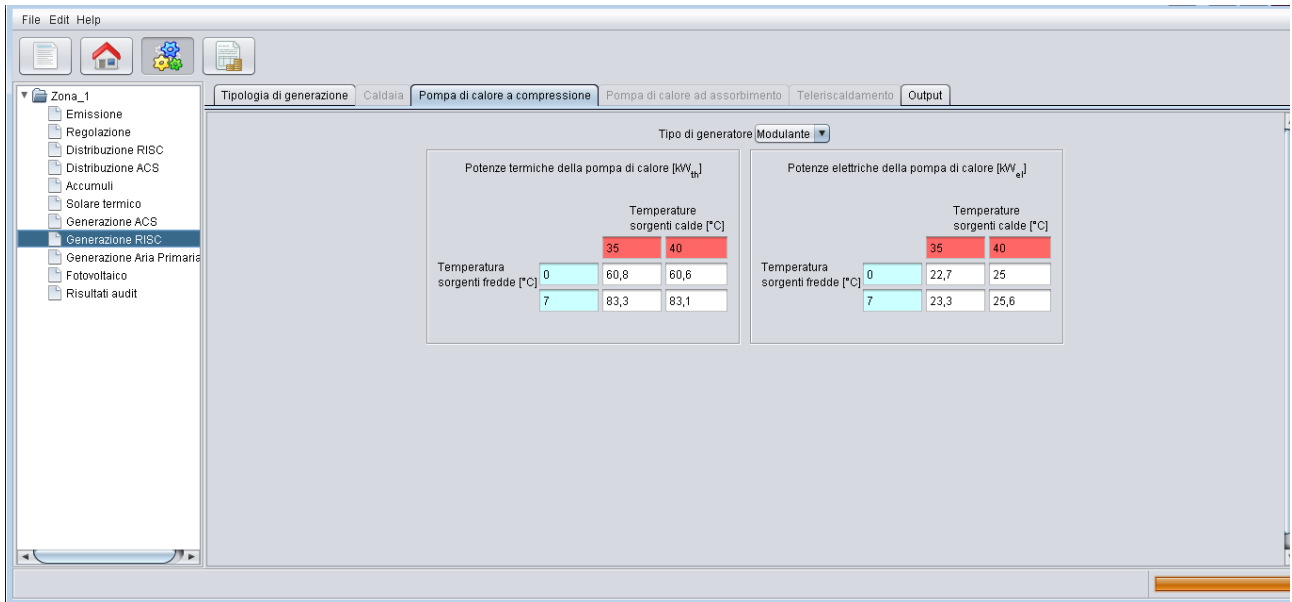


Figura 62: Caratteristiche della pompa di calore dell'intervento 6c.

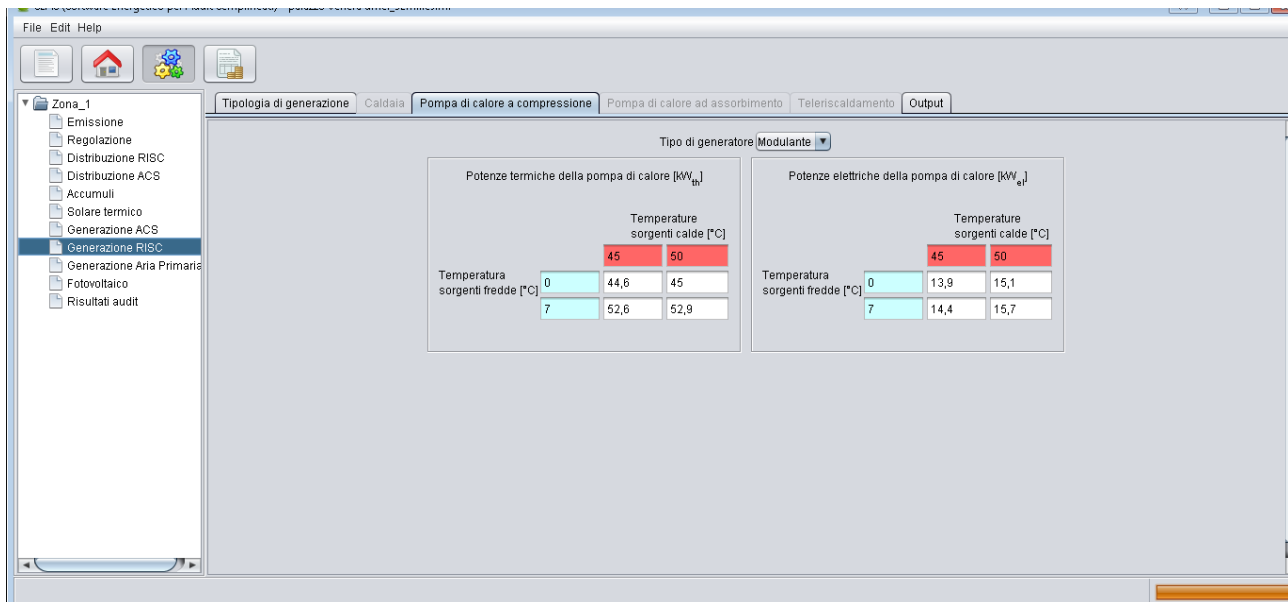


Figura 63: Caratteristiche della pompa di calore dell'intervento 6d.

Sono state considerate pompe di calore di taglia nominale maggiore o minore rispetto a quella scelta nell'intervento 6, di modo da verificare se funzionamenti a carichi parziali bassi o alti potesse contribuire alla riduzione delle richieste di energia primaria. Nel caso in cui la potenza erogata dalla pompa di calore non sia sufficiente a soddisfare le richieste dell'edificio, è prevista un'integrazione con energia termica prodotta con caldaia. L'energia per riscaldamento prodotta dalla caldaia di back-up è stata calcolata a partire dagli output di SEAS nella scheda "Generazione Risc", dove viene riportato il fattore di carico della pompa di calore mese per mese.

Dai risultati (Figure 64-68) si vede che sia per la pompa di calore da 56.5 kW che per quella da 51.3 kW è necessaria un'integrazione con caldaia nei mesi di dicembre e gennaio.

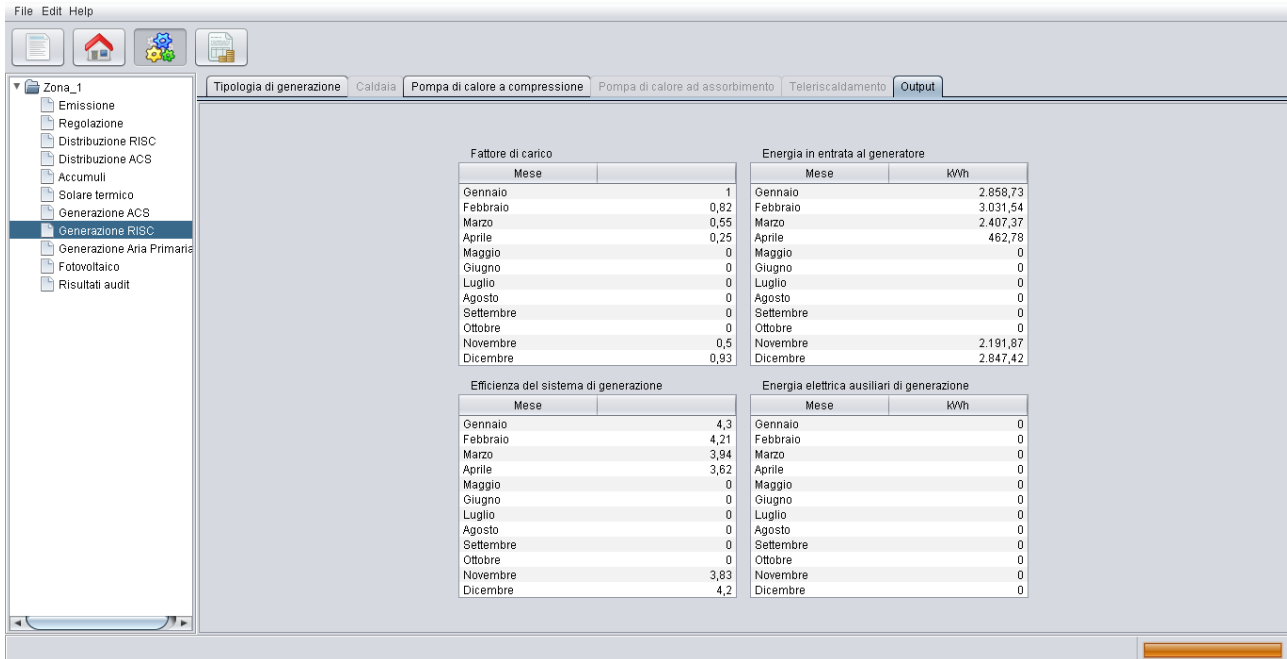


Figura 64: Risultati intermedi del sottosistema di generazione con la pompa di calore dell'intervento 6.

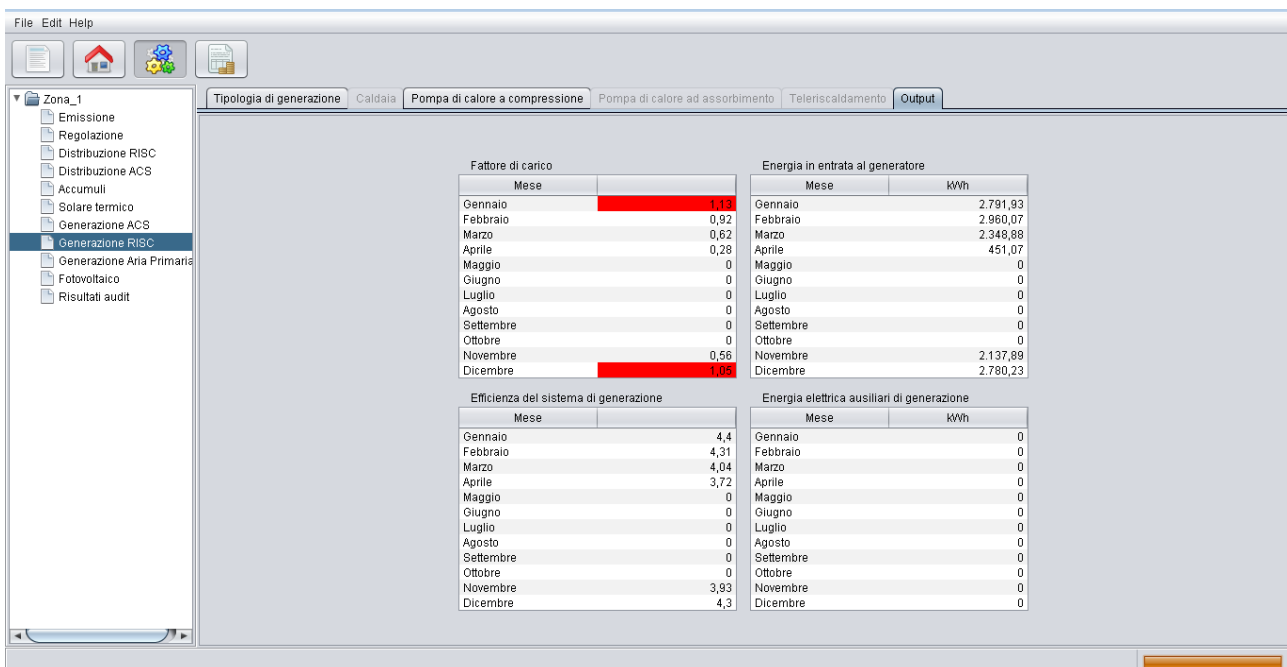


Figura 65: Risultati intermedi del sottosistema di generazione con la pompa di calore dell'intervento 6a.

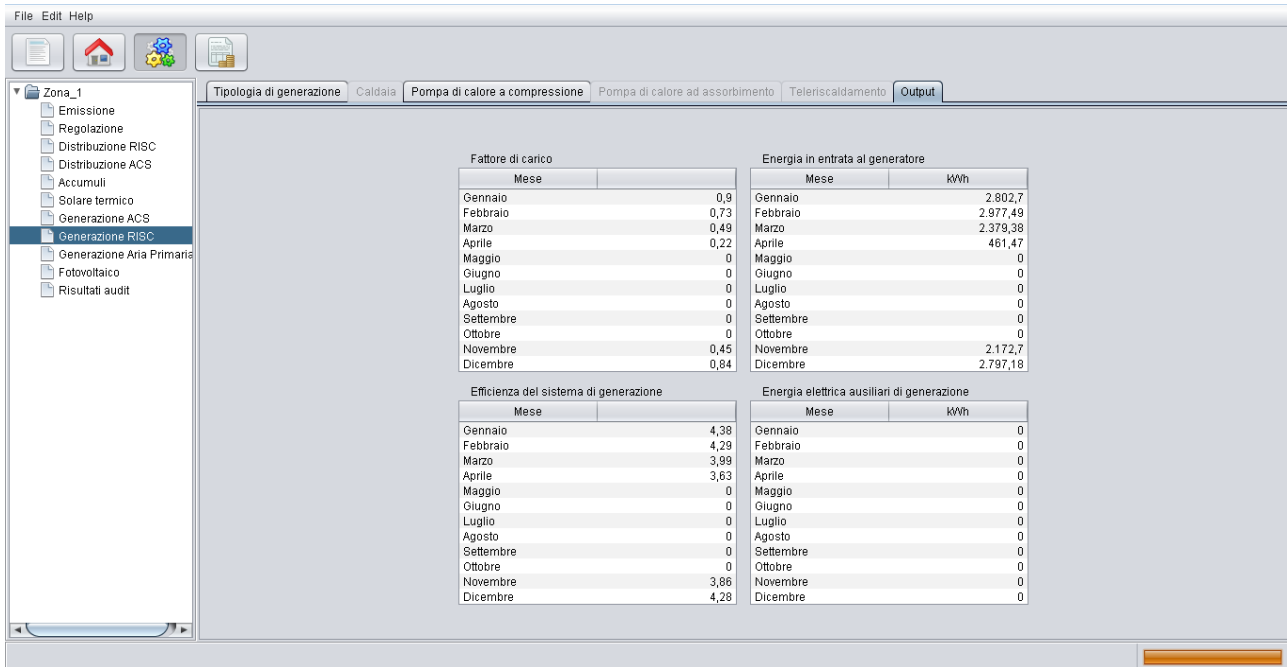


Figura 66: Risultati intermedi del sottosistema di generazione con la pompa di calore dell'intervento 6b.

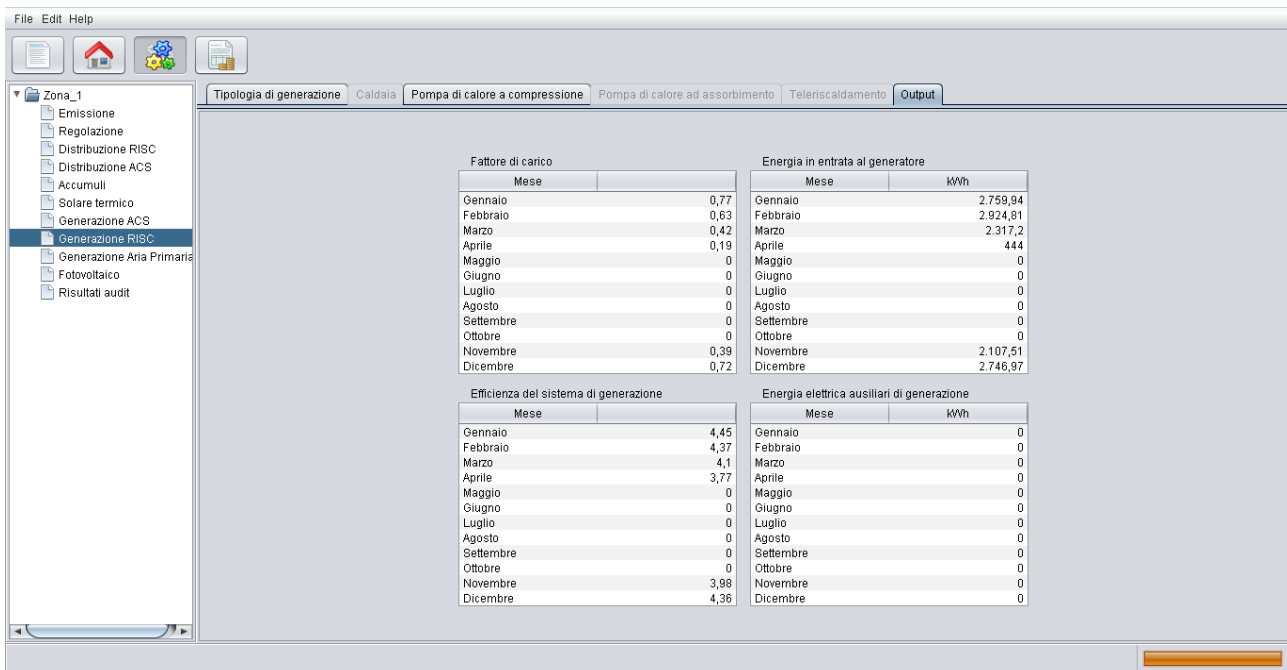


Figura 67: Risultati intermedi del sottosistema di generazione con la pompa di calore dell'intervento 6c.

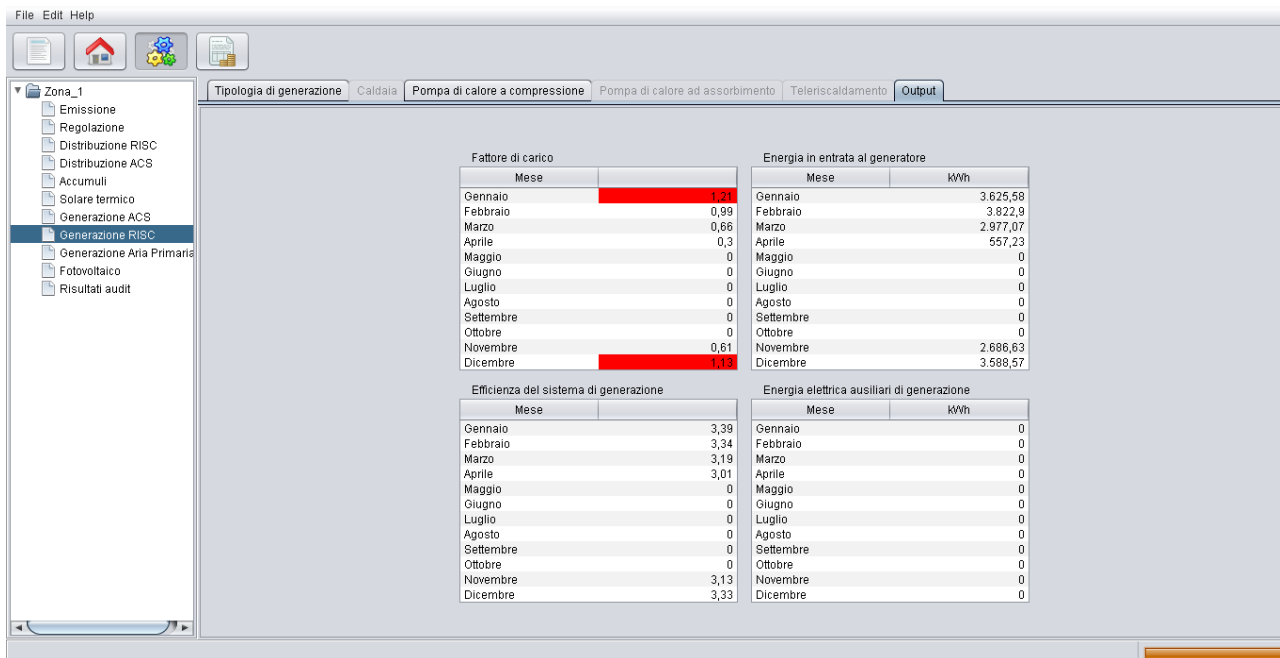


Figura 68: Risultati intermedi del sottosistema di generazione con la pompa di calore dell'intervento 6d.

I risultati complessivi delle ulteriori 4 simulazioni sono riportati in Tabella 54, sempre in termini di energia elettrica per usi di illuminazione e altri carichi ($E_{el, ce}$), energia elettrica per riscaldamento ($E_{el, risc}$), energia termica da gas naturale per riscaldamento ($E_{gas, risc}$) ed energia primaria (E_p).

Tabella 54: Confronto tra diverse taglie di pompe di calore, in termini dei vari componenti del bilancio energetico.

	Caso base	Int. 6	Int. 6a	Int. 6b	Int. 6c	Int. 6d
		PdC 63.7 kW	PdC 56.5 kW	PdC 70.9 kW	PdC 82.8 kW	PdC 51.3 kW
$E_{el, ce}$ [kWh]	21919	21015	21015	21015	21015	21015
$E_{el, risc}$ [kWh]	3447	16434	16301	16225	15934	19892
$E_{gas, risc}$ [kWh]	110513	0	508	0	0	1227
$E_{el, raffr}$ [kWh]	1009	199	197	196	192	240

E_p [kWh]	179866	91106	91315	90595	89881	100864
-------------	--------	-------	-------	-------	-------	--------

Non si notano né riduzioni né incrementi significativi di energia primaria al variare delle taglie delle pompe di calore: quasi tutte le scelte (ad eccezione dell'ultima) comportano risparmi rispetto al caso base di circa il 50% (si veda Figura 69). L'ultima tipologia di pompa di calore, nonostante il COP nominale maggiore rispetto agli altri casi, è quella con le maggiori richieste di energia primaria: a differenza delle altre pompe di calore, infatti, le prestazioni e la potenza termica fornita rimangono più o meno costanti al variare delle temperature delle sorgenti, mentre negli altri casi, con temperature esterne miti, la potenza termica e il relativo COP aumentano sensibilmente.

Nonostante le minime differenze in termini di energia primaria, per l'analisi economica è stata scelta la pompa di calore dell'intervento 6. Nel calcolo dell'energia elettrica necessaria al funzionamento del generatore, infatti, non sono state considerate le perdite associate ai cicli on-off, che contribuiscono ad aumentare le richieste energetiche. I cicli on-off aumentano all'aumentare della taglia nominale della pompa di calore, in quanto più facilmente vengono raggiunti i carichi minimi ai quali la pompa di calore può modulare. Una pompa di calore sottodimensionata, invece, avrebbe migliori prestazioni dal punto di vista dei cicli on-off, ma avrebbe maggiori difficoltà a soddisfare le richieste energetiche dell'edificio in condizioni non ordinarie (inverni più rigidi, estati più calde).

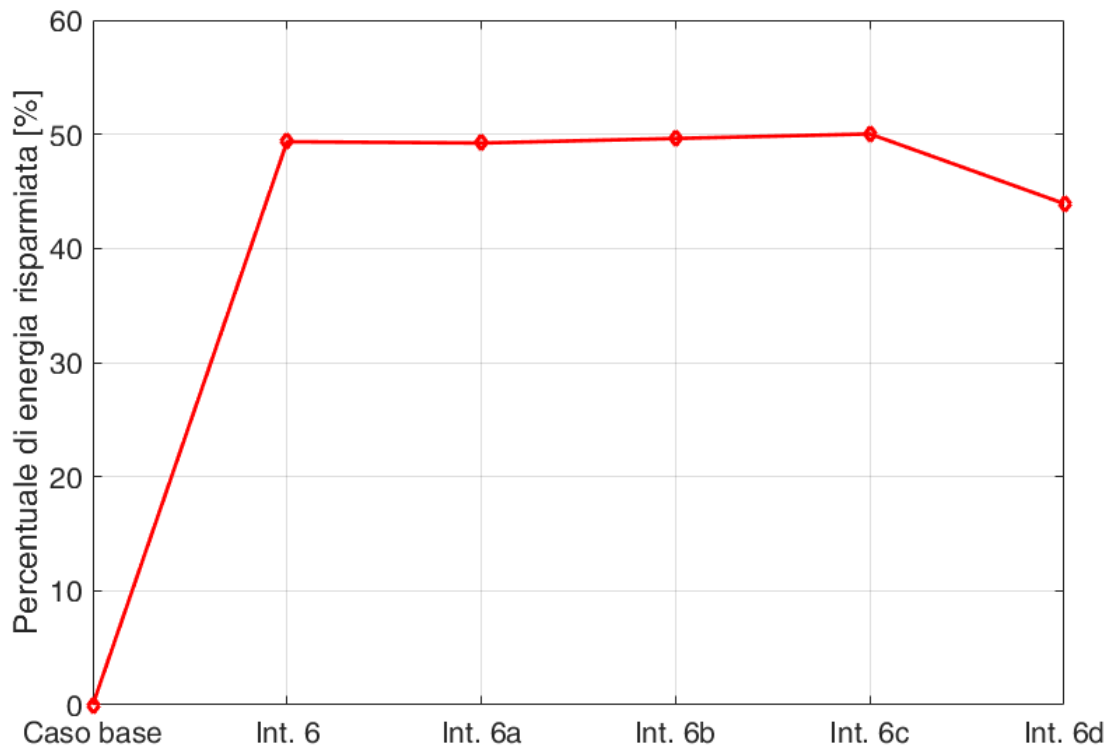


Figura 69: Risparmi percentuali di energia primaria al variare della taglia della pompa di calore.

[Variazione delle richieste energetiche al variare della superficie adibita a fotovoltaico](#)

L'ultima analisi di sensitività è quella che ha confrontato le richieste di energia primaria dell'edificio in presenza di un sistema fotovoltaico di 50 m² e di 150 m², rispetto alla soluzione scelta nell'intervento 7 del paragrafo 4.1.2, che prevede una superficie di 100 m² adibita a fotovoltaico. Anche in questo caso, SEAS ha fornito come output i valori di energia elettrica prodotta mensilmente dal sistema fotovoltaico, sottraendoli alle richieste elettriche per illuminazione, carichi di apparecchiature elettriche, ausiliari per riscaldamento e pompa di calore. La Tabella 55 e Tabella 56 riportano i vari termini del bilancio di energia elettrica dell'edificio, nel caso di 50 m² o 150 m², rispettivamente. In entrambi i casi, i valori in verde nella colonna "Energia elettrica prelevata dalla rete" rappresentano le quote di energia elettrica in surplus prodotta dal sistema fotovoltaico venduta in rete.

Tabella 55: Bilancio di energia elettrica nella Zona_T1, a seguito dell'intervento 7a. I valori in verde sono le quantità di energia elettrica prodotta dal fotovoltaico in surplus rispetto ai consumi della Zona_T1.

	Energia elettrica per riscaldamento [kWh]	Energia elettrica per illuminazione [kWh]	Energia elettrica per altri carichi elettrici [kWh]		Energia elettrica prodotta da sistema fotovoltaico [kWh]	Energia elettrica prelevata dalla rete [kWh]
Gennaio	3273	854	665	0	241	4550
Febbraio	3546	1086	803	0	338	5096
Marzo	2955	1224	816	0	547	4447
Aprile	666	1022	749	0	759	1678
Maggio	0	1224	816	0	976	1064
Giugno	0	1178	812	64	1029	1024
Luglio	0	1224	816	41	1136	944
Agosto	0	305	332	40	968	-290
Settembre	0	1178	812	53	714	1329
Ottobre	0	1224	816	0	505	1535
Novembre	2718	1178	812	0	268	4440
Dicembre	3277	559	514	0	215	4135

Tabella 56: Bilancio di energia elettrica nella zona_T1, a seguito dell'intervento 7b. E valori in verde sono le quantità di energia elettrica prodotta dal fotovoltaico in surplus rispetto ai consumi della Zona_T1.

	Energia elettrica per riscaldamento	Energia elettrica per illuminazione	Energia elettrica per altri carichi	Energia elettrica prodotta da sistema fotovoltaico [kWh]	Energia elettrica prelevata dalla
--	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--	-----------------------------------

	[kWh]	e [kWh]	elettrici [kWh]		rete [kWh]
Gennaio	3273	854	665	724	4067
Febbraio	3546	1086	803	1013	4421
Marzo	2955	1224	816	1642	3352
Aprile	666	1022	749	2278	159
Maggio	0	1224	816	2927	-887
Giugno	0	1178	812	3088	-1098
Luglio	0	1224	816	3408	-1368
Agosto	0	305	332	2903	-2266
Settembre	0	1178	812	2143	-154
Ottobre	0	1224	816	1515	525
Novembre	2718	1178	812	804	3903
Dicembre	3277	559	514	645	3704

In Tabella 57, invece, sono confrontati i tre casi di retrofit con i diversi valori di superficie di fotovoltaico (intervento 7, con 100 m², e poi 50 m² e 150 m²), rispetto anche alla configurazione attuale.

Tabella 57: Confronto tra diverse superfici di moduli fotovoltaici, in termini dei vari componenti del bilancio energetico.

	Caso base	Int. 7	Int. 7a	Int. 7b
		Fotovoltaico (100 m ²)	Fotovoltaico (50 m ²)	Fotovoltaico (150 m ²)

$E_{el, ce}$ [kWh]	21918	21015	21015	21015
$E_{el, risc}$ [kWh]	3447	16433	16433	16433
$E_{gas, risc}$ [kWh]	110513	0	0	0
$E_{el, raffr}$ [kWh]	1009	199	199	199
$E_{FV, tot}$ [kWh]	0	15393	7696	23090
$E_{FV, u}$ [kWh]	0	13939	7406	17515
E_p [kWh]	179864	57373	73183	48719

La soluzione con 50 m² di moduli fotovoltaici rappresenta la soluzione tipica per "autoconsumo": quasi tutta l'energia elettrica prodotta, infatti, viene utilizzata immediatamente per gli usi dell'edificio (illuminazione, carichi da apparecchi elettrici, pompa di calore e ausiliari di riscaldamento). Il caso con 150 m², invece, mostra come una superficie così estesa di moduli fotovoltaici sia, per questo edificio, eccessiva. L'energia elettrica prodotta in surplus verrebbe venduta in rete da maggio a settembre compresi, ma il prezzo a cui viene venduta non ripaga del costo iniziale da sostenere per l'installazione del sistema fotovoltaico.

4.6 *Analisi dei costi degli interventi di retrofit*

Per una verosimile stima della fattibilità economica, oltre che tecnica, degli interventi di retrofit proposti, abbiamo stimato, intervento per intervento, la spesa economica di massima associata. Si riportano le due tabelle con i prezzi unitari e con le quantità relativamente agli interventi finalizzati all'NZEB e a quelli decisi a seguito della simulazione di diagnosi.

Si specifica che il valore indicato nelle tabelle sottostanti è relativo alla fornitura e posa in opera e comprende anche le spese professionali di progettazione. Al contrario, i prezzi non comprendono possibili ribassi o sconti. Si tenga conto che tali valori sono esemplificativi, in quanto possono essere suscettibili di variazioni, anche notevoli, a seconda del contesto dell'appalto in cui sono inseriti, a seconda del ribasso effettuato e della zona geografica di realizzazione. Per ogni tipologia di intervento, i prezzi dettagliati sono riportati in Tabella 58 e Tabella 59, rispettivamente.

I prezzi riportati sono desunti principalmente da analisi di mercato, dal prezzario OOPP Regione Toscana 2017, da listino prezzi delle macchine scelte o da analoghi lavori realizzati.

Tabella 58: Prezzi unitari e spese economiche iniziali per gli interventi di retrofit analizzati (finalizzati all’NZEB) ottenuti da prezzari e indagini di mercato.

INTERVENTI FINALIZZATI	U.M.	Q.TA	Prezzo unitario [€]	TOTALE (IVA 22 % incl.)	Intervento
ALL’NZEB					
Pompa di calore aria-acqua (50 kW)	-	1	19000	23180 €	NZEB_0, NZEB_1, NZEB_2, NZEB_3
Sonda climatica (per pompa di calore 50 kW)	-	1	350	427 €	NZEB_0, NZEB_1, NZEB_2, NZEB_3
Sistema fotovoltaico (100 m²)	kW	15	1800	32940 €	NZEB_0, NZEB_1, NZEB_2, NZEB_3
Caldaia di integrazione (24 kW)	-	1	2300	2806 €	NZEB_0, NZEB_1, NZEB_2, NZEB_3, NZEB_4, NZEB_4_175
Isolante in polistirene (5 cm) e barriera al vapore	m ²	1131	55	75890 €	NZEB_1
Isolante in polistirene (12 cm) e barriera al vapore	m ²	1131	60	82789 €	NZEB_2, NZEB_3, NZEB_4, NZEB_4_175
Controfinestra	m ²	33.7	500	20557 €	NZEB_2, NZEB_3, NZEB_4, NZEB_4_175
Tendaggi alla veneziana	-	57	85	5911 €	NZEB_3, NZEB_4, NZEB_4_175
Pompa di calore aria-acqua (13 kW)	-	1	7200	8784 €	NZEB_4, NZEB_4_175
Sonda climatica (per pompa	-	1	350	427 €	NZEB_4, NZEB_4_175

di calore 13 kW)					
Sistema fotovoltaico (400 m²)	kW	60	1500	109800 €	NZEB_4
Sistema fotovoltaico (175 m²)	kW	26.25	1800	57645 €	NZEB_4_175

Tabella 59: Prezzi unitari e spese economiche iniziali per gli interventi di retrofit analizzati (in seguito a diagnosi) ottenuti da prezzari e indagini di mercato.

<u>INTERVENTI DECISI IN SEGUITO A DIAGNOSI</u>	U.M.	Q.TA	Prezzo unitario [€]	TOTALE (IVA 22 % incl.)	Intervento
Sensibilizzazione utenti	-	1	300	366 €	1-7
Sonda climatica (per caldaia 250 kW)	-	1	1650	2013 €	2-5
Controfinestra	m ²	33.7	500	20557 €	3-7
Intonaco termoisolante (3 cm)	m ²	816.8	64	63776 €	4-7
Isolante in polistirene (12 cm) e barriera al vapore	m ²	217.9	60	15950 €	4-7
Tendaggi alla veneziana	-	57	85	5911 €	5-7
Pompa di calore aria-acqua (60 kW)	-	1	19000	23180 €	6-7
Sonda climatica (per pompa di calore 60 kW)	-	1	350	427 €	6-7
Sistema fotovoltaico (100 m²)	kW	15	1800	32940 €	7

In Tabella 60 e Tabella 61 sono riportati i costi complessivi per ciascun set di interventi, rispettivamente finalizzati all’NZEB e in seguito a diagnosi energetica. Sono riportati, nella relativa colonna, anche gli importi totali incentivati attraverso “EcoBonus” (detrazione del 65% su 10 anni).

Tabella 60: Costi complessivi per ognuno degli interventi NZEB.

	Totale [€]	Totale incentivi [€]
NZEB_0	59353	15067
NZEB_1	135243	64396
NZEB_2	162699	75067
NZEB_3	168610	78909
NZEB_4	231074	69552*
NZEB_4_175	176113	69552

*Utilizzando l’incentivo “Conto Termico 2.0”, per gli edifici che soddisfano tutti i requisiti di NZEB è possibile ottenere un incentivo del 65% su tutta la spesa, erogato in 5 anni. Dunque nel caso NZEB_4, si otterrebbero in totale 150198 €.

Tabella 61: Costi complessivi per ognuno degli interventi decisi in seguito alla diagnosi.

	Totale [€]	Totale incentivi [€]
Intervento 1	366	0
Intervento 2	2379	0
Intervento 3	22936	13362
Intervento 4	102662	60000
Intervento 5	108573	63842
Intervento 6	130167	78909
Intervento 7	163107	78909

4.7 Analisi economica e di sensitività

Sulla base dei costi riportati nel precedente paragrafo 4.6, è stata svolta l'analisi economica degli interventi di retrofit energetico. Essa comprende il calcolo dei seguenti indicatori:

- tempo di ritorno semplice (**TRS**) [anni]: il tempo stimato in cui i ricavi non attualizzati dovuti all'intervento eguagliano i costi non attualizzati;
- tempo di ritorno attualizzato (**TR**) [anni]: il tempo stimato in cui i ricavi attualizzati dovuti all'intervento eguagliano i costi attualizzati;
- indice di profitto (**IP**) [-]: il valore attuale netto dell'investimento al termine della vita utile diviso l'investimento iniziale;
- indice energetico globale (**IEG**) [kWh/€]: il rapporto tra i kWh risparmiati a seguito dell'intervento e il costo complessivo dell'intervento;
- valore netto semplice (**VN**) [k€]: la differenza della cumulata dei flussi di cassa, a fine della vita utile, tra lo scenario con intervento e lo scenario base, ipotizzando il tasso di interesse, il tasso di inflazione e i tassi di aumento dei TEE e dei prezzi dell'energia nulli;

- valore attuale netto (**VAN**) [k€]: la sommatoria dei flussi di cassa attualizzati, calcolata al termine della vita utile;
- costo totale semplice (**CT**) [k€]: il costo totale calcolato alla fine della vita utile, che comprende sia i costi di intervento, di manutenzione e dei vettori energetici;
- tasso interno di rendimento (**TIR**) [%]: il tasso interno del rendimento che rende nullo il VAN.

Per l'intervento conclusivo tra quelli finalizzati all'NZEB (NZEB_4_175) e per quello più completo di diagnosi energetica (Intervento 7), è stata poi eseguita un'analisi di sensitività ai parametri economici più incerti: tasso di inflazione del prezzo dell'energia elettrica, tasso di inflazione del prezzo del gas naturale e tasso di interesse per l'attualizzazione.

4.7.1 Analisi economica e di sensitività sugli interventi finalizzati all'NZEB

Tutti gli interventi finalizzati all'NZEB sono stati valutati dal punto di vista economico, utilizzando la routine esterna di SEAS 3.0, detta "Analisi economica". Si sono utilizzati come input:

- Tempo di valutazione degli indicatori economici: 20 anni dalla riqualificazione (gli interventi con vita utile più breve si intendono ripetuti);
- tasso di interesse pari a 4%;
- tasso di inflazione pari a 1%;
- prezzo dell'energia elettrica: 0.162 €/kWh;
- prezzo del gas naturale: 0.072 €/kWh;
- tasso annuo di aumento del prezzo dell'energia elettrica: 2%;
- tasso annuo di aumento del prezzo del gas naturale: 2%.

I vari indicatori economici sono riportati in Tabella 62. Si noti come l'intervento NZEB_0 (installazione del sistema di generazione autonomo per la zona) non è conveniente: è necessario associare a questo intervento anche altre soluzioni per far sì che la riqualificazione energetica sia anche economicamente conveniente. Si noti inoltre che anche per gli interventi NZEB_4 e NZEB_4_175 non risulta la convenienza economica: la spesa necessaria per la maggiore superficie adibita a fotovoltaico, benché porti l'edificio in categoria NZEB come previsto dalla legge, è maggiore dei ridotti costi per l'energia elettrica per effetto

dell'autoproduzione. Nell'ultima colonna, sono riportati i valori degli indicatori economici calcolati per l'intervento NZEB_4 utilizzando però l'incentivo "Conto Termico 2.0". In questo caso, invece, gli indicatori economici evidenziano la convenienza dell'intervento. Questo risultato evidenzia quindi come gli incentivi come il conto termico risultano essere fondamentali per garantire la convenienza economica degli interventi per rendere NZEB gli edifici.

Tabella 62: Indicatori economici degli interventi finalizzati all' NZEB (n.a. significa "non applicabile").

	NZEB_0	NZEB_1	NZEB_2	NZEB_3	NZEB_4	NZEB_4_175	NZEB_4_CT
TRS [anni]	n.a.	10	10	10	17	17	9
TR [anni]	n.a.	13	13	13	n.a.	n.a.	12
IP [-]	-1.1	0.5	0.6	0.6	-0.2	-0.2	0.4
IEG [kWh/€]	0.02	0.5	0.6	0.6	0.4	0.2	0.4
VN [€]	-32630	80180	105810	110760	30090	23280	110740
VAN [€]	-67780	64360	90140	94890	-43690	-34250	95150
CT* [€]	276120	163310	137680	132730	213400	220210	132750
TIR [%]	n.a.	7.1	7.6	7.6	2.6	2.5	7.6

Sull'intervento finale, NZEB_4_175, è stata effettuata anche un'analisi di sensitività al variare di alcuni parametri economici: tasso di interesse, tasso annuo di aumento del prezzo dell'energia elettrica e tasso annuo di aumento del prezzo del gas naturale. In questo caso, il confronto è stato fatto sui seguenti indicatori economici: tempo di ritorno attualizzato (TR), indice di profitto (IP), valore attuale netto (VAN) e tasso interno di rendimento (TIR). I risultati degli indicatori economici relativi all'analisi di sensitività sono riportati in Tabella 63. I valori evidenziano che anche l'intervento NZEB_4_175 può risultare economicamente conveniente, solamente nel caso in cui il tasso di interesse scenda o il tasso di aumento del prezzo del gas naturale salga. Nel caso invece di aumento del costo dell'energia elettrica, l'intervento

non è conveniente in quanto l'autoproduzione da fotovoltaico non è sufficiente a bilanciare i costi di energia elettrica dovuti all'utilizzo della pompa di calore e degli altri carichi elettrici.

Tabella 63: Analisi di sensitività per l'intervento NZEB_4_175.

	TR	IP	VAN	TIR
NZEB_4_175 (base)	n.a.	-0.2	-34250	2.5
NZEB_4_175 – tasso di interesse 6%	n.a.	-0.6	-107170	2.5
NZEB_4_175 – tasso di interesse 2%	19	0.1	10480	2.5
NZEB_4_175 – tasso di aumento energia elettrica 5%	n.a.	-0.4	-76300	0.1
NZEB_4_175 – tasso di aumento gas 5%	18	0.2	36720	5.3

4.7.2 Analisi economica e di sensitività sugli interventi di diagnosi energetica

L'analisi economica degli interventi scelti a seguito della diagnosi energetica è stata condotta (anche in questo caso) direttamente nella routine esterna "Analisi economica" di SEAS 3.0. Avendo impiegato la metodologia A3 (tailored rating) ed avendo già ottenuto convergenza tra fabbisogni simulati e reali allo stato di fatto, si sono potuti inserire direttamente i dati di output forniti da SEAS in termini di consumi pre- e post- intervento.

Come specificato precedentemente nel paragrafo 4.6, si è considerata la possibilità di accedere alla detrazione fiscale del 65% per alcune tipologie di interventi.

Nel caso base sono stati utilizzati i seguenti valori:

- Prezzo dell'energia elettrica: 0.162 €/kWh;
- Prezzo del gas naturale: 0.072 €/kWh;
- Tasso di interesse: 4%;
- Tasso di inflazione: 1%;

- Tasso di aumento del prezzo dell'energia elettrica: 2%;
- Tasso di aumento del prezzo del gas naturale: 2%.

In Tabella 64 sono riportati gli indicatori economici forniti da SEAS per i 7 interventi. Tutti i parametri economici sono valutati a 20 anni dalla riqualificazione. Gli interventi con vita utile più breve si intendono ripetuti.

Tabella 64: Indicatori economici degli interventi decisi in seguito alla diagnosi.

	Int. 1	Int. 2	Int. 3	Int. 4	Int. 5	Int. 6	Int. 7
TRS [anni]	1	4	8	9	9	8	9
TR [anni]	1	4	9	12	12	9	11
IP [-]	45.5	6.8	1.3	0.6	0.5	1.0	0.9
IEG [kWh/€]	29.2	5.3	0.9	0.4	0.4	0.6	0.7
VN [€]	11380	11440	27290	71460	70940	130050	142270
VAN [€]	16650	16120	30660	62010	58840	136850	142940
CT* [€]	232110	232050	216200	172030	172550	113440	101220
TIR [%]	162.3	31.1	12.0	8.1	7.7	10.6	9.4

*Il costo totale, in assenza di interventi, è di 243490 €.

I risultati in Tabella 64 mostrano che questi interventi sono economicamente convenienti, con tempi di ritorno attualizzati di circa 10 anni e alti TIR. Ovviamente questi risultati rispecchiano l'obiettivo della diagnosi energetica: gli interventi simulati sono stati scelti mirando proprio al miglioramento di quei sottosistemi con maggiori perdite energetiche e, inoltre, sono stati definiti su un'ottica di tipo ottimizzazione costi-benefici.

In conclusione, sull'intervento finale (Intervento 7), è stata effettuata anche un'analisi di sensitività al variare di alcuni parametri economici: tasso di interesse, tasso annuo di aumento del prezzo dell'energia elettrica, tasso annuo di aumento del prezzo del gas naturale. Anche in questo caso, il confronto è stato fatto sui seguenti indicatori economici: tempo di ritorno attualizzato (TR), indice di profitto (IP), valore attuale netto (VAN) e tasso interno di rendimento (TIR): i risultati sono presentati in Tabella 65. L'intervento 7 verrebbe ulteriormente valorizzato da un aumento del tasso di interesse fino al 6%.

Tabella 65: Analisi di sensitività per l'intervento 7.

	TR	IP	VAN	TIR
Int. 7 (base)	11	0.9	142940	9.4
Int. 7 – tasso di interesse 6%	13	0.7	116180	9.4
Int. 7 – tasso di interesse 2%	9	0.9	152450	9.4
Int. 7 – tasso di aumento energia elettrica 5%	10	0.9	146820	9.5
Int. 7 – tasso di aumento gas 5%	10	1.3	213910	11.1

5 Conclusioni

Il presente lavoro si poneva l'obiettivo di verificare la fattibilità di rendere NZEB un edificio della Pubblica Amministrazione ad uso uffici nella zona climatica D. L'edificio scelto, Palazzo A10 dell'Università di Pisa, rappresenta un edificio tipico della PA nel Centro Italia: si trova nel centro storico della città ed è protetto dalla Soprintendenza. Sono state confrontate due diverse analisi: la prima ha verificato la fattibilità di rendere NZEB l'edificio in base alla legislazione in vigore; la seconda ha esaminato la possibilità di scegliere opportunamente gli interventi da realizzare per diminuire le richieste energetiche (senza arrivare però all'obiettivo NZEB), seguendo il principio dell'ottimizzazione costi-benefici.

Per la simulazione con finalità NZEB non si è potuto validare il modello con i dati reali, in quanto la metodologia applicata, A2 (Asset Rating), prevede un utilizzo standard e continuativo dei locali e degli impianti, notevolmente differente da quello effettivo. Al contrario, il modello di diagnosi, che utilizza la metodologia adattata all'utenza, A3 (Tailored Rating), è stato validato attraverso gli usi energetici effettivi, rilevati tramite lo storico delle fatturazioni di energia elettrica e gas naturale.

L'analisi di fattibilità NZEB ha messo in luce le criticità di rendere a energia quasi zero un edificio di questo tipo. Infatti, i vincoli a cui sono sottoposti gli interventi rendono difficile il raggiungimento dell'obiettivo: ad esempio, non è possibile prevedere un cappotto esterno se non su una superficie molto limitata dell'edificio, né la sostituzione del sistema di emissione. La superficie del tetto, inoltre, non è sufficiente per l'installazione di tutti i moduli fotovoltaici che servirebbero per raggiungere i requisiti NZEB. L'analisi economica di questi interventi ha mostrato che solo grazie alle forme d'incentivazione attualmente disponibili (Conto Termico dedicato all'obiettivo NZEB) si possono ottenere risultati positivi, cioè almeno il recupero dell'investimento iniziale. Peraltro, la stessa analisi economica non può essere considerata attendibile, a causa dell'impiego di un modello di edificio-impianto non validato e con uso standard.

Tramite la diagnosi energetica, invece, è stata individuata una serie d'interventi che riduce i fabbisogni energetici e consente anche un ritorno economico significativo. Le soluzioni della diagnosi rappresentano un giusto compromesso tra i costi iniziali degli interventi e i risparmi conseguibili. L'analisi economica in questo caso è decisamente più attendibile, grazie all'impiego di un modello di edificio-impianto validato e adattato all'utenza. Inoltre, si è potuto prendere in considerazione la gestione dell'edificio e la sensibilizzazione degli utenti; questa tipologia di misure risultano efficaci, ma sono invece "trasparenti" nella simulazione NZEB, che mantiene un'utenza standard. Anche quando in entrambe le analisi si è suggerito lo stesso tipo d'intervento (isolamento di componenti d'involucro, installazione di pompa di

calore, installazione di impianto fotovoltaico), nel caso della diagnosi non è stato necessario “spingersi” fino ai valori imposti dai requisiti minimi NZEB, ma si è potuto individuare il dimensionamento ottimo per l’edificio in analisi dal punto di vista costi-benefici.

Riassumiamo quindi le principali criticità e i punti di forza dell’attività di riqualificazione energetica di edifici esistenti in chiave NZEB per il contesto analizzato:

- L’obiettivo NZEB si scontra, in Italia, con le limitazioni previste per gli edifici storici. Il nostro Paese (e in particolare il Centro Italia) ha un elevato patrimonio architettonico-storico-culturale, la cui tutela può essere difficile da conciliare con le necessità sempre più stringenti di riduzione degli usi energetici. Si sottolinea l’importanza delle forme d’incentivazione per l’efficientamento energetico degli edifici, senza le quali alcuni interventi (come ad esempio la sostituzione delle finestre o l’installazione del fotovoltaico) risulterebbero poco attrattivi e difficilmente applicabili, a causa di tempi di ritorno dell’investimento troppo lunghi.
- Per edifici esistenti e con profili di utilizzo così discontinui come quelli ad uso uffici, la modellazione A2 impiegata nella definizione di NZEB porta tipicamente a sovrastimare i reali usi energetici. I conseguenti interventi di retrofit energetico necessari per raggiungere il livello di fabbisogno quasi zero implicano prestazioni energetiche estremamente alte, difficilmente correlate a un effettivo ritorno dell’investimento, risultando economicamente fattibili solo a fronte di forti incentivi. Per esempio, il sovradimensionamento dell’impianto fotovoltaico, causato dalla regola rigida che impone una percentuale fissa di copertura energetica attraverso impianti a fonti rinnovabili, potrebbe essere evitato, inseguendo invece l’ottimo progettuale attraverso tecniche di simulazione dinamica e ottimizzazione multi-obiettivo in edifici a energia netta circa zero, come in [31,32]. È invece da evidenziare positivamente come l’obiettivo NZEB comporti, nel suo approccio globale di sistema edificio-impianto, la realizzazione di una serie di interventi che, nel loro insieme e nella loro sovrapposizione, determinano miglioramenti maggiori rispetto alla somma di singoli interventi.
- La riqualificazione NZEB di un edificio non sfrutta i criteri di ottimizzazione dei costi e abbandona la logica di realizzazione progressiva nel tempo di piccoli interventi, alcuni dei quali non possono neppure essere simulati con metodologia A2. Interventi di retrofit di modesta entità in termini d’investimento economico, come quelli che coinvolgono la regolazione, manutenzione e gestione degli impianti termici ed elettrici e la gestione di elementi come chiusure oscuranti e schermature

solari, potrebbero invece portare a discreti benefici energetico-ambientali e tempi di ritorno contenuti. Si ritiene dunque opportuno che misure di questo tipo, anche per ragioni esemplari in edifici dell'Amministrazione Pubblica, siano eseguite in via preliminare rispetto alle azioni strutturali di riqualificazione energetica, oggetto del presente studio.

Come suggerimento conclusivo, riteniamo sia opportuno proseguire nell'analisi di casi studio e simulazioni dinamiche su edifici caratteristici del territorio nazionale, per fornire sufficienti elementi al legislatore al fine dell'introduzione di opportuni coefficienti correttivi in edifici ad uso intermittente, che modifichino l'attuale definizione di NZEB e che consentano di raggiungere il livello richiesto attraverso misure appropriate anche in termini di costi-benefici, in accordo con la visione della Direttiva Europea 2010/31/UE.

Riferimenti bibliografici

- [1] Il Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea, Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio sul rendimento energetico in edilizia, (2002).
- [2] Il Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea, Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia, (2010).
- [3] European Parliament, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency, (2012).
- [4] Governo della Repubblica Italiana, Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n.192: attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia, (2005).
- [5] Parlamento Italiano, Legge 3 agosto 2013, n.90 - Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla presta, (2013).
- [6] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del mare, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Ministero per la semplificazione e la pubblica amministrazione, Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, Gazz. Uff. (2015). <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/2032968-decreto-interministeriale-26-giugno-2015-adeguamento-linee-guida-nazionali-per-la-certificazione-energetica-degli-edifici>.
- [7] ENEA, CTI, Ministero dello sviluppo economico, PANZEB - Piano d'Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero, (2015). http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/documenti/PANZEB_13_11_2015.pdf.
- [8] D. Caccavelli, H. Gugerli, TOBUS - A European diagnosis and decision-making tool for office building upgrading, Energy Build. 34 (2002) 113–119.
- [9] M. Citterio, G. Fasano, Indagine sui consumi degli edifici pubblici (direzionale e scuole) e potenzialità degli interventi di efficienza energetica, (2009) 16.
- [10] F. Margiotta, G. Puglisi, Caratterizzazione del parco edilizio nazionale - Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio, (2009) 21.
- [11] ISTAT, Paesaggio e Patrimonio culturale, in: Progett. Beness. Equo E Sostenibile, 2015. <https://www.istat.it/it/files/2015/12/09-Paesaggio-patrimonio-culturale-Bes2015.pdf>.
- [12] E. Santini, S. Elia, G. Fasano, Caratterizzazione dei consumi energetici nazionali delle strutture ad uso ufficio, (2009) 46.
- [13] Ente Italiano di Normazione, UNI 10339:1995. Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti., (1995) 32.
- [14] Ente Italiano di Normazione, UNI 11300: 2014. Parte 1. Prestazioni energetiche degli edifici. Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, (2014).
- [15] Ente Italiano di Normazione, UNI 11300: 2014. Parte 2. Prestazioni energetiche degli edifici. Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale,

- per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in , (2014).
- [16] CEN, EN 12464-1. Light and Lighting: Lighting of workplaces. Brussels, (2003).
- [17] Ente Italiano di Normazione, UNI 15193: 2017. Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione., (2017).
- [18] Ente Italiano di Normazione, UNI EN 12831:2006. Impianti di riscaldamento negli edifici. Metodo di calcolo del carico termico di progetto., (2006).
- [19] Ente Italiano di Normazione, UNI 11300: 2010. Parte 3. Prestazioni energetiche degli edifici. Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva., (2010).
- [20] W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, P. Conti, D. Della Vista, E. Schito, et al., Sviluppo di un software applicativo per l'audit energetico negli edifici ad uso residenziale e terziario, Report di Ricerca di Sistema Elettrico (RSE/2012/110), 2012.
- [21] W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, D. Della Vista, P. Conti, E. Schito, et al., Realizzazione di un software con interfaccia grafica per l'audit energetico negli edifici ad uso residenziale, uffici e scuole, Report di Ricerca di Sistema Elettrico (RSE/2013/143), 2013.
- [22] D. Testi, D. Della Vista, E. Schito, E. Menchetti, P. Conti, W. Grassi, et al., Sviluppo del Software SEAS per le diagnosi energetiche di ambienti ospedalieri dedicati alla degenza, Report di Ricerca di Sistema Elettrico (RSE/PAR2013/113), 2013.
- [23] Ente Italiano di Normazione, UNI 10349:1994. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati Climatici., (1994).
- [24] S.A. Klein, TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 2016. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [25] ENEA, Ministero dello sviluppo economico, Anni tipo climatici, (2015). <https://try.cti2000.it/>.
- [26] Ente Italiano di Normazione, UNI 11300: 2012. Parte 4. Prestazioni energetiche degli edifici. Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria., (2012).
- [27] J. Carmeliet, M. Zimmermann, Sustainable Renovation of Historical Buildings, Duebendorf, 2011.
- [28] Ufficio della natura e del paesaggio, Commissione del Paesaggio, Pannelli solari nei nuclei storici. Criteri di posa e di valutazione paesaggistica., 2010. http://m4.ti.ch/fileadmin/DT/direttive/DT_DSTM_SST/pr/Pannelli_solari_nuclei.pdf.
- [29] Comune di Pisa, Comune di Calci, Comune di Cascina, Comune di S. Giuliano Terme, Comune di Vecchiano, Comune di Vicopisano, Regolamento Edilizio Unificato, (2013) 46. http://www.comune.pisa.it/uploads/2013_03_19_16_38_08.pdf.
- [30] Presidente della Repubblica Italiana, Decreto del Presidente della Repubblica 13 febbraio 2017, n.31. Regolamento recante individuazione degli interventi esclusi dall'autorizzazione paesaggistica o sottoposti a procedura autorizzatoria semplificata., (2017).
- [31] D. Testi, E. Schito, P. Conti, Cost-optimal sizing of solar thermal and photovoltaic systems for the heating and cooling needs of a Nearly Zero-Energy Building: design methodology and model description, Energy Procedia, 2016, vol. 91, pp. 517-527.

- [32] D. Testi, E. Schito, P. Conti, Cost-optimal sizing of solar thermal and photovoltaic systems for the heating and cooling needs of a Nearly Zero-Energy Building: the case study of a farm hostel in Italy, *Energy Procedia*, 2016, vol. 91, pp. 528-536.

Breve curriculum scientifico dei membri del gruppo di lavoro

Daniele Testi, nato a Pietrasanta (LU) nel 1977, dal 2014 è Professore Associato di Fisica Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa. Laureato con lode in Ingegneria Aerospaziale (2002), Dottore di Ricerca in Energetica Elettrica e Termica (2006), Assegnista di Ricerca (2006-2009), Borsista di Ricerca (2010-2011) e Ricercatore Universitario a tempo indeterminato (2011-2014) presso l'Università di Pisa. Ha svolto supporto alla didattica per i corsi di Termodinamica Applicata, Fisica Tecnica e Termoenergetica dell'Edificio. È stato codocente dei corsi di Teoria dei Sistemi, Laurea in Ingegneria Energetica, e di Risparmio Energetico in Edilizia, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Attualmente è Presidente del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e titolare dei corsi di Fisica Tecnica, Laurea in Ingegneria dell'Energia, Energia e Sistemi Energetici, Laurea in Ingegneria Gestionale, e Trasmissione del Calore e Termofluidodinamica, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Principali campi di studio: termofluidodinamica monofase e bifase, tecniche d'incremento dello scambio termico convettivo, tecniche di misura nella fisica tecnica, scambiatori e dissipatori di calore, microgravità, termofisica degli ambienti abitati, impianti di climatizzazione, efficienza energetica in edilizia, simulazione, integrazione e ottimizzazione di sistemi energetici, pianificazione energetica. Per la sua Tesi di Dottorato di Ricerca, ha ottenuto il premio europeo "EUROTHERM Young Scientist Award", conferito con cadenza quadriennale. Autore di circa 90 pubblicazioni su riviste internazionali o in atti di congressi. Docente in numerosi corsi di formazione, master e seminari sulla gestione dell'energia, la diagnosi e la certificazione energetica degli edifici e gli impianti termotecnici. Titolare di consulenze o collaboratore per vari contratti di ricerca nell'ambito della diagnosi, dell'efficienza, della normativa, della pianificazione e della conversione energetica. Socio dell'Unione Italiana Termofluidodinamica (UIT), dell'Unione Geotermica Italiana (UGI) e dell'Associazione della Fisica Tecnica Italiana (FTI). Dal 2014 è responsabile scientifico dello sviluppo del software nazionale SEAS per la diagnosi energetica negli edifici.

Eva Schito, nata a Pisa nel 1990, ha ottenuto nel 2017 il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni presso l'Università di Pisa, con una tesi intitolata "Methods and tools for a rational and efficient use of energy in museum environments". Ha conseguito con lode la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso l'Università di Pisa (luglio 2013), discutendo la tesi dal titolo "Modellizzazione dinamica di un sistema pompa di calore – edificio". Ha ottenuto l'Attestato di Merito previsto per gli studenti del Percorso di Eccellenza. I suoi principali campi di interesse sono: modellizzazione cycle-based delle pompe di calore e progettazione ottimizzata, simulazione dinamica e riqualificazione energetica degli edifici, anche di valore storico, ed ambienti museali. Nel 2008 è risultata vincitrice del Primo Posto nella Categoria Singoli Studenti del Concorso Nazionale "IV Edizione delle Olimpiadi della Scienza – Premio Green Scuola – Energie alternative e ambiente: la produzione sostenibile di energia", indetto dal Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca e dal Consorzio Interuniversitario "La Chimica per l'Ambiente" (INCA). Esperto Junior CasaClima e Socia FTI, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) e AICARR (Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria

Riscaldamento e Refrigerazione). Ha collaborato come Borsista col DESTEC, Università di Pisa, nell'ambito di contratti di ricerca e consulenza nel campo della diagnosi e simulazione energetica degli edifici e dei sistemi energetici. Ha svolto supporto alla didattica per il corso di Termoenergetica dell'Edificio (Laurea in Ingegneria dell'Energia), Risparmio energetico in Edilizia (Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica) e Energia e Sistemi Energetici (Laurea in Ingegneria Gestionale); ha inoltre svolto docenza in seminari sulla certificazione e diagnosi energetica presso ordini territoriali degli ingegneri e per software-house private. Attualmente è Assegnista di Ricerca, sempre presso il DESTEC, con un'attività dal titolo "Sperimentazione e simulazione di impianti di generazione ibridi per la climatizzazione efficiente degli edifici".

Paolo Conti, nato a Jesi (AN) nel 1987, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria "Leonardo da Vinci" Energetica Elettrica e Termica presso l'Università di Pisa, discutendo la tesi "Sustainable design of ground-source heat pump systems: optimization of operative life performances". Dal 2015 al 2017 è stato Assegnista di Ricerca e Borsista presso il DESTEC, Università di Pisa. Da aprile 2017 è Ricercatore a Tempo Determinato, sempre presso il DESTEC. La sua attività riguarda la progettazione e la gestione ottimizzata degli impianti geotermici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici. I suoi settori principali d'interesse professionale sono: gli impianti di climatizzazione ad acqua e ad aria, lo sviluppo di modelli al calcolatore per la simulazione e la valutazione delle prestazioni energetiche dei sistemi edificio – impianto, lo studio e sviluppo di metodologie per la diagnosi energetica negli edifici, l'individuazione di buone pratiche di progettazione e gestione dei sistemi edifici-impianto. Socio AiCARR, FTI e dell'American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Membro del Consiglio UGI e nominato Segretario esecutivo per il triennio 2015-2017. Membro dell'International Geothermal Association (IGA) Resources & Reserves Committee e del gruppo di lavoro IGA-UNECE (International Geothermal Association, United Nations Economic Commission for Europe) per la stesura delle specifiche riguardanti l'applicazione del protocollo UNFC-2009 alle applicazioni geotermiche (pompe di calore incluse). Dal 2011 supporta il Gestore Servizi Energetici (GSE) nella rilevazione dati e nel monitoraggio dello sviluppo in Italia delle applicazioni geotermiche per usi termici. I risultati di questo lavoro sono stati adottati dal Ministero dello Sviluppo Economico e compaiono nei dati Eurostat.

Elena Menchetti, nata a Poggibonsi (SI) nel 1983, ha conseguito con lode la Laurea Specialistica in Ingegneria Energetica presso l'Università di Pisa (marzo 2008). Ha lavorato per cinque anni presso il Servizio Energy Manager dell'Università di Pisa come tecnico nell'ambito dell'analisi e riqualificazione del parco edilizio universitario, della gestione e ripartizione delle spese energetiche, dell'integrazione di impianti rinnovabili, delle certificazioni e diagnosi energetiche degli edifici. Attualmente è in servizio presso la Direzione Edilizia e Telecomunicazione dell'Università di Pisa. Dal gennaio 2014 ricopre la posizione organizzativa di Energy Manager dell'Università di Pisa. Ricopre per l'Ateneo Pisano numerosi incarichi di Responsabile Unico di Procedimenti Edilizi, di progettazione e di direzione lavori sia sugli impianti termici sia sull'isolamento termico degli edifici. Collabora dal 2008 col DESTEC, Università di Pisa, nell'ambito di contratti di ricerca e consulenza nel campo della diagnosi e simulazione energetica degli edifici e dei sistemi

energetici. Ha ricoperto numerosi incarichi di docenza in seminari sulla certificazione e diagnosi energetica presso ordini territoriali degli ingegneri e architetti, e per software-house private.

Simona Comelato, nata a Livorno (LI) nel 1973, ha conseguito con lode la Laurea Magistrale in Ingegneria Civile (orientamento Edile) presso l'Università di Pisa (Ottobre 2002). Ha collaborato per alcuni anni presso uno studio associato di ingegneria di Livorno e contemporaneamente, per sette anni, ha lavorato presso il Servizio Energy Manager dell'Università di Pisa (dal 2005 al 2012), come tecnico nell'ambito della gestione e ripartizione delle spese energetiche, delle certificazioni energetiche e delle analisi di fattibilità di interventi di riqualificazione energetica riferiti agli edifici universitari. Dal 2008, in qualità di libera professionista, con contratto part-time al 50% presso l'Università di Pisa, ha ricoperto numerosi incarichi di progettazione e di direzione lavori sia sugli impianti termici sia sull'isolamento termico degli edifici. Dal 2002 al 2014 ha collaborato in modo continuativo come consulente sugli aspetti tecnico-amministrativi e normativi relativi al riconoscimento di titoli di efficienza energetica (certificati bianchi) per una E.S.Co. toscana; ha collaborato nel 2014 con Confindustria Toscana Servizi Soc. Consortile per la redazione di diverse diagnosi energetiche nel settore terziario ed industriale, nell'ambito del "Progetto Energia" PRO FSE 2007-2013. Dal 2015 è in servizio presso l'Università di Pisa, Direzione Edilizia e Telecomunicazioni. Ha svolto, in qualità di docente, diversi seminari in ambito di certificazioni energetiche e di calcolo energetico applicato agli edifici.

Walter Grassi, nato a Napoli nel 1948, Ingegnere Elettrotecnico, dal 1999 è stato Professore Ordinario di Fisica Tecnica. Nell'ultimo anno accademico ha afferito al DESTEC, Università di Pisa, ed è stato titolare dei corsi di Termoenergetica dell'Edificio e Fisica Tecnica, Laurea in Ingegneria dell'Energia, e di Risparmio Energetico in Edilizia, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Direttore del Dipartimento di Energetica dell'Università di Pisa dal 2006 al 2010. Nel 2013 ha ricevuto dall'Università di Pisa l'Ordine del Cherubino. Per molti anni è stato Energy Manager dell'Università di Pisa e membro del Comitato Tecnico per la Gestione dell'Energia della Giunta Regionale Toscana. È stato Presidente UGI e dell'Agenzia Energetica Regionale Toscana. Autore di oltre 100 pubblicazioni scientifiche, su riviste internazionali e in atti di congressi, su temi di scambio termico e di efficienza energetica negli edifici. Responsabile scientifico dal 2011 al 2014 dello sviluppo del software nazionale SEAS per la diagnosi energetica negli edifici. Da settembre 2017 non è più in servizio presso l'Università, ma continua la sua attività nella divulgazione scientifica e nella formazione.