



Ricerca di Sistema elettrico

Diagnosi energetica di un edificio vincolato rappresentativo uso uffici della PA sottoposto a riqualificazione energetica nZEB, zona climatica D, Centro Italia, e analisi economica degli interventi proposti

G. Piras, F. Nardecchia, F. Rosa, F. Barbanera, C. Romeo

DIAGNOSI ENERGETICA DI UN EDIFICIO VINCOLATO RAPPRESENTATIVO USO UFFICI DELLA PA SOTTOPOSTO A RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA NZEB, ZONA CLIMATICA D, CENTRO ITALIA, E ANALISI ECONOMICA DEGLI INTERVENTI PROPOSTI

G. Piras, F. Nardecchia, F. Barbanera (Dipartimento D.I.A.E.E. – Dipartimento Di Ingegneria Astronautica Elettrica Ed Energetica, Sapienza Università di Roma)
C. Romeo(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: 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: Diagnosi energetica di un edificio vincolato rappresentativo uso uffici della PA

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 uso uffici di riferimento vincolato della PA nella zona climatica Centro Italia (zona D: $1.400 < GG \leq 2.100$)"

Responsabile scientifico ENEA: Arch. Carlo Romeo

Responsabile scientifico DIAEE (Sapienza): Prof. Giuseppe Piras

Indice

1	SOMMARIO	5
2	INTRODUZIONE	7
3	DEFINIZIONE DI NZEB (NEARLY ZERO ENERGY BUILDING, EDIFICIO AD ENERGIA QUASI ZERO)	9
4	IL CASO STUDIO DI PALAZZO BALEANI: ANALISI DELLO STATO DI FATTO	12
4.1	CARATTERIZZAZIONE DEL CASO STUDIO	14
5	MODELLAZIONE DELLO STATO DI FATTO	20
5.1	IL MODELLO SU TRNBUILD	20
5.1.1	<i>Le zone termiche</i>	20
5.1.2	<i>Definizione dei pacchetti murari e finestre</i>	22
5.1.3	<i>Definizione dei carichi termici interni</i>	24
5.1.4	<i>Occupancy</i>	24
5.1.5	<i>Illuminazione ed apparecchiature elettriche</i>	26
5.1.6	<i>Ricambi d'aria</i>	27
5.1.7	<i>Parametri per il calcolo del comfort termico</i>	27
5.1.8	<i>Impianto di climatizzazione</i>	27
5.1.9	<i>Outputs del modello TRNBuild</i>	28
5.1.10	<i>Il modello su Trnsys Simulation Studio</i>	29
5.1.11	<i>Fabbisogno termico ed elettrico edificio</i>	30
5.1.12	<i>ACS</i>	42
6	ANALISI ENERGETICA DELLO STATO DI FATTO E VALIDAZIONE DEL MODELLO CON STORICO DEI CONSUMI REALI	45
6.1	CONSUMI ENERGETICI: VALUTAZIONE D'ESERCIZIO	45
6.2	VALUTAZIONE ENERGETICA ADATTATA ALL'UTENZA	46
6.3	CALIBRAZIONE DEL MODELLO ENERGETICO	48
6.4	CONSUMI ELETTRICI: VALUTAZIONE D'ESERCIZIO	49
6.5	VALUTAZIONE ELETTRICA ADATTATA ALL'UTENZA	50
6.6	CALIBRAZIONE DEL MODELLO ELETTRICO	52
6.7	CALCOLO PRESTAZIONI ENERGETICHE DELL'EDIFICIO E CLASSIFICAZIONE NZEB	53
7	IL CASO STUDIO DI PALAZZO BALEANI: IDENTIFICAZIONE DEI POSSIBILI INTERVENTI DI RETROFIT	56
7.1	INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI E DEFINIZIONE DEI COSTI DI RETROFIT	56
7.1.1	<i>Interventi di efficientamento termico</i>	56
7.1.2	<i>Interventi di efficientamento elettrico</i>	58
7.1.3	<i>Interventi di efficientamento produzione ACS</i>	62
8	ANALISI ENERGETICA ED ECONOMICA DEGLI INTERVENTI DI RETROFIT E VERIFICA DEL RAGGIUNGIMENTO DELLA CLASSE NZEB	63
8.1	SCENARI DI EFFICIENTAMENTO TERMICO	63
8.1.1	<i>Finestratura</i>	63
8.1.2	<i>VRV</i>	66
8.2	SCENARI DI EFFICIENTAMENTO ELETTRICO	69
8.2.1	<i>Fotovoltaico</i>	69
8.2.2	<i>Sistema di gestione e controllo</i>	71
8.3	SCENARIO DI EFFICIENTAMENTO ACS	72
8.4	SCENARIO GLOBALE	75
9	ANALISI ECONOMICA DEGLI INTERVENTI	78
10	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	83
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	84

1 Sommario

Nell'ambito della presente ricerca si è valutata la possibilità di riqualificare in NZEB (secondo le definizioni del D.l. 26 giugno 2015 sui "Requisiti minimi") un edificio vincolato uso ufficio della P.A., sito nella zona climatica Centro Italia.

L'obiettivo di questo lavoro è stato la valutazione dei fabbisogni energetici di un edificio vincolato, tenendo conto della variabilità delle condizioni climatiche e dei carichi interni, della capacità termica dell'involucro, conducendo l'analisi energetica tramite un software di simulazione dinamica (TRNSYS).

Si è dapprima individuato un caso-studio rappresentativo delle tipologie di edifici vincolati uso uffici della PA 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, qualora possibile, compatibilmente con i vincoli cui l'edificio è sottoposto.

Per la trasformazione dell'edificio in nZEB si è partiti dalla conoscenza del reale comportamento e del consumo energetico del sistema, costituito dall'insieme del fabbricato e da tutti gli impianti e dispositivi tecnologici che si trovano al suo interno. Si è proceduto quindi alla raccolta dei dati relativi all'edificio selezionato, attraverso analisi del materiale documentale disponibile, sopralluoghi, colloqui col personale e monitoraggio dei contatori.

Si è quindi affrontata un'analisi dello stato di fatto, realizzata attraverso una diagnosi energetica che ha consentito di costruire il bilancio in usi finali di energia, individuare eventuali cause di sprechi e gli interventi più appropriati da porre in essere per la trasformazione in nZEB dell'edificio, valutandone non solo la fattibilità tecnica, ma anche e soprattutto quella economica.

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

Una volta caratterizzati gli interventi di retrofit più appropriati, è stato verificato che gli stessi consentano o meno la trasformazione in edificio a energia quasi zero (nZEB), vale a dire verifichino il contemporaneo rispetto

- I. di tutti i requisiti previsti dalla lettera b), del comma 2, del paragrafo 3.3 dell'allegato 1 del Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 "Requisiti minimi", determinati con i valori vigenti dal 01/01/2019 per gli edifici pubblici;
- II. degli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili secondo i principi minimi di cui all'allegato 3, paragrafo 1, lettera c) del Dlgs 3 marzo 2011, n. 28, incrementati del 10% (edifici pubblici).

The present research aims to the possibility of upgrading in NZEB (according to the definitions of the D.l. 26 June 2015 on "Minimum Requirements") an historical building used as P.A. office, located in the Central Italy climate zone D in urban environment. The objective of this work was the assessment of the energy needs of a constrained building, taking into account the variability of climatic conditions and internal loads, the thermal capacity of the building envelope, through a dynamic simulation software (TRNSYS) for energy analysis. First, a representative case study for this kind of buildings is pointed out in order to identify retrofit interventions in a major renovation with the goal to transform the existing building into an almost zero-energy building, whenever possible, compatibly with the constraints of an historical architecture example. The research started from the knowledge of the real behaviour and the energy consumption of the HVAC and electrical plants. Data were then collected through analysis of the available documentary material, inspections, interviews with personnel and an instrumental monitoring campaign. Then was carried out a building energy diagnosis that made possible the construction of a general overview of the end uses of energy, identifying waste and related corrective interventions for the transformation into nZEB of the building; moreover, an overall evaluation of the technical and economical feasibility of the intervention has been carried out. In detail those interventions have concerned both the building envelope, and all the technical systems (in particular winter air conditioning, summer air conditioning, lighting), and the efficient generation of thermal and electrical energy. Advanced technological solutions have been proposed, always fitting with the principles of technical-economic feasibility, compatibility with architectural and landscape constraints and large-scale replicability. The proposed solutions have been oriented towards energy efficiency, intelligent energy management and the exploitation of renewable sources. Once the most appropriate retrofit interventions have been characterized, it has been verified if they allow the criteria for transformation in a building with almost zero energy (nZEB), coming from Italian regulation.

2 Introduzione

La presente ricerca si colloca nell'ambito dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, stipulato in data 21 aprile 2016 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.

Tale ricerca 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 edifici pubblici vincolati 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 Dipartimento D.I.A.E.E della SAPIENZA Università di Roma riguarda la riqualificazione energetica di edifici vincolati uso uffici della Pubblica Amministrazione, in applicazione del DM 26 giugno 2015 sulle nuove prescrizioni e i requisiti minimi.

Nel particolare, la ricerca prevede l'individuazione di un caso-studio rappresentativo delle tipologie di edifici vincolati uso uffici della PA e la definizione di 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 DM 26 giugno 2015 sui "Requisiti minimi" qualora possibile compatibilmente con i vincoli cui l'edificio è sottoposto.

Ai fini di raggiungere gli obiettivi di efficientamento annuali fissati per tutte le P.A. al 2020 risulta quindi importante potere effettuare interventi efficaci anche su immobili vincolati che tra l'altro sono particolarmente energivori.

Tale ricerca risulta particolarmente significativa in quanto i risultati ottenuti saranno facilmente trasferibili ad altri palazzi della P.A. oggetti di vincolo architettonico, che si trovano in contesti simili sia per il contesto ambientale in cui si collocano (fascia climatica) che per le caratteristiche impiantistiche o di involucro dell'edifici.

Gli interventi dovranno riguardare 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, di compatibilità con i vincoli architettonici e paesaggistici e di replicabilità su larga scala. Le soluzioni proposte saranno orientate all'efficienza energetica, alla gestione intelligente dell'energia e allo sfruttamento delle energie rinnovabili.

La diagnosi energetica effettuata sull'edificio scelto ha permesso di individuare durante la seconda fase di ricerca le migliori tecnologie disponibili attualmente sul mercato che possano comunque essere utilizzate in un contesto architettonico di pregio in ottemperanza ai requisiti richiesti dal MIBACT e che, valutate e comparate attraverso una approfondita analisi costi-benefici, permettano di avvicinarsi alle prestazioni richieste agli nZEB

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.

In sintesi la ricerca includerà tre principali fasi di lavoro, sotto descritte: 1) delle attività preliminari finalizzate all'individuazione del caso studio rappresentativo per gli edifici vincolati uso uffici della PA; 2) un'analisi dello stato di fatto dell'edificio prescelto, contenente una sua descrizione e caratterizzazione energetica, nonché un'analisi energetico-economica dei consumi reali basata sullo studio dei dati storici; 3)

un'analisi degli interventi di retrofit individuando i possibili interventi migliorativi e la loro fattibilità, al fine di ottimizzare le prestazioni energetiche dell'edificio.

L'edificio più rappresentativo per la tipologia di caso studio sopra descritta, come esemplare da riprodurre per edifici che presentino le caratteristiche di edificio storico adibito ad uffici, presenza di vincoli ed esigenze di conservazione a causa delle intrinseche caratteristiche di pregio, è stato individuato in Palazzo Baleani.

Palazzo Baleani si trova all'interno della città storica, attraverso l'individuazione all'interno del PRG di Roma inoltre, è noto che rientra secondo le Norme Tecniche nella zona T2 "Tessuto ad espansione rinascimentale e moderna pre-unitaria", ossia i complessi di edifici in tutto o in parte pianificati, che hanno interessato l'espansione di Roma.

3 Definizione di NZEB (Nearly Zero Energy Building, Edificio ad energia quasi zero)

Gli edifici "ad energia quasi zero" (near zero energy buildings NZEB) sono edifici che consumano pochissima energia ed hanno elevate prestazioni per il loro funzionamento standard. La dicitura "energia zero" deriva da una specifica Direttiva europea, seguita in Italia dal D.Lgs. 192/2005.

Con tale denominazione si intendono gli edifici ad altissima prestazione energetica che minimizzano i consumi legati a svariati fattori: al riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, produzione di acqua calda sanitaria e trasporto di persone e cose. Devono utilizzare energia da fonti rinnovabili, avere elementi passivi di riscaldamento e raffrescamento, sistemi di ombreggiamento. Inoltre, deve essere garantito per questa tipologia di edifici un'adeguata qualità dell'aria interna e un'adeguata illuminazione naturale.

Con l'emanazione della direttiva 2010/31/UE (la nuova EPBD – Energy Performance Building Directive), sono stati riformulati e ampliati i contenuti della precedente 2002/91/CE (ormai abrogata dal 1° gennaio 2012) ed è stato introdotto all' art. 9, il concetto di "energia quasi zero" per gli edifici di nuova costruzione sia pubblici o di uso pubblico che privati (edifici NZEB). In particolare, questa direttiva dispone che, a partire dal 31 dicembre 2020, tutti i nuovi edifici dovranno essere costruiti con caratteristiche NZEB. Il problema di questa direttiva risiede però nella mancata definizione di edificio NZEB, lasciando ai singoli Paesi membri l'identificazione di tali caratteristiche. Ed è per questo che ogni Paese europeo ha recepito la direttiva in base alle proprie specifiche esigenze e delle situazioni locali.

L'Italia si è mossa verso il recepimento di tali direttive emanando diversi provvedimenti che hanno profondamente modificato la previgente normativa in materia. La definizione di "edificio ad energia quasi zero" trova la sua prima comparsa nella normativa nazionale nel D.Lgs. n. 192/05, a seguito delle modifiche introdotte dal Decreto Legge 4 giugno 2013 n. 63.

Il quadro normativo italiano dal 1991 (anno di emanazione della Legge n.10/1991) al 2005, non ha subito significative variazioni in materia energetica. Dal 2005, a seguito dell'obbligo di recepimento delle direttive europee inerenti al tema dell'energia, il quadro normativo è molto cambiato ed ha subito variazioni e aggiornamenti. La prima direttiva EPBD del 2002 ha portato all'emanazione del D. Lgs. 19 agosto 2005 n. 192 (nel seguito, D.Lgs. n. 192/2005) e delle sue successive modifiche ed integrazioni, con un radicale cambiamento degli obblighi normativi vigenti rispetto alla Legge del 1991; il Decreto Legge 4 giugno 2013 n. 63 (convertito nella Legge n. 90/2013) ha nuovamente modificato il quadro nazionale, stravolgendo il D.Lgs. n. 192/05, per recepire i contenuti della Direttiva Europea 2010/31/UE.

I Decreti attuativi, introdotti dal D.L. n. 63/2013, emanati il 26 giugno 2015 ed entrati in vigore il 1 ottobre 2015 (fatta eccezione per il terzo decreto, contenente i modelli della relazione ex. L. n. 10/91, entrato in vigore il 16 luglio 2015), hanno completato il recepimento della Direttiva Europea, definendo parametri e coefficienti di riferimento, valori limite da rispettare e modalità di calcolo. La definizione, riportata all'art. 2, riprende fedelmente quella riportata nella Direttiva 2010/31/UE, adattandola ai riferimenti normativi nazionali. In particolare, all'art. 2, comma 1, punto I-octies del D.Lgs. n. 192/05 succitato, si legge: "edificio a energia quasi zero": edificio ad altissima prestazione energetica, calcolata conformemente alle disposizioni del presente decreto, che rispetta i requisiti definiti al decreto di cui all'articolo 4, comma 1. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo e coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili, prodotta in situ".

Inoltre, tale D.Lsg. ha introdotto, a partire dal 1 gennaio 2019, l'obbligo di essere "edifici ad energia quasi zero" per tutti gli edifici di nuova costruzione occupati da pubbliche amministrazioni e di proprietà di queste ultime, compresi gli edifici scolastici. Gli obblighi normativi impongono in particolare che l'edificio in

oggetto sia messo a confronto con un edificio “di riferimento”, vale a dire un edificio identico in termini di geometria, orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d’uso e situazione al contorno, ma avente caratteristiche termiche e parametri energetici prestabiliti.

Per gli impianti da considerare per l’edificio di riferimento, in assenza di uno specifico servizio energetico nell’edificio reale il D.I. Requisiti Minimi indica di non considerare il fabbisogno di energia primaria per quel servizio. L’edificio di riferimento si considera pertanto dotato degli stessi impianti di produzione di energia dell’edificio reale, assegnando un’efficienza media di riferimento sia per i sottosistemi di utilizzazione dell’edificio di riferimento sia per i sottosistemi di generazione.

Inoltre, l’edificio di riferimento si considera dotato di sistemi di generazione per i servizi energetici di riscaldamento invernale, condizionamento estivo e produzione acqua calda sanitaria della stessa tipologia di quelli presenti nell’edificio reale. Noto dunque l’edificio di riferimento, come indicato nell’Allegato 1, paragrafo 3.4, negli “Edifici ad energia quasi zero”, devono essere rispettati tutti i requisiti riportati all’allegato 1, paragrafo 3.3, comma 2, lettera b), che prevedono due distinte modalità di verifica:

- Alcuni parametri (H'_T e $A_{sol,est} / A_{sup\ utile}$) devono risultare inferiori rispetto ad un valore limite prefissato e riportato in forma tabellare nell’Appendice A (Tabelle 10 e 11);
- Altri requisiti (relativi alle efficienze degli impianti presenti ed agli indici di prestazione energetica) devono risultare inferiori ai valori dei corrispondenti indici dell’edificio di riferimento, per il quale i parametri energetici, le caratteristiche termiche e di generazione, come già descritto, sono quelli riferiti alla scadenza del 1 gennaio 2019 per gli edifici pubblici o a uso pubblico (e validi dal 1 gennaio 2021 per tutti gli altri edifici).

SOTTOSISTEMI DI GENERAZIONE	PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA			PRODUZIONE DI ENERGIA IN SITU
	H	C	W	
Generatore a combustione liquido	0.82	-	0.80	-
Generatore a combustione gassoso	0.95	-	0.85	-
Generatore a combustione solido	0.72	-	0.70	-
Generatore a biomassa solida	0.72	-	0.65	-
Generatore a biomassa liquida	0.82	-	0.75	-
Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3.00	(*)	2.50	-
Macchina frigorifera a compressione di vapore con motore elettrico	-	2.50	-	-
Pompa di calore ad assorbimento	1.20	(*)	1.10	-
Macchina frigorifera a fiamma indiretta	-	0.60* η_{gen} (**)	-	-
Macchina frigorifera a fiamma diretta	-	0.60	-	-
Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico	1.15	1.00	1.05	-
Cogeneratore	0.55	-	0.55	0.25
Riscaldamento con resistenza elettrica	1.00	-	-	-
Teleriscaldamento	0.97	-	-	-
Teleraffrescamento	-	0.97	-	-
Solare termico	0.3	-	0.3	-
Solare fotovoltaico	-	-	-	0.1
Mini-eolico e mini-idroelettrico	-	-	-	(**)

NOTA: per i combustibili tutti i dati fanno riferimento al potere calorifico inferiore.
 (*) Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento si considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia.
 (**) Si assume l’efficienza media del sistema installato nell’edificio reale.

Tabella 1: Efficienze medie dei sottosistemi di generazione dell’edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e la produzione di energia elettrica in situ (Tabella n. 8, Appendice A, D.I. requisiti Minimi).

I parametri da rispettare per il caso studio sono stati quindi ricavati dalle tabelle del D.I. Requisiti Minimi o calcolati con il calcolo dell’edificio di riferimento, modellato con i valori limite obbligatori al 1 gennaio 2019 per gli edifici pubblici. Tali parametri sono riassunti nella Tabella sottostante:

Efficienza, parametro, indice di prestazione	U.M.	Valore limite	Rif. normativo
H'_T	W/m ² K	≤ 0,53	Tabella 10, appendice A –D.I. Requisiti Minimi
$A_{sol,est} / A_{sup\ utile}$	-	≤ 0,040	Tabella 11, Appendice A –D.I. Requisiti Minimi
$EP_{H,nd}$	kWh/m ²	≤ $EP_{H,nd}$, edificio di riferimento 2019/2021	Punto b), comma 2, par. 3.3, Appendice A, D.I. Requisiti Minimi
η_H	-	≥ η_H edificio di riferimento 2019/2021	Punto b), comma 2, par. 3.3, Appendice A, D.I. Requisiti Minimi
EP_H	kWh/m ²	Verifica non prevista	
$EP_{W,nd}$	kWh/m ²	≤ $EP_{W,nd}$, edificio di riferimento 2019/2021	Punto b), comma 2, par. 3.3, Appendice A, D.I. Requisiti Minimi
η_W	-	≥ η_W edificio di riferimento 2019/2021	Punto b), comma 2, par. 3.3, Appendice A, D.I. Requisiti Minimi
EP_W	kWh/m ²	Verifica non prevista	
EP_V	kWh/m ²	Verifica non prevista	
$EP_{C,nd}$	kWh/m ²	≤ $EP_{C,nd}$, edificio di riferimento 2019/2021	Punto b), comma 2, par. 3.3, Appendice A, D.I. Requisiti Minimi
η_C	-	≥ η_C edificio di riferimento 2019/2021	Punto b), comma 2, par. 3.3, Appendice A, D.I. Requisiti Minimi
EP_C	kWh/m ²	Verifica non prevista	
EP_L	kWh/m ²	Verifica non prevista	
EP_T	kWh/m ²	Verifica non prevista	
$EP_{gl} = EP_H + EP_W + EP_C + EP_V + EP_L + EP_T$	kWh/m ²	≤ EP_{gl} edificio di riferimento 2019/2021	Punto b), comma 2, par. 3.3, Appendice A, D.I. Requisiti Minimi

Tabella 2: Valori limite da rispettare.

Inoltre, Il D.I. Requisiti Minimi impone agli edifici ad energia quasi zero la percentuale più gravosa di copertura del fabbisogno energetico con fonte rinnovabile, almeno pari al 50%, prevista per i casi in cui la richiesta del pertinente titolo edilizio sia rilasciata dal 1° gennaio 2017. Si osserva però che tale copertura è relativa esclusivamente ai fabbisogni di riscaldamento, raffrescamento e produzione di ACS, mentre è completamente trascurato il contributo dovuto all'illuminazione, sebbene esso incida sul valore complessivo della prestazione energetica globale; sono trascurati anche altri servizi energetici: ventilazione, trasporto di cose o persone.

I limiti da verificare per un “edificio ad energia quasi zero”, sono riportati nella seguente tabella 3:

Efficienza, parametro, indice di prestazione	U.M.	Valore limite da rispettare	Rif. Normativo
Copertura del fabbisogno energetico con fonti rinnovabili (riscaldamento + condizionamento + ACS)	%	≥ 55	D. Lgs. N. 28/2011, Allegato 3, comma 1, lettera c) e comma 6
Copertura del fabbisogno energetico con fonti rinnovabili (riferito alla sola produzione di ACS)	%	≥ 55	D. Lgs. N. 28/2011, Allegato 3, comma 1, lettera c) e comma 6
Potenza elettrica di impianti alimentati da fonti rinnovabili	kWe	≥ $P * (1/k) * S$	D. Lgs. N. 28/2011, Allegato 3, comma 3, lettera c)

Tabella 3: Applicazione del D.Lgs. n. 28/2011, parametri limite da rispettare per edifici NZEB.

4 Il caso studio di Palazzo Baleani: Analisi dello stato di fatto

La zona dell'ansa del Tevere, in cui sorge il caso studio di Palazzo Baleani, ha sempre mostrato nei secoli una grande complessità urbanistica. Infatti, agli inizi non era abitata, il terreno stesso e la morfologia dell'ambiente la rendevano poco salubre per la presenza di acquitrini e paludi. Nel Medioevo, dopo lavori di bonifica, la zona fu fittamente edificata.

L'edificio è situato nel centro storico di Roma al Rione VI Parione in via Corso Vittorio Emanuele II n° 244, di fronte alla Chiesa Nuova.

Nel corso degli anni l'edificio ha subito degli sventramenti e degli allineamenti di fronti sulla base delle trasformazioni subite a livello urbanistico dalla via principale Corso Vittorio Emanuele II.

In seguito all'approvazione nel 1575 della Congregazione di S.Filippo Neri che si stabilì presso la chiesa di S.Maria in Vallicella, attualmente Chiesa Nuova, iniziò la realizzazione di una nuova strada: Via Larga completata nel 1630.

Il palazzo originariamente della famiglia Cerri, affacciava solo su via del Pellegrino; in seguito su progetto attribuito a Francesco Paparelli, venne edificata una nuova ala su via Larga, in cui venne collocato l'ingresso principale del Palazzo.

La nuova facciata era più alta della preesistente e continuava per un piccolo tratto su via del Pellegrino.

Nella prima metà dell'800 il Palazzo fu venduto alla Famiglia Caucci e poi ai Guglielmi di Jesi, denominati in seguito Conti Baleani.

Ciò accadeva contemporaneamente all'istituzione del Catasto Gregoriano e così il Palazzo venne censito con il toponimo di "Palazzo Baleani".

Nel 1858 ne venne cambiata la destinazione d'uso, diventando la sede degli uffici del Ministero dei Lavori Pubblici e l'abitazione del Ministro.

Nel 1870, con Roma Capitale, l'intera zona fu interessata da sventramenti necessari per l'apertura di un asse viario che nel progetto originario doveva collegare la Stazione Termini al Vaticano; in seguito a delle varianti su di esso, fu necessario demolire tutte le unità edilizie antistanti la Chiesa Nuova. L'intero edificio fu demolito, per poi essere ricostruito nel 1880.

Così nel 1922 l'Ingegnere Pietro Romagnoli realizzò il progetto di ampliamento del Palazzo che prevedeva, fatta eccezione per l'ala di realizzazione ultima di Francesco Paparelli, la demolizione di tutto l'isolato e la ricostruzione di un edificio per uffici, rendendo così Palazzo Baleani come un edificio costituito da un blocco unitario.

La facciata attuale del palazzo si affaccia sulla via principale, i lati costeggiano Via Larga e Via Cerri, il retro affaccia invece su Via del Pellegrino (Fig. 1).

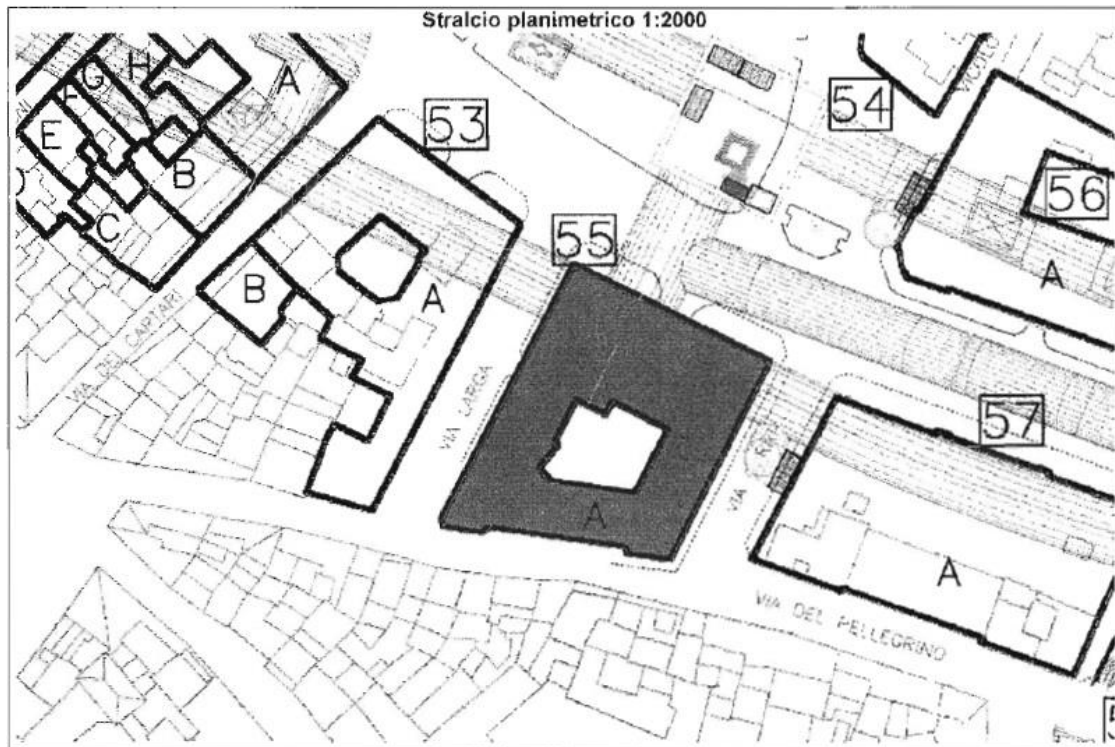


Fig. 1: Stralcio planimetria

Nel 1973 l'Università di Roma avanzò ufficiale proposta per l'assegnazione del Palazzo come sede di importanti laboratori con finalità di ricerca diretta alla prevenzione e alla cura dei tumori, con conseguente ristrutturazione e modifiche di funzioni annesse.

Nel 1985 la concessione venne affidata definitivamente al Prof. Antonio Ruberti, all'epoca rettore dell'Università, dal quale prende nome una sala dell'edificio al primo piano.

Attualmente Palazzo Baleani ospita oltre al Servizio per la prevenzione, diagnosi e cura dei tumori, altre importanti strutture didattiche e di ricerca.

L'edificio è composto da 6 piani, di cui uno interrato, aventi per la maggior parte destinazione d'uso ad uffici. La forma dell'edificio si presenta squadrata con al centro un volume vuoto occupato dal cortile interno, al quale si accede tramite l'entrata principale e per mezzo di portefinestre collocate una per ogni piano.

Esternamente l'edificio si presenta di aspetto monumentale, caratteristico del periodo di origine, avente una facciata realizzata con la tecnica del finto intonaco che si estende per i 23 m di altezza dei piani fuori terra.

La copertura si presenta per la maggior parte praticabile, pavimentata con mattonelle da esterno, per il resto a falde in laterocemento.

La struttura è in muratura portante avente fondazione continua in muratura e solai in travi di ferro e laterizi. La muratura perimetrale presenta uno spessore di 1 m in media per la parte inferiore, ma diminuisce in altezza.

L'involucro trasparente è composto da finestre in legno con vetro singolo: al piano primo in prossimità dei balconi vi sono portefinestre, per le restanti vi sono finestre delle dimensioni di 120x120 cm (Fig. 2).

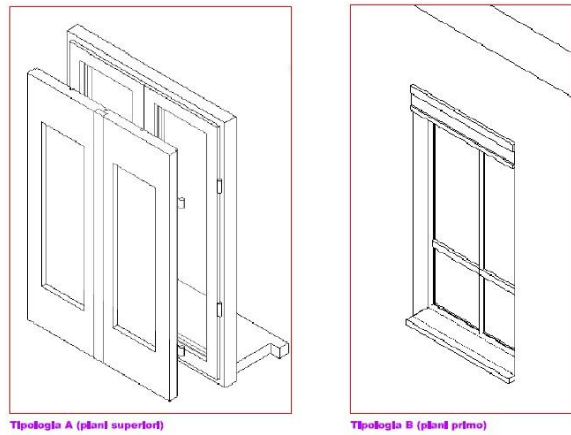


Fig. 2: Involucro trasparente

4.1 Caratterizzazione del caso studio

In seguito alle indagini visivo-documentali, si denotano le seguenti caratteristiche:

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE

Costruito nel XVII secolo

1 piano seminterrato

4 piani fuori terra

23 m di altezza fuori terra

-3/4 m dal piano di calpestio si trova la quota di imposta delle fondazioni

CARATTERISTICHE STRUTTURALI

Struttura in muratura portante

Presenza di volte al piano seminterrato; per i restanti piani solai in travi di ferro e laterizio

Fondazioni continue in muratura

Quadro lesionativo lieve

Indice di vulnerabilità ($0 < V < 10$): significativo = 7.12



Fig. 3: Vista del perimetro esterno di Palazzo Baleani

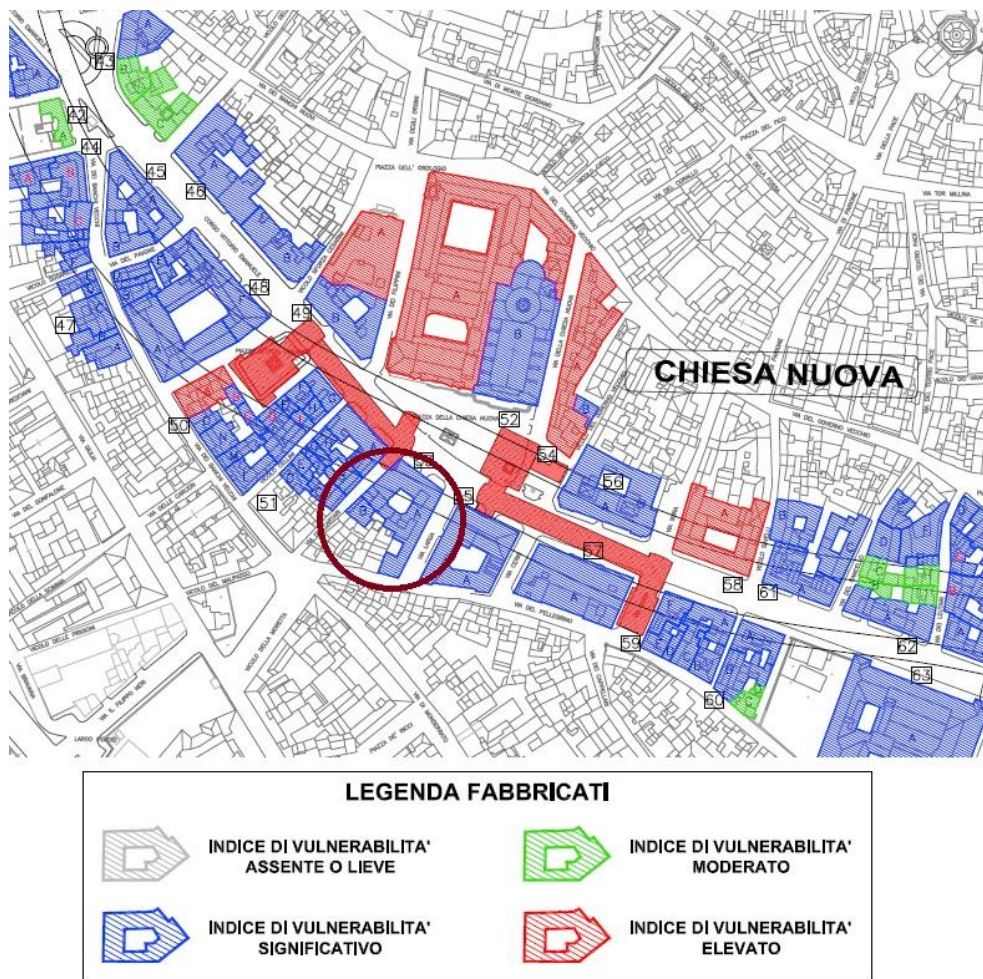


Fig. 4: Inquadramento stato di fatto indice di vulnerabilità

L'edificio ad oggi appare in buono stato di conservazione.

Dal punto di vista energetico, essendo un edificio storico, presenta un involucro edilizio datato e quindi termicamente non performante. A seguito dei sopralluoghi condotti e delle indagini effettuate si è potuto rilevare lo stato di fatto dell'involucro edilizio e degli impianti esistenti. L'impianto di riscaldamento è centralizzato ed entra in funzione solamente nel periodo invernale tra le 7 e le 16. È costituito da radiatori in ghisa a parete, con un numero di elementi variabili a seconda del locale, come riportati in Fig. 5. I radiatori sono alimentati da due caldaie a metano in parallelo da 303.4 kW e 174 kW, che provvedono alla generazione dell'energia termica necessaria a soddisfare il fabbisogno dell'intero edificio ed alla produzione di acqua calda sanitaria. La resa termica dei radiatori è stata stimata per analogia con radiatori di caratteristiche costruttive analoghe. In figura è riportata la targhetta con le caratteristiche della caldaia.



Fig. 5: Caratteristiche termiche Caldaia (sinistra) e esempio di radiatori presenti (destra)

Il raffrescamento dell’edificio non è gestito da un unico impianto. La refrigerazione è presente solamente nei locali a destinazione d’uso ad ufficio, attraverso condizionatori (mono split e dual split) le cui unità esterne sono per la maggior parte posizionate sul balcone interno presente al piano primo, come mostrato in Fig. 6. La potenza frigorifera installata è variabile in funzione del piano, come riportato nella tabella sottostante.

Piano	Potenza Elettrica Totale [kW]	Potenza Frigorifera Totale [kW]
Terra	-	-
Primo	20	60.5
Secondo	15	42
Terzo	8	24
Quarto	-	-

Tabella 4: Ripartizione tra i piani della potenza frigorifera



Fig. 6: Unità Esterne climatizzazione

Fino al 2010 era presente un impianto tutt'aria, posto al primo piano che provvedeva al condizionamento dell'intero edificio. Nonostante l'UTA sia stata smantellata, sono attualmente presenti le canalizzazioni del vecchio impianto di condizionamento, le bocchette di aspirazione dell'aria all'interno dei vari locali e le unità di produzione poste sulla copertura dell'edificio, come evidenziato in figura seguente.



Fig. 7: Chiller dell'UTA presente in copertura

Sulla copertura è presente un impianto per la produzione acqua calda sanitaria composto da:

- Quattro collettori solari in serie, del tipo sottovuoto;
- Un boiler per l'accumulo termico da 716 litri, posto nel locale tecnico al piano interrato.



Fig. 8: Collettori solari presenti in copertura

L'impianto, nonostante sia dotato di tutti i componenti necessari al funzionamento, è in disuso da diverso tempo, affidando così la produzione dell'acqua calda sanitaria ad una caldaia con una potenza termica nominale di 158.9 kW.

Oltre ai componenti dell'impianto con basse performance (EER nominale dei condizionatori pari a 2.25) ed un livello nullo di produzione di energia da fonti rinnovabili, eccezion fatta per la quota parte di energia elettrica prelevata dalla rete prodotta da FER, la problematica degli attuali impianti energetici è l'inesistenza di un sistema di controllo e gestione che permetta un uso razionale dell'energia senza andare ad inficiare le prestazioni di comfort termico garantito dall'impianto.

In Fig. 9 è riportata la planimetria del primo piano, preso ad esempio per indicare la disposizione delle bocchette esistenti (in rosso) appartenenti al vecchio impianto e i radiatori in ghisa (in blu).

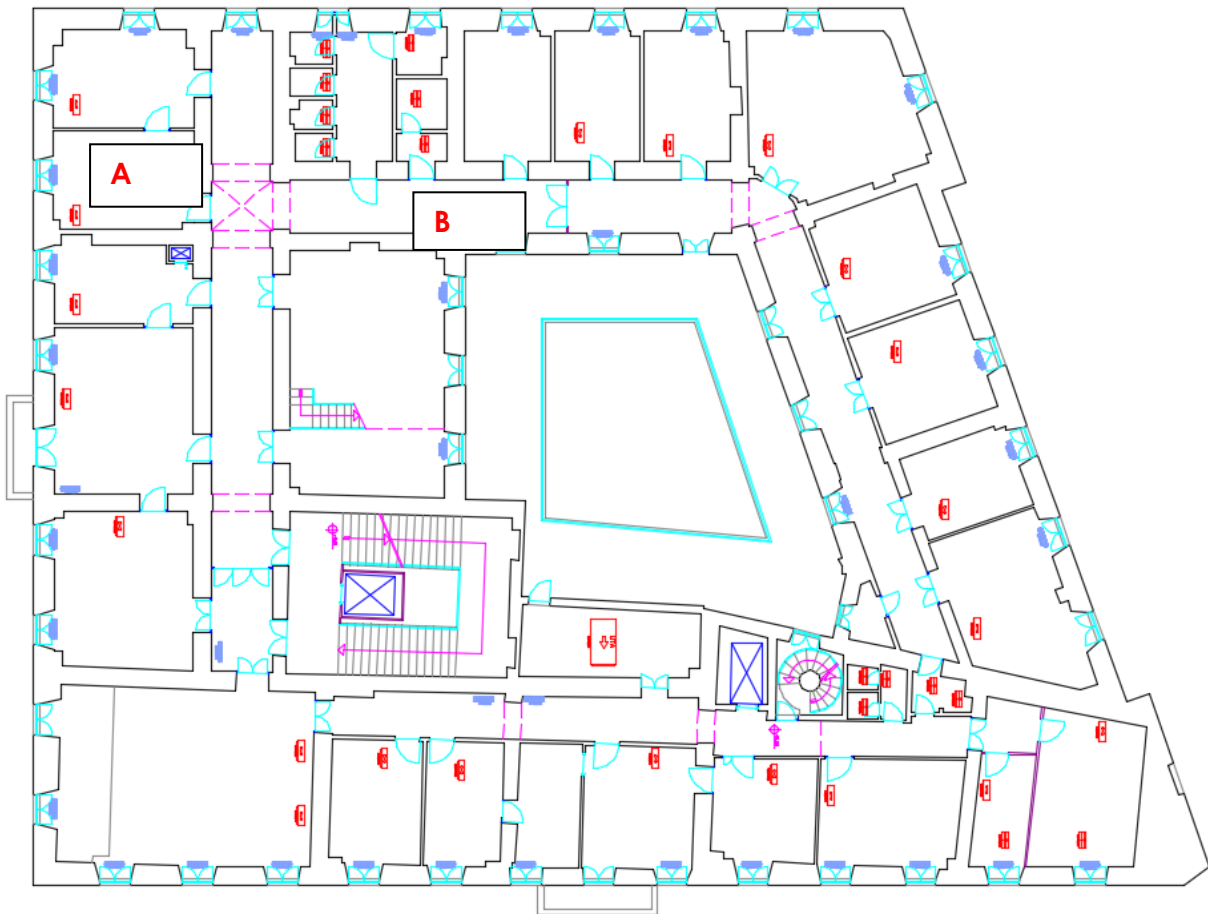


Fig. 9: Disposizione bocchette di aspirazione aria (Rosse) e radiatori (blu) al primo piano

L'edificio gode di una fornitura di energia elettrica dalla rete pubblica in media tensione a 8.4 kV con una potenza impegnata di 600 kW, conseguentemente è presente una cabina di trasformazione secondaria MT/BT privata all'interno della quale sono presenti 3 trasformatori da 325 kVA cadauno. All'interno dell'edificio viene svolta quasi esclusivamente un'attività d'ufficio, conseguentemente gli assorbimenti elettrici sono stati classificati in:

- Illuminazione;
- Climatizzazione;
- Pc e stampanti;
- Altri carichi.

Nell'ultima categoria sono compresi carichi misti quali: motori elettrici dell'ascensore, distributori automatici, assorbimenti passivi della cabina di trasformazione MT/BT.

L'illuminazione degli ambienti è affidata quasi del tutto a lampade tubolari a fluorescenza con reattore elettromeccanico (T8). Negli uffici sono presenti plafoniere con un'unica lampada da 58W, mentre nei corridoi sono presenti plafoniere con quattro lampade tubolari a fluorescenza da 18W montate ad incasso sul controsoffitto a 3.5 metri da terra. Alla descrizione sopra indicata fa eccezione l'illuminazione della sala conferenze, presente al primo piano, in cui sono installati 10 proiettori alogeni da 150W che permettono l'illuminazione dell'affresco presente sul soffitto a volta. La potenza nominale dell'impianto di illuminazione è attualmente pari a circa 16 kW.

5 Modellazione dello stato di fatto

Nel seguente paragrafo verrà illustrato modello di simulazione utilizzato per lo svolgimento della diagnosi energetica per palazzo Baleani. La diagnosi energetica è svolta attraverso una simulazione dinamica che prevede l'utilizzo del software TRNSYS.

TRNSYS è un software di facile implementazione, atto alla simulazione dinamica di uno stabilito fenomeno. È utilizzato soprattutto da ingegneri e ricercatori per validare nuovi concetti energetici, che possono andare dalla valutazione del comportamento di un sistema di produzione di acqua calda sanitaria da collettori solari, all'analisi dinamica del comportamento di un edificio "multi-zone". Il software dà all'utente la possibilità di sviluppare facilmente componenti personalizzati usando i più comuni linguaggi di programmazione (C, C++, PASCAL, FORTRAN, etc.).

TRNSYS 16 è composto principalmente da tre moduli che permettono all'utente di svolgere le funzioni sopra elencate:

- TRNSYS Simulation Studio: il "cuore" del software, permette lo studio in dinamico del processo da analizzare;
- TRNSYS Build: è il tool usato per l'inserimento dei dati di input di un edificio multizona necessari per simularne il comportamento termico;
- ZTRNSYS Edit: è il tool editor che permette la creazione o la modifica dei file di input per le simulazioni su TRNSYS Simulation Studio.

Trnsys si distingue da altri software di simulazione per la possibilità di disporre al proprio interno di una libreria contenente centinaia di componenti specifici: le Tess Libraries. All'interno delle Tess Libraries sono contenuti i componenti per l'analisi in dinamico di uno specifico fenomeno. I moduli, chiamati Type, presenti all'interno delle Tess Libraries sono specifici per l'analisi di un singolo fenomeno per i quali sono stati precedentemente programmati dagli sviluppatori del software. Quello che quindi in prima analisi può sembrare un vantaggio si rivela in alcuni casi uno svantaggio in quanto le Type all'interno di un modello possono comunicare solamente con altre Type predefinite.

5.1 Il modello su TRNBuild

Il modello è stato costruito seguendo le direttive imposte dalla norma UNI/TS 11300-1 "Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale". La normativa fornisce la definizione di edificio come "costituito da uno o più fabbricati (involucri edilizi) o da porzioni di un fabbricato, climatizzati attraverso un unico sistema di generazione". Nel caso di Palazzo Baleani il sistema di generazione dell'energia termica è costituito da un impianto con caldaia a metano, presente nel locale tecnico al piano interrato, che asserva tutto lo stabile.

5.1.1 Le zone termiche

Si è proceduto all'individuazione delle zone termiche da analizzare nel corso dello studio. La ripartizione dei vari piani in zone termiche è stata effettuata sempre seguendo le direttive imposte dalla norma UNI/TS 11300-1 che detta le condizioni per la suddivisione dell'edificio in sotto aree denominate "Zone Termiche": "ogni porzione di edificio, climatizzata ad una determinata temperatura con identiche modalità di regolazione, costituisce una zona termica".

La zonizzazione non è richiesta se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- a) le temperature interne di regolazione per il riscaldamento differiscono di non oltre 4K;
- b) gli ambienti non sono raffrescati o comunque le temperature interne di regolazione per il raffrescamento differiscono di non oltre 4K;
- c) gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di climatizzazione;

d) se vi è un impianto di ventilazione meccanica, almeno l'80% dell'area climatizzata è servita dallo stesso impianto di ventilazione con tassi di ventilazione nei diversi ambienti che non differiscono di un fattore maggiore di 4;

e) se vi è il controllo dell'umidità, le umidità relative interne di regolazione differiscono non oltre 20 punti percentuali".

Seguendo tale definizione è stato possibile suddividere tutto l'edificio in 132 zone termiche. Il dettaglio della ripartizione dell'edificio è riportato nelle planimetrie seguenti:

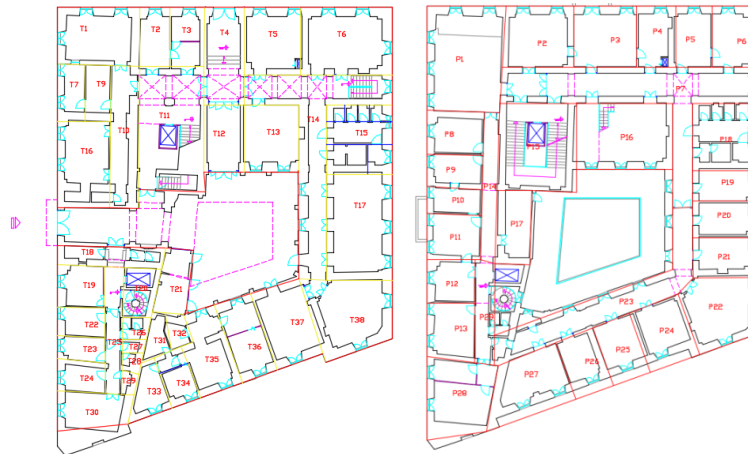


Fig. 10: Planimetria piano terra e piano primo



Fig. 11: Planimetria piano secondo, piano terzo e piano quarto

Definita la ripartizione dell'edificio si è proceduto alla caratterizzazione di ogni singola zona termica determinandone le proprietà indispensabili per il calcolo del regime termico all'interno dell'edificio.

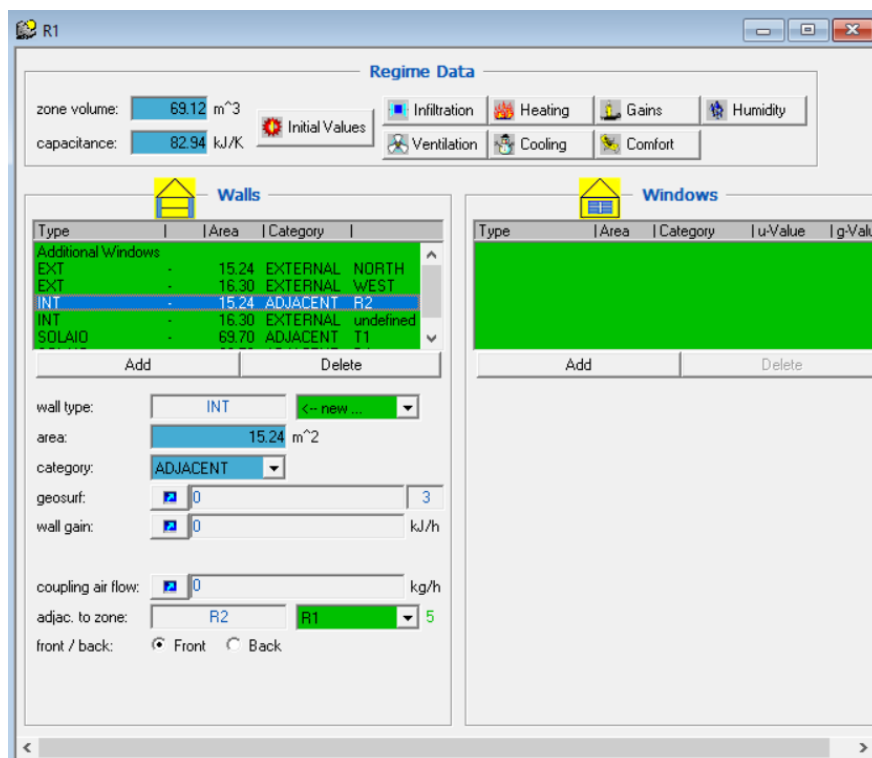


Fig. 12: Interfaccia TRNSYS per la definizione dei parametri di zona

In Fig. 12 è rappresentata l'interfaccia attraverso la quale il software permette di definire le caratteristiche di ogni zona termica:

- Dimensioni della zona termica;
- Definizione di pareti confinanti con altre zone termiche (Adjacent) o con l'ambiente esterno (External);
- Caratteristiche termotecniche delle superfici opache e trasparenti;
- Definizione dei carichi termici interni alla zona termica;
- Frequenza oraria di ricambi d'aria;
- Caratteristiche dell'impianto di riscaldamento;
- Caratteristiche dell'impianto di raffrescamento;
- Caratteristiche dell'impianto di ventilazione;
- Caratteristiche igrometriche dell'aria;
- Definizione dei parametri per il calcolo del Comfort Termico.

5.1.2 Definizione dei pacchetti murari e finestre

TRNBuild permette allo sviluppatore del modello di creare nuovi pacchetti murari che abbiano le caratteristiche desiderate, attraverso l'opzione "Wall Type Manager". Tramite il software, quindi, sono stati implementati i pacchetti murari esterni, interni, i solai interpiano, il solaio di fondazione, il tetto e le finestre che appartengono ad ogni singola zona termica. In assenza di una strumentazione adeguata che permettesse la misura delle prestazioni termiche dell'involucro edilizio, le informazioni necessarie sono state recuperate da precedenti lavori di ricerca svolti sull'edificio [1]. Essendo un palazzo storico risalente ai primi anni del 800, le pareti che delimitano l'edificio costituiscono a muratura portante. Lo spessore medio di una parete è di circa 1 m, con una trasmittanza di $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Le pareti interne che separano le varie zone termiche, come si può notare dalle planimetrie precedentemente riportate in Fig. 10 e Fig. 11, sono di due tipologie:

- Muratura portante con uno spessore di 1 m, ed una trasmittanza di 0.884 W/m²K, appartenenti all'involucro edilizio originario;
- Parete divisoria mobile con uno spessore di 0.2 m ed una trasmittanza di 0.704 W/m²K.

Per la prima tipologia è stata utilizzata la parete descritta precedentemente mentre per le superfici verticali opache perimetrali, è stata implementata una parete con caratteristiche strutturali simili a quelle esposte nel secondo punto sopra. Il solaio interpiano presenta invece uno spessore di 0.9 m ed una trasmittanza di 0.367 W/m²K, ed è costituito da travi in ferro e laterizi. Per la determinazione della trasmittanza del pavimento appoggiato sul terreno (in questo caso costituito da sabbia e ghiaia), si è utilizzato il valore fornito dalla norma UNI 13370 che tiene conto della conduttività termica del pavimento. Il tetto è costituito da una struttura piena in latero cemento coperta superiormente da tegole in laterizio, che presentano una trasmittanza pari a 0.448 W/m²K. In Tabella 5, sono riportate le caratteristiche delle superfici opache geometriche e termiche presenti nell'edificio.

Tipologia	Spessore[m]	Descrizione	Trasmittanza[W/m ² K]
Muratura perimetrale	1	Muratura portante	0.8
Muratura interna	1	Muratura portante	0.8
Muratura interna	0.2	Pannello mobile in PVC	0.704
Solaio interpiano	0.5	Travi in ferro e laterizi	0.367
Tetto	0.9	Latero cemento con tegole in laterizio	0.448

Tabella 5: Caratteristiche superfici opache

Le finestre presenti nell'edificio sono state modellate tramite la funzione "Windows Type Manager" che ha permesso di definire le caratteristiche termiche della vetrata presente nell'edificio.

Tutte le finestre presenti sono a vetro singolo ($U = 4.8 \text{ W/m}^2\text{K}$), ma differenti per dimensione in ogni piano. Al piano terra ed al primo piano sono presenti superfici verticali trasparenti alte 2.42 m e larghe 1.20 m con apertura a doppia anta mentre nei piani successivi le finestre presentano la medesima larghezza, ma un'altezza inferiore (1.15m).

In Tabella 6 è riportato un riepilogo della ripartizione delle superfici trasparenti nell'edificio:

Piano	S. finestra [m ²]	S. Totale [m ²]	NORD [%]	EST [%]	SUD [%]	OVEST [%]
Terra	2.90	92.93	25%	25%	19%	31%
Primo	2.90	104.54	22%	25%	17%	36%
Secondo	1.38	51.06	25%	24%	16%	35%
Terzo	1.38	49.68	25%	25%	19%	31%
Quarto	1.38	16.56	42%	8%	0%	50%

Tabella 6: Dettaglio finestre

5.1.3 Definizione dei carichi termici interni

I carichi interni rappresentano gli apporti di calore sensibile e latente agli ambienti condizionati provenienti dall'interno degli ambienti stessi. Generalmente sono dovuti a:

- Persone presenti all'interno dell'ambiente;
- Illuminazione;
- Macchinari che in esercizio raggiungono temperature superiori a quella ambiente.

Il software dà la possibilità all'utente di riportare i carichi interni di una zona termica tramite l'interfaccia "Gains" riportata in Fig. 13:

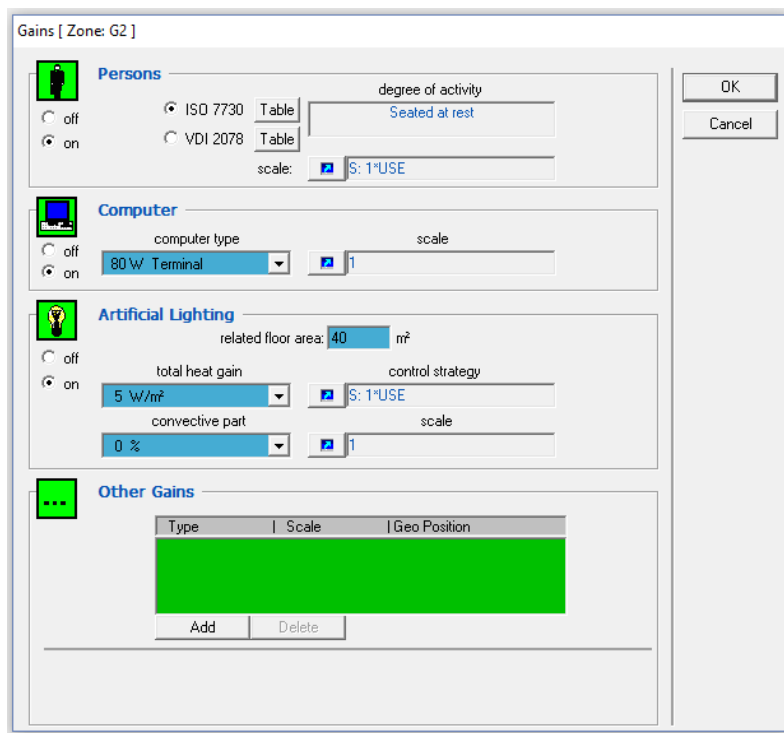


Fig. 13: Interfaccia TRNBuild per la definizione dei carichi interni

Per i valori di riferimento per l'edificio di palazzo Baleani sono stati impostati mediamente i seguenti valori:

- Densità di potenza dovuta alle persone: 150 W/persona;
- Densità di potenza dovuta all'illuminazione: 5 W/m²;
- Densità di potenza dovuta alle apparecchiature elettroniche: 2.2 W/m².

5.1.4 Occupancy

Per definire gli apporti termici derivanti dalla presenza di persone all'interno dell'ambiente è stato necessario definire due parametri (come mostrato in Tabella 7): il tipo di attività svolta dalle persone ed il numero di persone presenti all'interno.

No.	Degree of Activity	Typical Application	Total Heat Adjusted		Sensible Heat		Latent Heat	
			Watts	Btu/h	Watts	Btu/h	Watts	Btu/h
<input type="radio"/> 01	Seated at rest	Theatre, Movie	100	350	60	210	40	140
<input type="radio"/> 02	Seated, very light writing	Office, Hotels, Apts	120	420	65	230	55	190
<input type="radio"/> 03	Seated, eating	Restaurant	170	580	75	255	95	325
<input checked="" type="radio"/> 04	Seated, light work, typing	Office, Hotels, Apts	150	510	75	255	75	255
<input type="radio"/> 05	Standing, light work or working slowly	Retail Store, Bank	185	640	90	315	95	325
<input type="radio"/> 06	light bench work	Factory	230	780	100	345	130	435
<input type="radio"/> 07	walking 1,3 m/s (3 mph) light machine work	Factory	305	1040	100	345	205	695
<input type="radio"/> 08	Bowling	Bowling Alley	280	960	100	345	180	615
<input type="radio"/> 09	moderate dancing	Dance Hall	375	1280	120	405	255	875
<input type="radio"/> 10	Heavy work, lifting Heavy machine work	Factory	470	1600	165	565	300	1035
<input type="radio"/> 11	Heavy work, athletics	Gymnasium	525	1800	185	635	340	1165

Tabella 7: Apporto termico derivante dall'occupancy

Il software presenta al suo interno delle tabelle per la valutazione della potenza termica prodotta dal corpo umano in funzione del tipo di attività svolta, in questo lavoro ci si è avvalsi della tabella proposta dalla ISO 7730 denominata "Rates of Heat Gain from Occupants of Conditioned Spaces". Facendo riferimento alla tabella suddetta le attività svolte all'interno dell'edificio sono:

- "Seated, light work, typing" nei luoghi di lavoro (uffici, studi, aule) presenti nell'edificio, a cui è associato un carico sensibile pari a quello latente di 75 W;
- "Standing, light work or working slowly" nei corridoi e negli spazi comuni, a cui è associato un carico sensibile di 90 W ed un carico latente di 95 W.

Per la definizione del numero di persone presenti in un locale sono stati definiti gli andamenti orari di presenza percentuale ("Schedule") degli occupanti, riportata in Fig. 14:

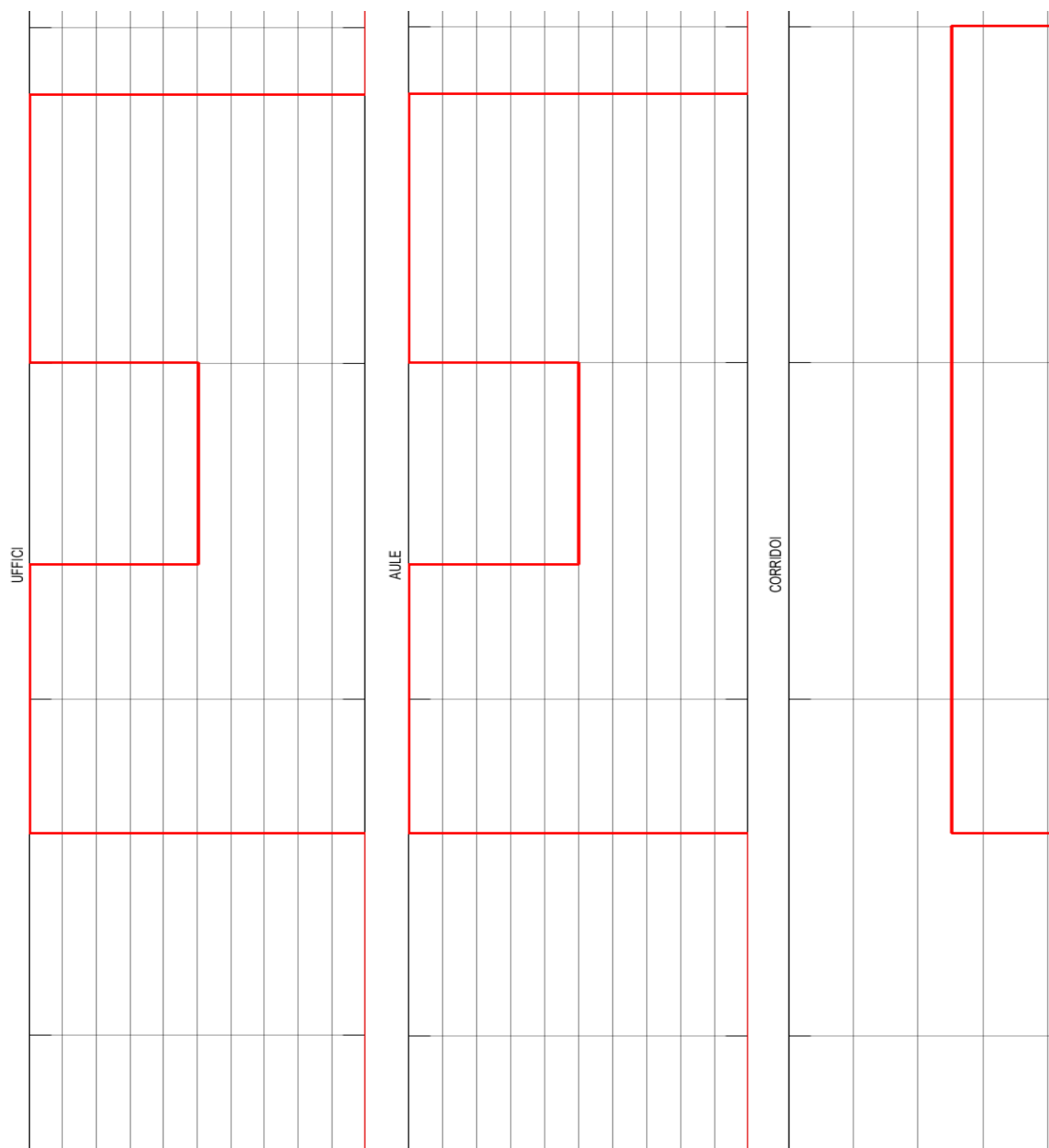


Fig. 14: Schedule occupancy degli uffici, corridoi e delle aule

5.1.5 Illuminazione ed apparecchiature elettriche

Per determinare la quota parte di carichi dovuti all’illuminazione è stato moltiplicato il valore di densità di potenza installata (5 W/m^2) per l’estensione della superficie illuminata. Tramite il software è stata selezionata una strategia di controllo dell’accensione dell’impianto di illuminazione all’interno della zona termica.

Allo stato attuale nell’edificio di Palazzo Baleani non esiste un sistema di controllo e gestione dell’impianto di illuminazione centralizzato e per tale motivo si è optato per la tipologia di accensione manuale. Il software permette anche di stabilire il fenomeno per cui avviene la trasmissione del calore (irraggiamento, convezione o conduzione). Attualmente l’illuminazione è affidata sostanzialmente a lampade a fluorescenza per le quali il “25% dell’energia assorbita viene dissipato in forma radiante sulle superfici circostanti. Il restante 50% viene dissipato per conduzione e per convezione” [2].

Oltre ai carichi termici relativi all’illuminazione sono stati implementati gli altri carichi termici derivanti dalle apparecchiature elettriche quali: computer, stampanti, distributori del caffè e ascensori. Per ognuno di questi è stata definito, l’orario di funzionamento e la potenza termica generata sulla base della schedule di occupancy.

5.1.6 Ricambi d'aria

Nella singola zona termica è possibile impostare la frequenza di apertura delle finestre. Si è ipotizzata l'apertura delle finestre nelle ore calde durante il periodo invernale (12-15) mentre durante il periodo estivo discorso si avrà l'apertura delle finestre durante le ore meno calde (7-8 e 18-20). Il valor medio di portata d'aria di ricambio all'interno del singolo locale è stato impostato a $11 \text{ m}^3/\text{h}$.

5.1.7 Parametri per il calcolo del comfort termico

Il software permette di impostare i fattori per il calcolo del comfort termico all'interno della zona termica tramite il comando "Comfort Type Manager". Nella Fig. 15 è mostrata l'interfaccia utente del software tramite la quale sono stati impostati i parametri:

- Clothing Factor (CF): parametro che indica la resistenza termica dell'abbigliamento, misurata in clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$);
- Metabolic Rate (MR): Parametro che indica la potenza termica prodotta dal corpo umano in relazione al tipo di attività svolta, misurata in met ($1 \text{ met} = 58.2 \text{ W}/\text{m}^2$);
- External Work (EW): parametro addizionale della potenza termica prodotta dal corpo umano che "generalmente è pari a zero" [3];
- Relative air velocity: parametro che indica la velocità dell'aria all'interno della stanza, misurata in m/s.

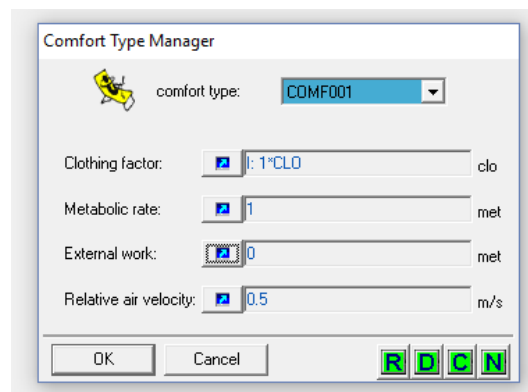


Fig. 15: Interfaccia TRNSYS parametri di comfort

Nel modello il CF è stato considerato uguale per tutte le zone termiche e variabile in funzione del periodo dell'anno, attribuendogli un valore di 1 clo nel periodo invernale e di 0.5 nel periodo estivo, tramite un input, denominato CLO, che viene inviato direttamente dal modello sul Trnsys Simulation Studio e che verrà illustrato in seguito.

La velocità dell'aria all'interno del locale e la potenza generata dal corpo umano sono stati ipotizzati costanti e pari a 0.5 m/s e 1 met.

5.1.8 Impianto di climatizzazione

Trnsys Build dà l'opportunità all'utente di impostare le caratteristiche dell'impianto di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione tramite opportune interfacce accessibili direttamente dal "Zone Manager" denominate rispettivamente Heating, Cooling e Ventilation.

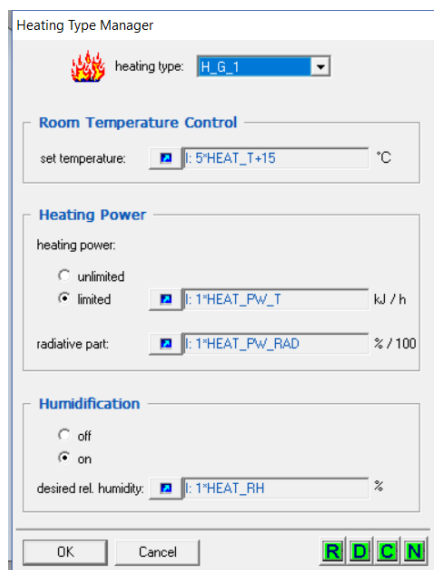


Fig. 16: Interfaccia utente Heating Manager

L’interfaccia relativa al riscaldamento ed al raffreddamento è pressoché identica, tramite questa è possibile:

- Impostare il valore di temperatura sopra (Heating) o sotto (Cooling) la quale attivare l’impianto;
- Impostare la potenza termica dell’impianto e la percentuale radiativa del flusso termico (solo per l’Heating);
- Impostare il valore di umidità relativa al di sotto (sopra) è necessario umidificare (deumidificare).

Nel modello sviluppato i valori di set point della temperatura e dell’umidità relativa, così come la potenza termica dell’impianto di riscaldamento e di raffreddamento, sono stabiliti direttamente all’interno del modello di simulazione su Trnsys Simulation Studio il quale comunica con il Trnsys Build che li riceve come input esterni.

Nel “Ventilation Type Manager” è stato possibile impostare la temperatura e l’umidità relativa dell’aria di ventilazione, stabiliti sempre tramite input.

In Tabella 8 sono riportati gli input al modello di Trnsys Build relativi all’impianto di climatizzazione:

Input
Temperatura di set point del riscaldamento: 19 °C
Percentuale di umidità relativa in ambiente prima di cominciare ad umidificare: 38%
Temperatura di setpoint del raffreddamento: 26 °C
Percentuale di umidità relativa prima di iniziare a deumidificare:52%
Temperatura aria esterna: variabile in funzione del periodo di simulazione
Radiazione solare incidente per ogni asse cardinali: variabile in funzione del periodo di simulazione

Tabella 8: Input Modello TRNBuild

5.1.9 Outputs del modello TRNBuild

Il modello così creato permette l’analisi del regime termico all’interno dell’edificio tramite la valutazione dei parametri finora citati. Al fine di identificare gli interventi di riqualificazione e calcolare gli indici di performance, sia dello stato di fatto che del post intervento, sono stati scelti gli output forniti dal modello TRNBuild da implementare e simulare nel modulo Trnsys Simulation Studio. Tali output ottenuti possono essere divisi in due categorie a seconda se sono riferiti ad una singola zona termica o alla somma delle zone termiche presenti in un piano dell’edificio.

Gli output relativi alla singola zona termica e validi per tutte le zone termiche sono di seguito riportati (Output di comfort termico):

- Temperatura dell'aria all'interno della zona termica;
- PMV e PPD della singola zona termica.

Per quanto riguarda gli output della seconda tipologia si hanno invece (consumi di energia primaria):

- La potenza termica sensibile fornita dal sistema di riscaldamento;
- La potenza termica sensibile fornita dal sistema di raffrescamento;
- La potenza termica scambiata con le superfici per convezione;
- La potenza termica sensibile derivante dalle infiltrazioni di aria esterna;
- La potenza termica sensibile del sistema di ventilazione dell'edificio.

5.1.10 Il modello su Trnsys Simulation Studio

In questo paragrafo si provvederà alla descrizione del modello implementato per la generazione degli output termici e di comfort generati dal TRNSYS Simulation Studio, come mostrato in Fig. 17.

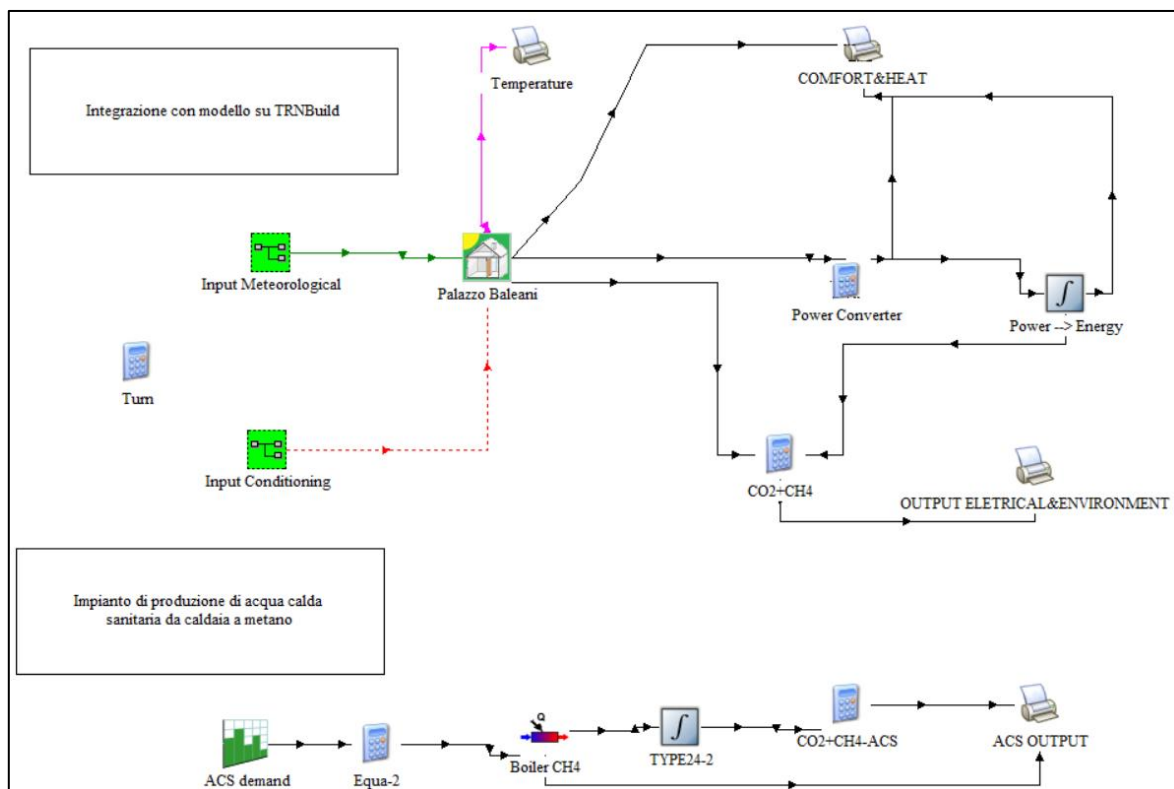


Fig. 17: Modello implementato su TRNSYS Simulation Studio

Il modello, riportato in Fig. 17, è essenzialmente diviso in:

- Fabbisogno termico ed elettrico edificio;
- Impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria.

Le due sezioni sono indipendenti l'una dall'altra in quanto nel modello sviluppato sul Trnsys Build viene esclusivamente trattato il fabbisogno termico dell'edificio e non viene trattato l'utilizzo dell'energia come ad esempio l'elettricità o la produzione di acqua calda sanitaria.

5.1.11 Fabbisogno termico ed elettrico edificio

Tramite questa parte del modello è stato analizzato il fabbisogno termico dell'edificio, attraverso la quantificazione della richiesta di energia termica da fornire con l'impianto di climatizzazione, il relativo assorbimento elettrico ed il conseguente impatto ambientale.

È possibile dividere il "fabbisogno termico ed elettrico edificio" in tre microaree (Fig. 18):

- Input: area comprendente i dati di input per il modello del TRNBuild;
- Edificio: costituita dal modello sviluppato sul Trnsys Build e precedentemente illustrato;
- Output: area comprendente gli output dell'edificio e ottenuti tramite la simulazione.

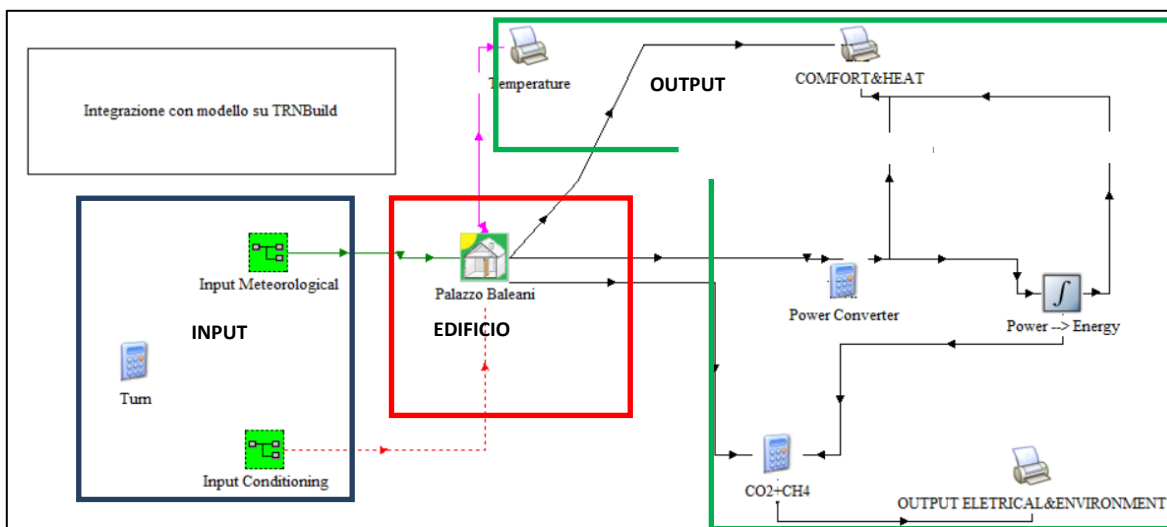


Fig. 18: Fabbisogno termico ed elettrico edificio

Il modello di edificio implementato necessita di input che gli forniscano informazioni riguardanti i dati climatici della zona geografica a cui appartiene l'edificio e le caratteristiche dell'impianto di climatizzazione dell'edificio.

I dati climatici utilizzati sono forniti direttamente dal software, il quale al suo interno presenta una libreria con le informazioni climatiche di svariati siti nel mondo provenienti da:

- NREL database, all'interno del quale sono presenti i dati climatici relativi a 237 siti negli Stati Uniti d'America e 2 file per Porto Rico e Guam;
- Meteonorm database, all'interno del quale vi sono informazioni riguardanti oltre 1000 siti appartenenti a 150 nazioni differenti.

Nell'immagine seguente sono riportati i siti nel mondo per i quali è possibile ottenere dati attendibili. In blu sono riportati i dati forniti da NREL e in nero quelli di Meteonorm:

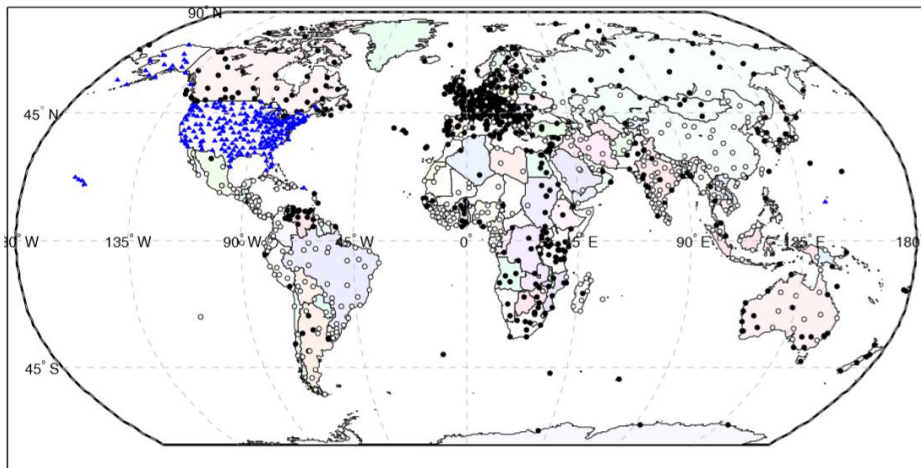


Fig. 19: Dati climatici reperibili [4]

I dati climatici inseriti nel modello sono relativi a Ciampino, in quanto rappresenta la località (tra le disponibili) geograficamente più vicina alla sede di Palazzo Baleani. Il blocco “Input Meteorological” è mostrato in Fig. 20. Tramite il “Weather Data” sono stati impostati i parametri relativi alla radiazione solare diretta e diffusa incidente sulle superfici dell’edificio. Tramite lo “Psychrometrics” sono stati forniti i dati psicrometrici dell’ambiente esterno, mentre con lo “Sky Temp” è stata fornita la temperatura fittizia al sole e il parametro di nuvolosità del cielo.

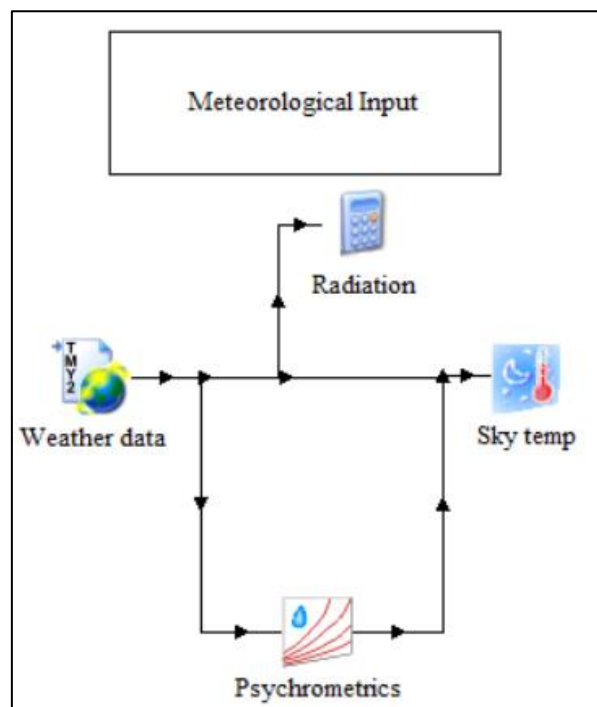


Fig. 20: Modello input climatici

Come specificato precedentemente, l’impianto di riscaldamento di Palazzo Baleani di tipo centralizzato e viene azionato soltanto durante il periodo invernale e l’orario di apertura effettivo dell’edificio. Seguendo queste direttive si è provveduto alla realizzazione di segnali di input tali da garantire un comportamento analogo a quello appena indicato.

Gli input relativi alla climatizzazione sono volti a definire:

- I periodi di funzionamento degli impianti di riscaldamento e raffrescamento;

- La potenza dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento;
- La resistenza termica dell'abbigliamento per il calcolo del comfort termico.

Il modello di Trnsys Build permette la gestione dell'accensione e dello spegnimento degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento esclusivamente tramite l'impostazione di una temperatura di setpoint che ne determini l'accensione. Uno svantaggio di questo approccio è l'impossibilità di creare all'interno del modello di edificio un sistema di accensione e spegnimento dell'impianto di climatizzazione in funzione del tempo di simulazione, in quanto l'unica tipologia di input accettata. Per tale motivo è stato necessario creare due segnali di temperatura, tempo dipendente, che permettessero la variazione della temperatura di set point dell'impianto di riscaldamento e di raffrescamento del modello, denominati "Heat_T" e "Cool_T".

I segnali sopra citati derivano dalla combinazione di più segnali ideati al fine di garantire l'accensione sia in funzione del giorno e della notte che della stagione:

- THA (Time_Heat_Annual): segnale annuale di temperatura che determina l'accensione o lo spegnimento dell'impianto in funzione della stagione. Tale parametro varia tra un valore di 3 °C quando l'impianto è in funzione ad un valore di -50 °C quando viene ipotizzato spento (Fig. 21);
- THD (Time_Heat_Daily): segnale giornaliero di temperatura che determina l'accensione o lo spegnimento dell'impianto nell'arco della giornata. Tale segnale è stato pensato in modo tale che dia dei valori differenti (oltre che tra notte e giorno) tra il periodo estivo ed il periodo invernale, in modo da non generare valori positivi della temperatura di setpoint quando il THA assume valori negativi. In tal modo si è ottenuto un parametro che assume un valore che oscilla ripetutamente tra 1 °C e -50 °C (nel periodo invernale) e tra 1 °C e 0 °C nel periodo estivo (Fig. 22 e Fig. 23).

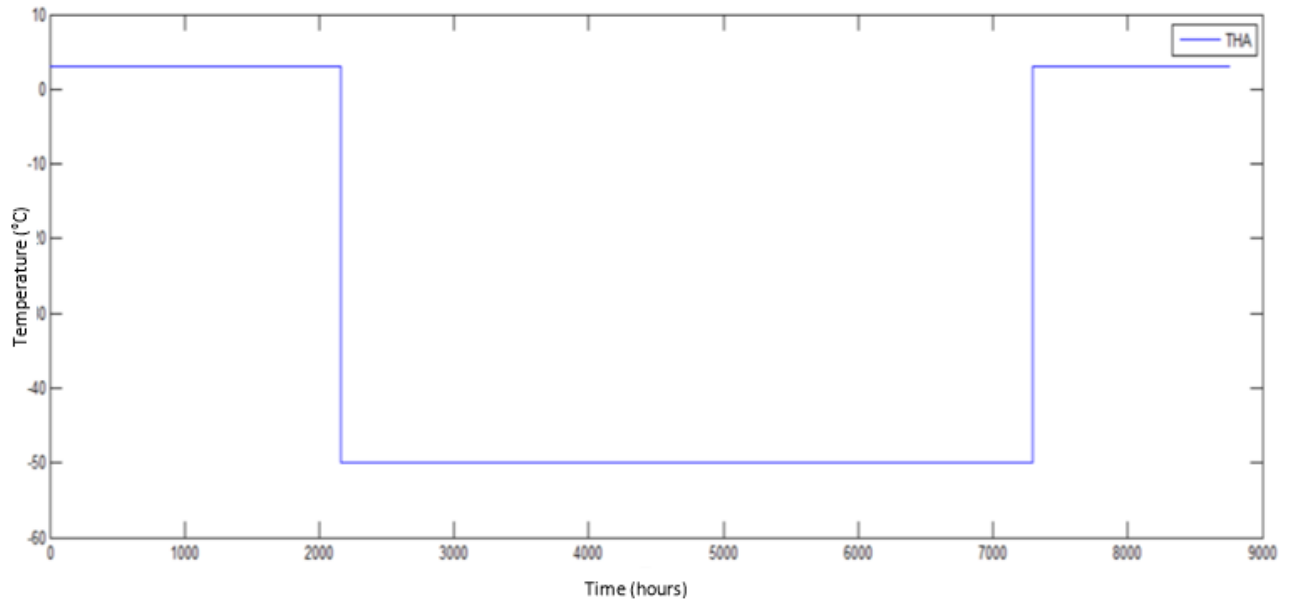


Fig. 21: THA periodo invernale

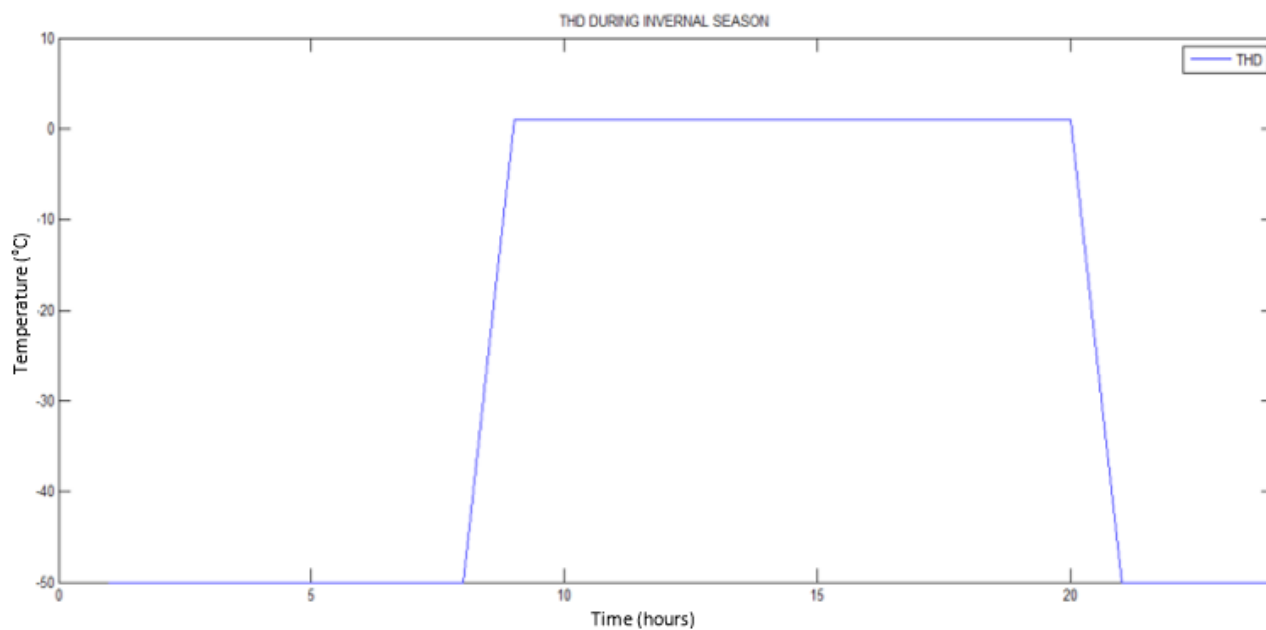


Fig. 22: THD periodo invernale

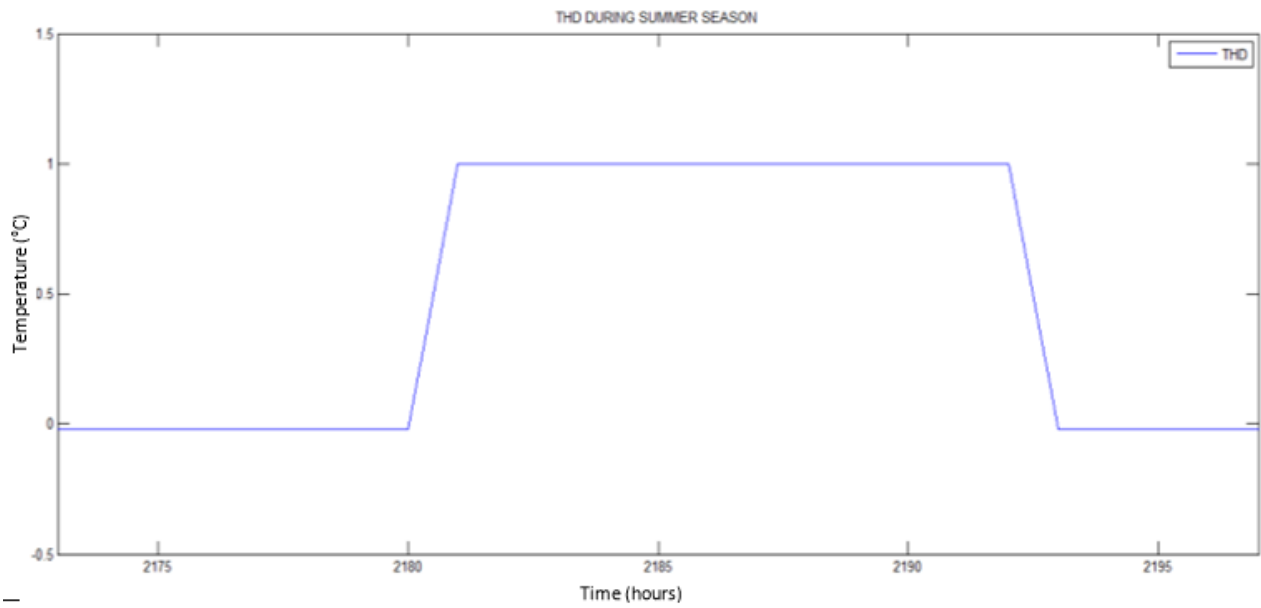


Fig. 23: THD periodo estivo

Il segnale di accensione globale dell'impianto viene così a determinarsi dal prodotto tra i due segnali precedentemente stabiliti:

$$HEAT_T = THD * THA \quad (1)$$

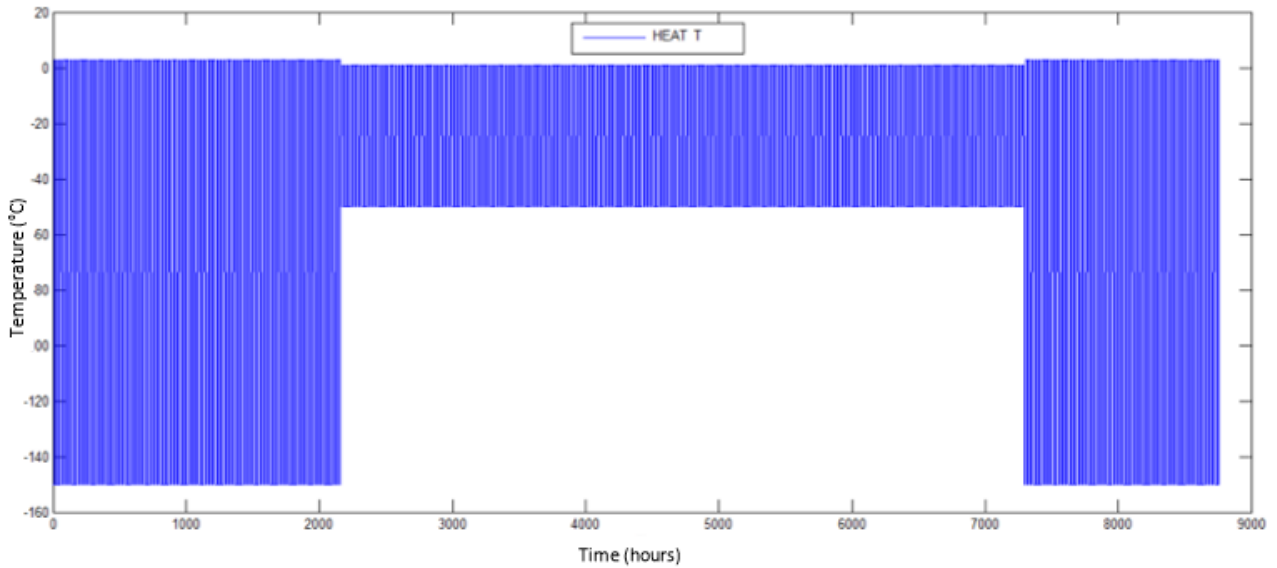


Fig. 24: Andamento annuo HEAT_T

In questa maniera durante il periodo di funzionamento dell'impianto (in inverno e durante l'orario di apertura del palazzo tra le 8 e le 20) il segnale HEAT_T sarà pari a 3 °C, mentre durante gli orari di non funzionamento nel periodo invernale sarà pari a -150 °C e nel periodo estivo sarà alternativamente pari a 0 °C e -50 °C. Per chiarire ulteriormente il concetto appena esposto si ricorda che il segnale HEAT_T viene letto dal modello di edificio creato e da questo ne deriva la temperatura di set point sotto la quale viene azionato l'impianto di riscaldamento tramite la seguente relazione:

$$T_{setpoint} = 5 * HEAT_T + 15 \quad [^{\circ}C] \quad (2)$$

Così facendo temperatura di setpoint viene impostata a 30 °C quando l'impianto deve essere acceso, in modo che l'impianto resti acceso sempre durante la giornata data la irraggiungibilità di tale temperatura durante il periodo invernale.

Come precedentemente detto non esiste un unico impianto di condizionamento, il raffrescamento è affidato a singoli climatizzatori installati in alcuni locali. Il segnale da inviare al modello di edificio per la gestione dell'avviamento del raffrescamento anche in questo caso è dovuta a due segnali distinti:

- TCD (Time_Cool_Daily): Segnale giornaliero di temperatura che determina l'accensione o lo spegnimento dell'impianto nell'arco della giornata. Questo parametro varia tra 60 °C (quando l'impianto deve essere spento) a 1 °C (ad impianto acceso) (Fig. 25);

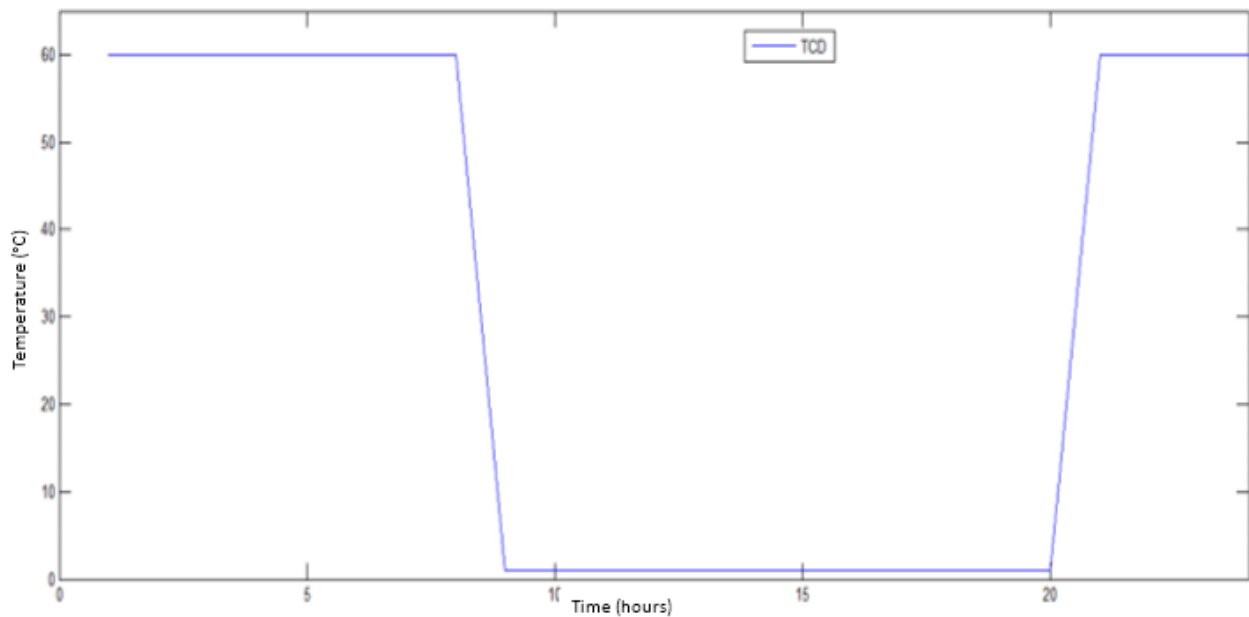


Fig. 25: TCD

- TCA (Time_Cool_Annual): Segnale annuale di temperatura che determina l'accensione o lo spegnimento dell'impianto in funzione della stagione. Tale parametro assume un valore pari a 60 °C durante il periodo invernale ed un valore di 24 °C durante il periodo estivo (Fig. 26).

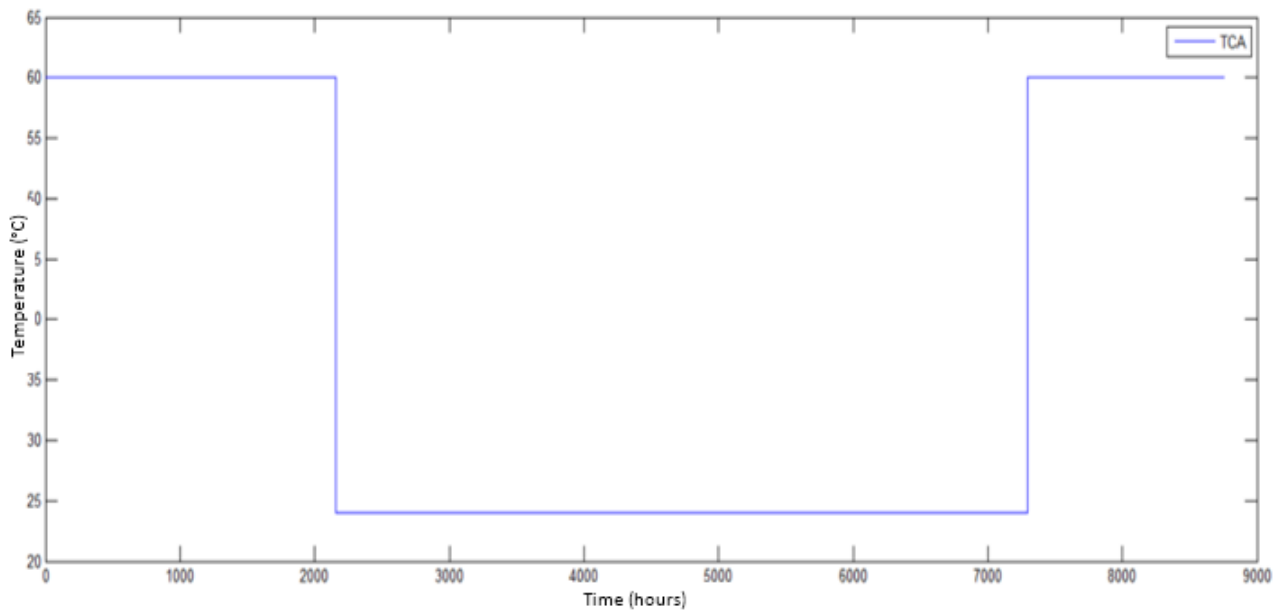


Fig. 26: TCA

Il segnale di accensione globale dell'impianto viene così a determinarsi dal prodotto tra i due segnali precedentemente stabiliti:

$$COOL_T = TCD * TCA \quad (3)$$

In Fig. 27 è riportato l'andamento durante un singolo giorno estivo del segnale COOL_T.

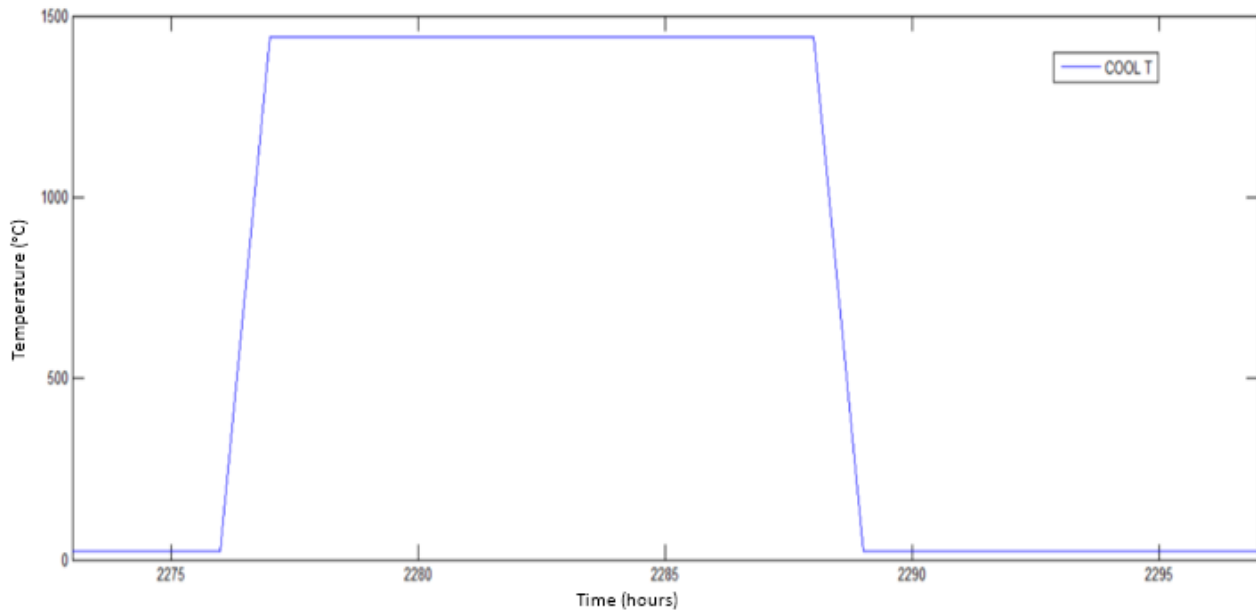


Fig. 27: Andamento annuale e durante un giorno estivo del COOL_T

In questa maniera durante il periodo di funzionamento dell'impianto (in estate e durante l'orario di apertura del palazzo tra le 8 e le 20) il segnale COOL_T sarà pari a 24 °C, mentre durante gli orari di non funzionamento nel periodo invernale si attesterà su valori che renderanno impossibile l'avviamento dell'impianto di climatizzazione. Per chiarire ulteriormente il concetto appena esposto si ricorda che il segnale COOL_T viene letto dal modello di edificio creato e da questo ne deriva la temperatura di set point sopra la quale viene azionato l'impianto di riscaldamento tramite la seguente relazione:

$$T_{setpoint} = 1 * COOL_T + 0 \quad [^{\circ}C] \quad (4)$$

Così facendo temperatura di setpoint è stata impostata a 24 °C.

Il numero di radiatori varia da zona a zona, partendo da un minimo di 1 ad un massimo di 4. Gli input relativi alla potenza termica sono:

- Potenza termica fornita dal singolo radiatore in ghisa;
- Potenza termica fornita da due radiatori in ghisa;
- Potenza termica fornita da tre radiatori in ghisa;
- Potenza termica fornita da quattro radiatori in ghisa.

Il raffrescamento invece è affidato a condizionatori che hanno una potenza termica nominale pari a 3.5 kW dotati di unità interna posta nella zona termica e di unità esterna collocata sul balcone interno all'edificio al primo piano. L'input relativo alla potenza dei condizionatori è il seguente:

- Potenza termica fornita dal singolo condizionatore.

L'input da fornire al modello di edificio relativo alla resistenza termica degli indumenti che gli abitanti del locale indossano è stato reso variabile in funzione della stagione:

- Autunno e inverno = 1 clo;
- Primavera ed estate = 0.5 clo.

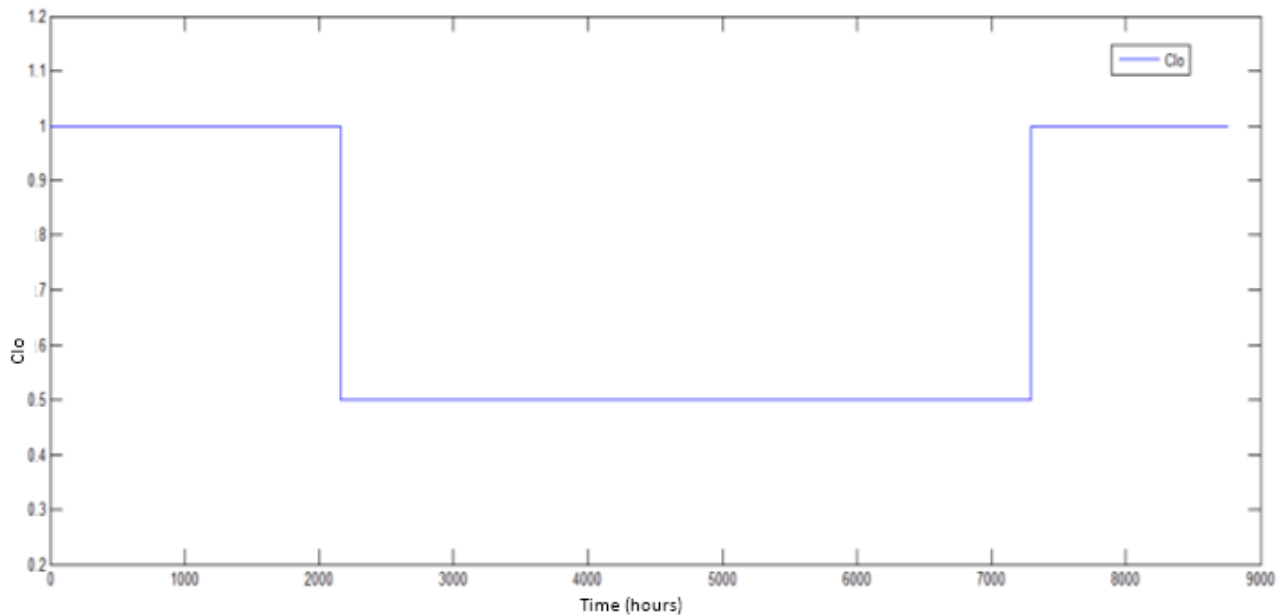


Fig. 28: Andamento annuo di CLO

Il modello implementato tramite Trnsys Build è stato importato sul modello di Trnsys Simulation Studio, tramite il "Type56". Quest'ultimo leggendo i dati di input precedentemente descritti simula l'andamento termico in ogni zona termica stabilita generando dei file di output che sono stati analizzati e modificati tramite il Trnsys Simulation Studio.

Gli output generati dal modello di simulazione possono essere riassunti in tre categorie:

- Output termici;
- Output elettrici;
- Output ambientali;
- Output di comfort.

Gli output termici forniscono informazioni riguardanti la temperatura all'interno delle singole zone termiche, l'andamento orario della potenza termica fornita e l'energia annua prodotta in riscaldamento e

raffrescamento. Le temperature e l'andamento della potenza termica e frigorifera sono state ottenute direttamente dal Type56 dell'edificio, mentre l'energia è stata ottenuta tramite integrazione nel tempo dell'output di potenza fornito dal modello su Trnsys Build.

Gli output elettrici forniscono dati relativi alla potenza elettrica e all'energia elettrica assorbita dall'impianto di condizionamento. Non essendo a conoscenza dell'andamento della potenza elettrica assorbita dal condizionatore in funzione della temperatura del fluido refrigerante è stato ipotizzato un assorbimento costante del singolo compressore pari 1.55 kW quando la climatizzazione è attiva.

Gli output ambientali riportano il quantitativo di CO₂ prodotto dall'impianto di condizionamento. I dati sono stati ottenuti andando a sommare l'anidrite carbonica prodotta dal riscaldamento e dal raffrescamento. La CO₂ prodotta dal riscaldamento è stata calcolata a partire dall'energia primaria (E_{primaria}), consumata in caldaia ottenuta maggiorando il consumo di energia termica per il riscaldamento (E_{risc}) tramite il rendimento della caldaia (η) attualmente presente:

$$E_{\text{primaria}} = v_{\text{metano}} \cdot H_i = \frac{E_{\text{risc}}}{\eta} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{anno}} \right] \quad (5)$$

Dall'energia primaria è stato ottenuto il volume annuo di metano bruciato ipotizzando un potere calorifico inferiore (Hi) di 35 MJ/m³ [5]. Ottenuta poi la massa annua di metano bruciato si è potuto determinare la quantità di CO₂ sviluppata dalla combustione (supposta stechiometrica), impostando un bilancio di massa dal quale si evince come un 1 kg di metano generi 2.75 kg di CO₂:

$$(1 \text{ kg CH}_4 + (17.4 \text{ kg aria}) = (2.75 \text{ kg CO}_2 + (2.25 \text{ kg H}_2\text{O} + (13.4 \text{ kg N}_2) \quad (6)$$

Gli output di comfort sono rappresentati dagli indici di PPD e PMV medi per l'intero edificio, forniti direttamente dal Type56.

5.1.12 ACS

Questa porzione di modello è volta a simulare il comportamento dell'esistente impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria composto, come precedentemente illustrato, da una caldaia a metano. Come per il fabbisogno termico ed elettrico dell'edificio, trattato sopra, è possibile suddividere il tutto in tre parti distinte (Fig. 29):

- Input (zona con contorno rosso);
- Caldaia (zona con contorno verde);
- Output (zona con contorno blu).

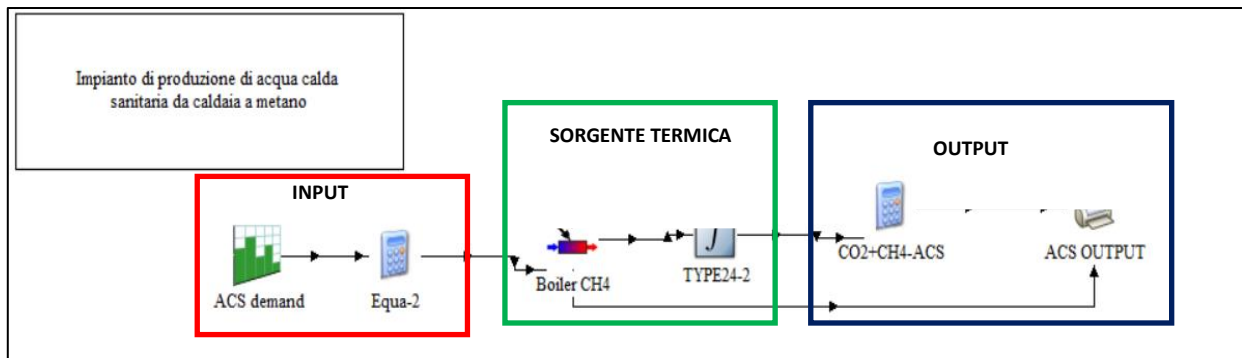


Fig. 29: ACS

È stata creato un segnale che riproducesse la domanda oraria di portata di acqua calda sanitaria, in m³/h, dell'edificio, riportato in Fig. 30:

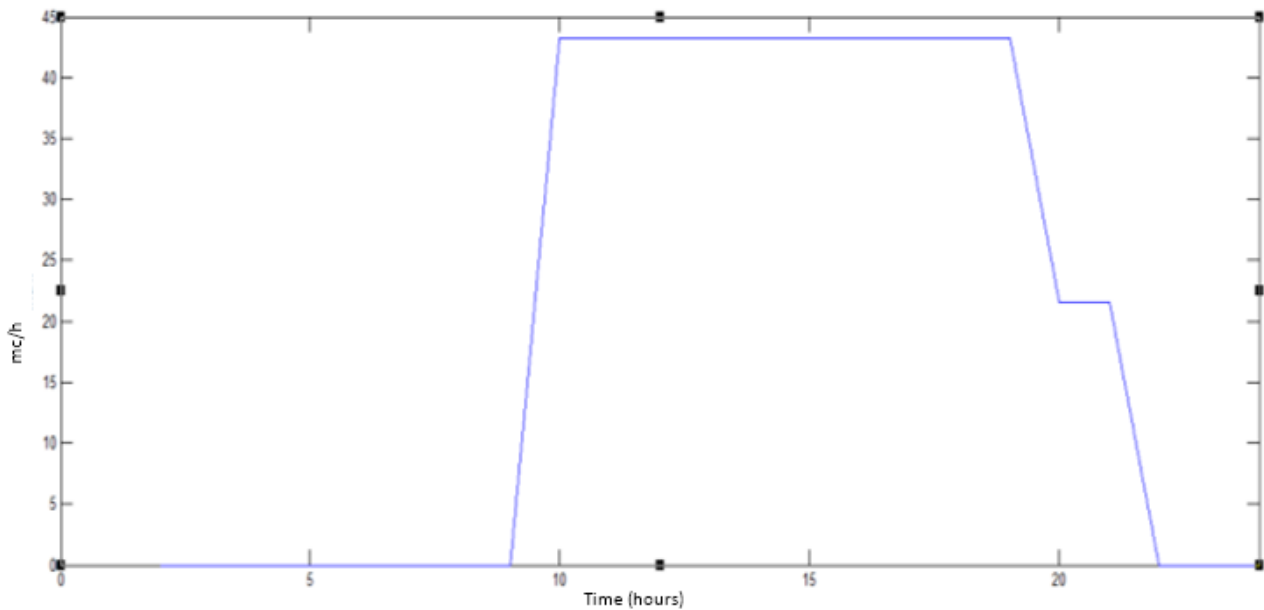


Fig. 30: Andamento portata giornaliera acqua calda sanitaria

La caldaia a metano è stata implementata utilizzando il Type 6 presente nella libreria del Trnsys Simulation Studio. Il componente è programmato per somministrare calore ad una determinata portata di fluido, fornita come input (Tabella 9).

1		Maximum heating rate	154	kW	More...
2		Specific heat of fluid	4.186	kJ/kg.K	More...
3		Overall loss coefficient for heater during operation	0.0	kJ/hr.K	More...
4		Efficiency of auxiliary heater	0.91	-	More...

Tabella 9: Parametri prestazionali della caldaia

La caldaia continuerà a somministrare calore fintanto che il fluido non raggiunge la temperatura di setpoint prefissata. Sono state così specificate le caratteristiche della caldaia:

- Potenzialità termica massima= 154 kW;
- Portata d'acqua = da input;
- Temperatura di ingresso dell'acqua = 20 °C;
- Temperatura di set point = 65 °C;
- Rendimento di combustione = 91 %;
- Segnale di controllo = da input.

Gli output generati da questa seconda parte del modello sono esclusivamente di natura energetica ed ambientale. Sono stati così ottenuti:

- L'energia termica annuale consumata per la produzione di acqua calda sanitaria;
- L'andamento della potenza termica fornita all'acqua;
- L'energia elettrica annuale assorbita dagli ausiliari della caldaia;
- La massa annuale di CO₂ prodotta.

6 Analisi energetica dello stato di fatto e validazione del modello con storico dei consumi reali

6.1 Consumi energetici: valutazione d'esercizio

I consumi termici dell'edificio oggetto dello studio sono legati al fabbisogno per riscaldamento per la produzione di ACS. Per il periodo di accensione dell'impianto di riscaldamento, ci si è riferito alla norma vigente per la zona climatica D, dove il periodo di accensione degli impianti termici va dal 1 novembre al 15 aprile (12 ore giornaliere). Per tali consumi si hanno a disposizione le bollette del comparto gas (con cadenza bimestrale) per le annualità 2014, 2015 e 2016 i cui valori sono riportati con cadenza mensile in Tabella 10 e illustrati graficamente in Figura 31.

Consumi energetici [kWh]			
MESE	Stagione		
	2014	2015	2016
GENNAIO	51606.8	47658.0	52953.3
FEBBRAIO	39019.9	42736.5	43072.9
MARZO	52923.8	47835.0	42574.5
APRILE	5039.0	4241.2	4039.2
MAGGIO	542.5	543.0	423.6
GIUGNO	277.4	297.5	267.3
LUGLIO	264.4	256.3	281.0
AGOSTO	350.4	311.7	266.9
SETTEMBRE	281.1	283.1	261.8
OTTOBRE	1388.6	1385.6	1479.0
NOVEMBRE	11830.7	18094.3	20345.8
DICEMBRE	36038.3	48813.0	54009.5
ANNUALE	199562.9	232455.1	241974.9

Tabella 10: Consumi energetici mensili per riscaldamento

I consumi energetici sono stati relazionati ai dati climatici (gradi-giorno) per ogni stagione di riscaldamento analizzata. I dati meteorologici giornalieri sono stati acquisiti presso la stazione meteorologica di Roma Urbe, da cui è stata estrapolata la temperatura ambientale. I dati sono riassunti nella Tabella 11.

Stagione	Temperatura aria [°C]											
	Mese											
	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Set.	Ott.	Nov.	Dic.
2014	9.6	12.0	12.9	16.1	19.4	23.9	24.6	25.7	22.6	20.2	15.9	10.8
2015	9.9	10.4	13.2	16.5	21.9	25.9	30.6	28.4	24.1	19.0	14.5	9.4
2016	9.9	13.1	13.7	19.1	23.8	25.1	29.2	28.3	24.0	18.2	12.8	9.2

Tabella 11: Temperatura giornaliera media mensile dell'aria esterna

In Tabella 12 vengono riportati i gradi giorno del periodo di riscaldamento per la zona climatica D, dove il periodo di accensione degli impianti termici va dal 1 novembre al 15 aprile (12 ore giornaliere).

Stagione	Gradi giorno [°C d]
2014	1034
2015	1140
2016	1071

Tabella 12: Gradi giorno per periodo di riscaldamento

La valutazione d’esercizio energetica si basa sul consumo reale del gas naturale, in termini di energia erogata annualmente per il riscaldamento e per l’ACS per l’edificio oggetto del presente studio. Consumo reale ricavato dalle bollette delle stagioni 2014, 2015 e 2016. I dati relativi ai consumi mensili sono stati relazionati ai gradi giorno di riscaldamento per la città di Roma relativi ai tre anni considerati.

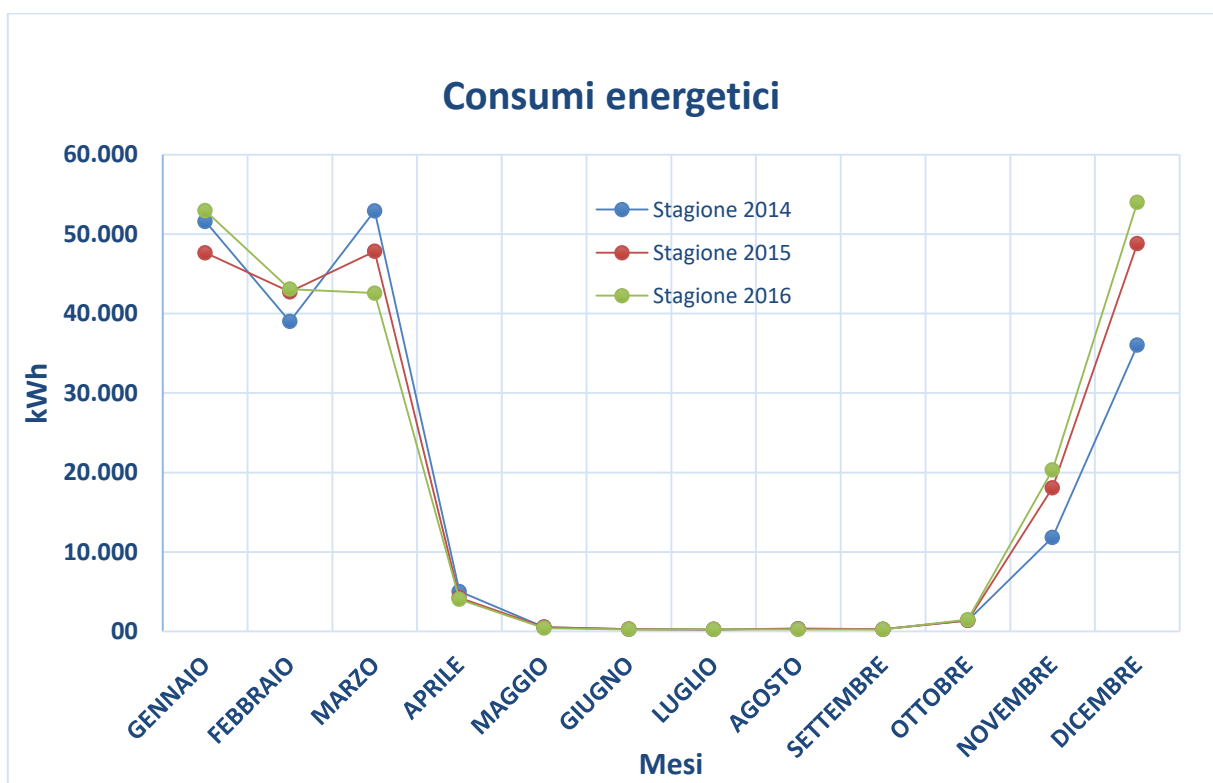


Figura 32: Valutazione d’esercizio stagione per le tre stagioni considerate

6.2 Valutazione energetica adattata all’utenza

La valutazione adattata all’utenza è stata eseguita analizzando i risultati ottenuti con il modello Trnsys descritto precedentemente. Risultati derivanti dal fabbisogno richiesto dall’edificio, che tiene conto dell’utilizzo reale da parte dell’utenza, dalle caratteristiche costruttive dell’edificio e degli impianti di cui è asservito. La valutazione d’utenza è stata effettuata per tutte e tre le stagioni di cui si dispongono i dati delle bollette.

I risultati ottenuti per le tre stagioni sono mostrati in Tabella 13 e graficamente in Figura 33, distinti in parte dovuta al riscaldamento e parte relativa a ACS:

Consumi energetici [kWh]									
MESE	Stagione								
	2014			2015			2016		
	Riscald.	ACS	Totale	Riscald.	ACS	Totale	Riscald.	ACS	Totale
GENNAIO	50005.2	332.8	50338.0	47558.6	383.8	47942.4	52049.0	380.0	52429.0
FEBBRAIO	39863.1	154.1	40017.2	42445.0	160.0	42605.0	43008.0	500.0	43508.0
MARZO	51551.2	437.1	51988.3	47967.4	581.6	48549.0	41629.0	524.0	42153.0
APRILE	4851.8	334.5	5186.3	3767.3	488.0	4255.3	3560.0	400.0	3960.0
MAGGIO	0.0	535.1	535.1	0.0	532.5	532.5	0.0	430.0	430.0
GIUGNO	0.0	275.3	275.3	0.0	294.3	294.3	0.0	270.0	270.0
LUGLIO	0.0	261.0	261.0	0.0	252.7	252.7	0.0	281.0	281.0
AGOSTO	0.0	348.7	348.7	0.0	314.0	314.0	0.0	263.0	263.0
SETTEMBRE	0.0	283.5	283.5	0.0	285.3	285.3	0.0	257.0	257.0
OTTOBRE	865.0	489.8	1354.8	806.4	568.0	1374.4	1050.0	400.0	1450.0
NOVEMBRE	11408.5	247.7	11656.2	18120.4	472.5	18592.9	20370.0	350.0	20720.0
DICEMBRE	35938.2	33.2	35971.4	47482.3	272.5	47754.8	52300.0	250.0	52550.0
ANNUALE	194482.9	3732.7	198215.6	208147.4	4605.2	212752.7	213966.0	4305.0	218271.0

Tabella 13: Consumi energetici mensili

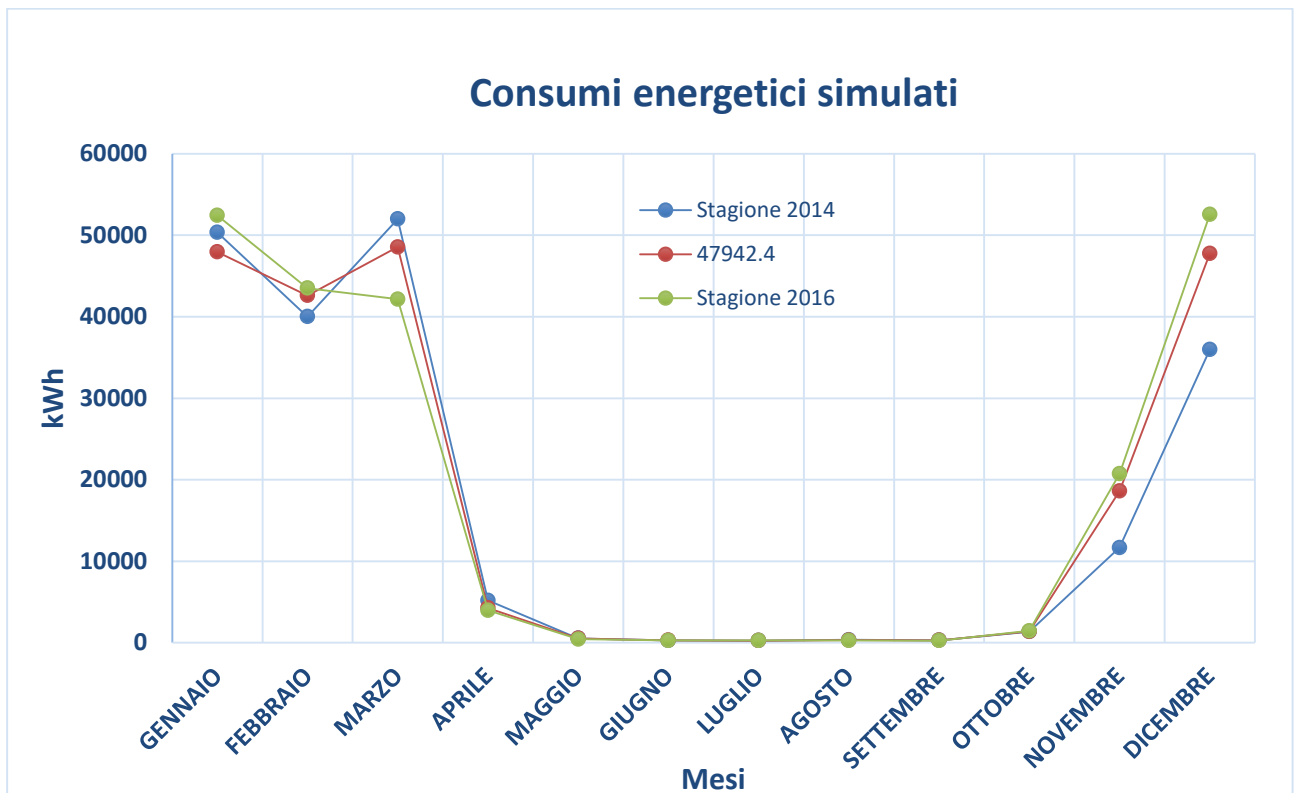


Figura 33: Valutazione adattata all'utenza per le tre stagioni considerate

6.3 Calibrazione del modello energetico

La calibrazione del modello dell'edificio è stata effettuata confrontando le firme energetiche ottenute dalla valutazione d'esercizio e dalla valutazione adattata all'utenza.

I risultati vengono riportati nelle Tabelle 14-16:

Confronto			
MESE	Stagione 2014		
	Valutazione d'esercizio [kWh]	Valutazione Adattata all'utenza [kWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	51606.8	50338.0	2.46
FEBBRAIO	39019.9	40017.2	2.56
MARZO	52923.8	51988.3	1.77
APRILE	5039.0	5186.3	2.92
MAGGIO	542.5	535.1	1.36
GIUGNO	277.4	275.3	0.77
LUGLIO	264.4	261.0	1.29
AGOSTO	350.4	348.7	0.47
SETTEMBRE	281.1	283.5	0.85
OTTOBRE	1388.6	1354.8	2.43
NOVEMBRE	11830.7	11656.2	1.47
DICEMBRE	36038.3	35971.4	0.19

Tabella 14: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2014

Confronto			
MESE	Stagione 2015		
	Valutazione d'esercizio [kWh]	Valutazione Adattata all'utenza [kWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	47658.0	47942.4	0.60
FEBBRAIO	42736.5	42605.0	0.31
MARZO	47835.0	48549.0	1.49
APRILE	4241.2	4255.3	0.33
MAGGIO	543.0	532.5	1.93
GIUGNO	297.5	294.3	1.07
LUGLIO	256.3	252.7	1.41
AGOSTO	311.7	314.0	0.72
SETTEMBRE	283.1	285.3	0.80
OTTOBRE	1385.6	1374.4	0.81
NOVEMBRE	18094.3	18592.9	2.76
DICEMBRE	48813.0	47754.8	2.17

Tabella 15: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2015

Confronto			
MESE	Stagione 2016		
	Valutazione d'esercizio [kWh]	Valutazione Adattata all'utenza [kWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	52953.3	52429.0	0.99
FEBBRAIO	43072.9	43508.0	1.01
MARZO	42574.5	42153.0	0.99
APRILE	4039.2	3960.0	1.96
MAGGIO	423.6	430.0	1.52
GIUGNO	267.3	270.0	1.01
LUGLIO	281.0	281.0	0.00
AGOSTO	266.9	263.0	1.48
SETTEMBRE	261.8	257.0	1.84
OTTOBRE	1479.0	1450.0	1.96
NOVEMBRE	20345.8	20720.0	1.84
DICEMBRE	54009.5	52550.0	2.70

Tabella 16: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2016

L'obiettivo della calibrazione del modello è far coincidere le firme energetiche ottenute dalla valutazione d'esercizio e dalla valutazione adattata all'utenza.

Si nota che lo scarto percentuale, in modulo, fra i risultati ottenuti dalle due valutazioni è molto basso, con un valore medio intorno al 1.54 % per la stagione 2014, un valore medio del 1.20 % per la stagione 2015 e un valore medio del 1.44 % per la stagione 2016. Tutte le stagioni presentano inoltre un valore massimo di discostamento tra i dati simulati e le bollette inferiore al 3 %. Quindi si può affermare che per il comparto consumi energetici, il modello di edificio modellato tramite Trnsys, risulta rappresentativo del suo comportamento reale.

6.4 Consumi elettrici: valutazione d'esercizio

All'interno dell'edificio viene svolta quasi esclusivamente un'attività d'ufficio, conseguentemente gli assorbimenti elettrici e di conseguenza i consumi sono dovuti principalmente a: Illuminazione, climatizzazione, pc e stampanti e altri carichi. Nell'ultima categoria sono compresi carichi misti quali: motori elettrici dell'ascensore, distributori automatici, assorbimenti passivi della cabina di trasformazione MT/BT. Per tali consumi si hanno a disposizione le bollette del comparto elettrico per le annualità 2014, 2015 e 2016 i cui valori sono riportati con cadenza mensile in Tabella 17 e illustrati graficamente in Figura 34.

Consumi elettrici [kWh]			
MESE	Stagione		
	2014	2015	2016
GENNAIO	4082.6	3393.2	3808.0
FEBBRAIO	3586.7	5666.2	3851.3
MARZO	4569.6	4640.6	4171.6
APRILE	8465.7	7481.5	7267.7
MAGGIO	11423.0	14656.8	11261.4
GIUGNO	13477.8	16084.8	14307.6
LUGLIO	15190.4	19348.9	17915.2
AGOSTO	14606.3	18456.4	16043.7
SETTEMBRE	14602.9	14868.1	14586.8
OTTOBRE	10238.8	9571.9	10421.4
NOVEMBRE	3825.1	3718.7	4070.4
DICEMBRE	3650.2	3516.0	4000.4
ANNUALE	107719.2	121403.0	111705.4

Tabella 17: Consumi elettrici mensili

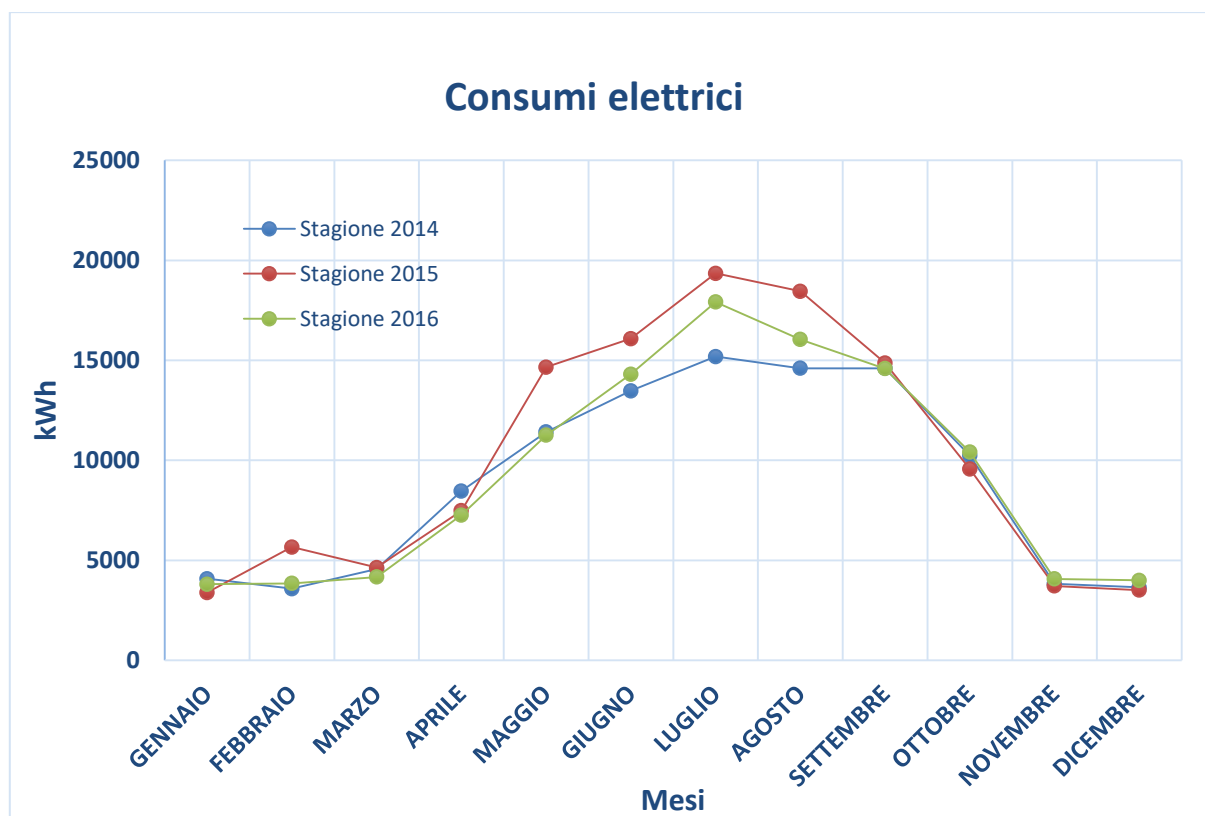


Figura 34: Valutazione d’esercizio stagione per le tre stagioni considerate

6.5 Valutazione elettrica adattata all’utenza

Come per la parte energetica, anche in questo caso viene eseguita la valutazione adattata all’utenza per la parte elettrica. È stata eseguita analizzando i risultati ottenuti con il modello Trnsys descritto precedentemente. Risultati derivanti dalla modellazione del fabbisogno elettrico reale richiesto dall’edificio, che tiene conto dell’utilizzo reale da parte dell’utenza e da tutti gli apparati elettrici presenti

nell'edificio. La valutazione d'utenza è stata effettuata per tutte e tre le stagioni di cui si dispongono i dati delle bollette.

I risultati ottenuti per le tre stagioni sono mostrati in Tabella 18 e graficamente in Figura 35, distinti in raffrescamento, illuminazione e tutti gli altri apparati elettrici:

Consumi elettrici [kWh]												
MESE	Stagione											
	2014				2015				2016			
	Raffr.	Illum.	Varie	Totale	Raffr.	Illum.	Varie	Totale	Raffr.	Illum.	Varie	Totale
GENNAIO	0.0	2990.4	1036.2	4026.6	0.0	2470.2	856.0	3326.1	0.0	2800.0	970.3	3770.3
FEBBRAIO	0.0	2581.4	881.5	3462.9	0.0	4690.8	1065.2	5756.0	0.0	2900.0	990.3	3890.3
MARZO	0.0	3399.1	1129.6	4528.7	0.0	3544.2	1177.9	4722.1	0.0	3100.0	1030.3	4130.3
APRILE	3847.6	3517.7	989.5	8354.9	3254.8	3069.5	966.0	7290.3	3115.0	3000.0	1010.3	7125.2
MAGGIO	7290.3	3308.7	864.1	11463.2	9355.4	4177.8	940.8	14474.0	6922.7	3300.0	1210.3	11432.9
GIUGNO	9736.9	2802.2	960.3	13499.4	12097.5	3450.0	1072.4	16619.9	10241.9	3000.0	1210.3	14452.1
LUGLIO	11769.6	2751.6	921.0	15442.2	14543.4	3355.5	932.1	18831.0	13267.1	3100.0	1030.3	17397.3
AGOSTO	12863.8	1428.2	272.4	14564.4	16706.3	1839.7	215.2	18761.2	13726.3	1550.0	530.3	15806.6
SETTEMBRE	9941.6	3237.7	1032.1	14211.4	10090.6	3264.9	975.6	14331.1	10254.2	3350.0	1100.3	14704.5
OTTOBRE	6175.9	3109.7	963.5	10249.1	5625.7	2890.7	1010.9	9527.3	6006.8	3100.0	1110.3	10217.1
NOVEMBRE	0.0	2788.3	939.0	3727.3	0.0	2844.1	957.7	3801.8	0.0	3000.0	1010.3	4010.3
DICEMBRE	0.0	2707.0	899.5	3606.5	0.0	2659.9	883.8	3543.7	0.0	2920.0	970.3	3890.3
ANNUALE	61625.8	34622.1	10888.6	107136.5	71673.7	38257.3	11053.6	120984.6	63534.0	35120.0	12173.0	110827.0

Tabella 18: Consumi energetici mensili elettrici

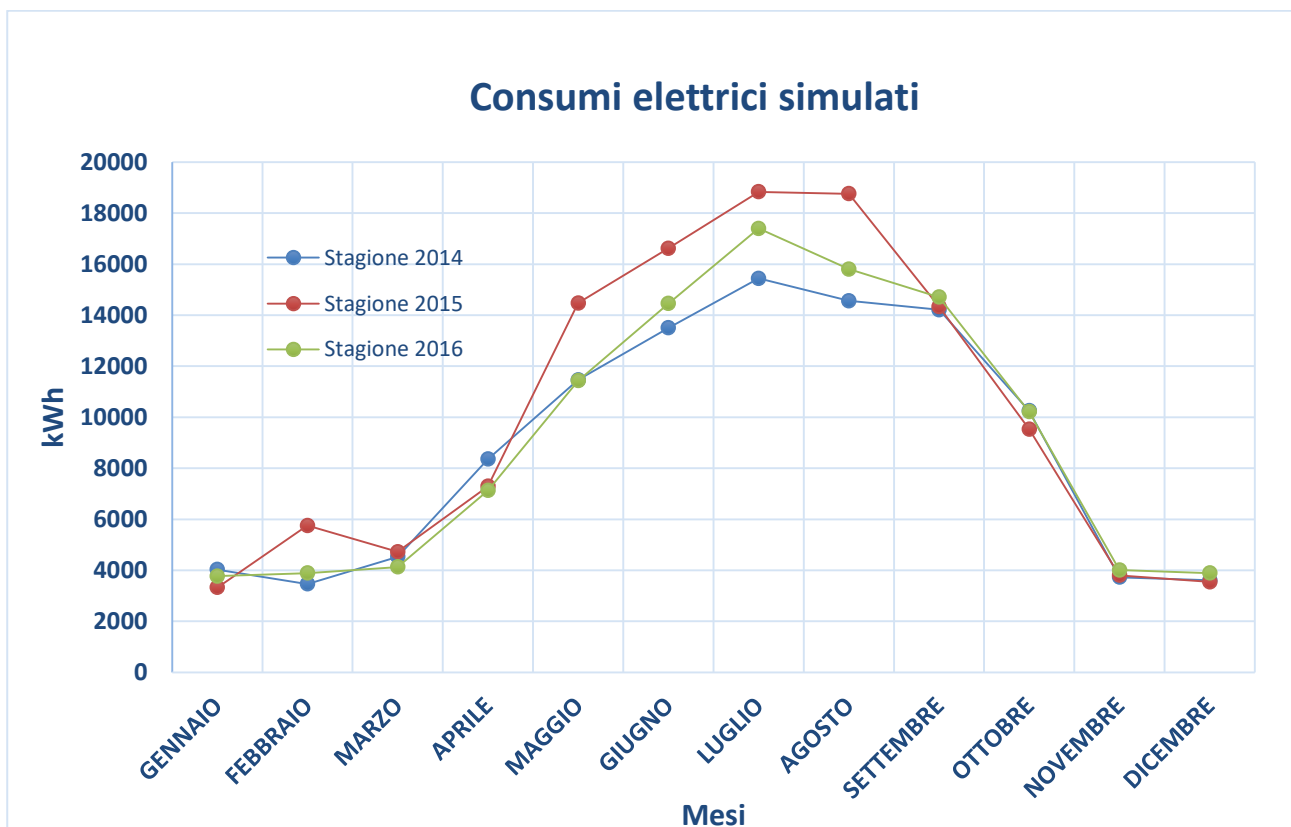


Figura 35: Valutazione adattata all'utenza per le tre stagioni considerate

6.6 Calibrazione del modello elettrico

La calibrazione del modello dell'edificio è stata effettuata confrontando le firme energetiche ottenute dalla valutazione d'esercizio e dalla valutazione adattata all'utenza. I risultati vengono riportati nelle Tabelle 19-21:

Confronto			
MESE	Stagione 2014		
	Valutazione d'esercizio [kWh]	Valutazione Adattata all'utenza [kWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	4082.6	4026.602	1.37
FEBBRAIO	3586.7	3462.918	3.45
MARZO	4569.6	4528.726	0.90
APRILE	8465.7	8354.882	1.31
MAGGIO	11423.0	11463.16	0.35
GIUGNO	13477.8	13499.44	0.16
LUGLIO	15190.4	15442.21	1.66
AGOSTO	14606.3	14564.37	0.29
SETTEMBRE	14602.9	14211.39	2.68
OTTOBRE	10238.8	10249.08	0.10
NOVEMBRE	3825.1	3727.278	2.56
DICEMBRE	3650.2	3606.49	1.20

Tabella 19: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2014

Confronto			
MESE	Stagione 2015		
	Valutazione d'esercizio [kWh]	Valutazione Adattata all'utenza [kWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	3393.2	3326.148	1.98
FEBBRAIO	5666.2	5756.02	1.58
MARZO	4640.6	4722.114	1.76
APRILE	7481.5	7290.323	2.56
MAGGIO	14656.8	14474.02	1.25
GIUGNO	16084.8	16619.95	3.33
LUGLIO	19348.9	18831.01	2.68
AGOSTO	18456.4	18761.18	1.65
SETTEMBRE	14868.1	14331.07	3.61
OTTOBRE	9571.9	9527.311	0.47
NOVEMBRE	3718.7	3801.838	2.24
DICEMBRE	3516.0	3543.67	0.79

Tabella 20: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2015

Confronto			
MESE	Stagione 2016		
	Valutazione d'esercizio [kWh]	Valutazione Adattata all'utenza [kWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	3808.0	3770.3	0.99
FEBBRAIO	3851.3	3890.3	1.01
MARZO	4171.6	4130.3	0.99
APRILE	7267.7	7125.2	1.96
MAGGIO	11261.4	11432.9	1.52
GIUGNO	14307.6	14452.1	1.01
LUGLIO	17915.2	17397.3	2.89
AGOSTO	16043.7	15806.6	1.48
SETTEMBRE	14586.8	14704.5	0.81
OTTOBRE	10421.4	10217.1	1.96
NOVEMBRE	4070.4	4010.3	1.48
DICEMBRE	4000.4	3890.3	2.75

Tabella 21: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2016

L'obiettivo della calibrazione del modello è far coincidere le firme energetiche ottenute dalla valutazione d'esercizio e dalla valutazione adattata all'utenza.

Anche in questo caso, lo scarto percentuale, in modulo, fra i risultati ottenuti dalle due valutazioni è molto basso, con un valore medio intorno al 1.33 % per la stagione 2014, un valore medio del 1.99 % per la stagione 2015 e un valore medio del 1.57 % per la stagione 2016. Tutte le stagioni presentano inoltre un valore massimo di discostamento tra i dati simulati e le bollette di poco superiore al 3 % solo per alcuni mesi. Quindi si può affermare che per il comparto consumi energetici, il modello di edificio modellato tramite Trnsys, risulta rappresentativo del suo comportamento reale.

6.7 Calcolo prestazioni energetiche dell'edificio e classificazione nZEB

Per la classificazione energetica dell'edificio, occorre definire l'edificio di riferimento, secondo quanto previsto dal D.M. 26 giugno 2015 [2]. I calcoli sono stati eseguiti nel rispetto delle normative tecniche UNI TS 11300 1,2,3,4,5,6.

Con edificio di riferimento si intende un edificio identico in termini di geometria, orientamento, ubicazione geografica, destinazione d'uso, con condizioni al contorno uguali e avere caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati come da Decreto Requisiti Minimi [2].

La scala delle classi è definita a partire dal valore dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio di riferimento ($EP_{gl,nren,rif,standard}$), calcolato secondo [2], ipotizzando che in esso siano installati elementi edilizi e impianti standard dell'edificio di riferimento.

Dopo aver calcolato il valore di $EP_{gl,nren,rif,standard}$, si è proceduto con il calcolo dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio in oggetto ($EP_{gl,nren}$), e da qui si è calcolata la classe energetica complessiva dell'edificio. Poiché il valore di $EP_{gl,nren}$ è pari a 288.27 (kWh/m²a), l'edificio è in classe E (vedi Tabella 22).

		Classe A4	≤	53.3 kWh/m ²
53.3 kWh/m ²	<	Classe A3	≤	80.0 kWh/m ²
80.0 kWh/m ²	<	Classe A2	≤	106.6 kWh/m ²
106.6 kWh/m ²	<	Classe A1	≤	133.3 kWh/m ²
133.3 kWh/m ²	<	Classe B	≤	169.6 kWh/m ²
169.60 kWh/m ²	<	Classe C	≤	212.00 kWh/m ²
212.0 kWh/m ²	<	Classe D	≤	282.4 kWh/m ²
282.4 kWh/m ²	<	Classe E	≤	346.6 kWh/m ²
346.6 kWh/m ²	<	Classe F	≤	466.6 kWh/m ²
		Classe G	≤	466.6 kWh/m ²

Tabella 22: Classificazione energetica pre-retrofit

Sono stati così calcolati i rendimenti globali medi stagionali degli impianti di tecnici di riscaldamento, raffrescamento e dell'acqua calda sanitaria. Per il calcolo dei rendimenti di distribuzione, controllo, emissione e generazione si è fatto uso delle tabelle esemplificative presenti nella norma tecnica UNI TS 11300:2.

DEFINIZIONE RENDIMENTO IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	
Rendimento di emissione	0.95
Rendimento di controllo	0.94
Rendimento di distribuzione	0.92
Rendimento di generazione	0.95
RENDIMENTO GLOBALE MEDIO STAGIONALE RISCALDAMENTO	0.78

Tabella 23: Rendimento impianto di riscaldamento

DEFINIZIONE RENDIMENTO IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	
Rendimento di emissione	1.00
Rendimento di distribuzione	0.92
Rendimento di generazione	0.85
RENDIMENTO GLOBALE MEDIO STAGIONALE ACQUA CALDA	0.78

Tabella 24: Rendimento impianto di produzione ACS

DEFINIZIONE RENDIMENTO IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO	
Rendimento di emissione	0.95
Rendimento di controllo	0.95
Rendimento di distribuzione	0.99
Rendimento di generazione	0.95
RENDIMENTO GLOBALE MEDIO STAGIONALE RISCALDAMENTO	0.85

Tabella 25: Rendimento impianto di raffrescamento

Di seguito sono riportati i parametri NZEB riferiti all'edificio attuale.

Parametri	u.m.	Requisiti	Stato Attuale
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.68	1.15
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.051
η_H	[%]	≥ 0.81	0.78
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 61.22	132.22
$Ep_{H,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 64.28	138.83
η_w	[%]	≥ 0.70	0.78
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 6.12	6.12
$Ep_{w,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 6.43	6.43
η_c	[%]	≥ 0.81	0.85
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	123.54
$Ep_{c,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 45.22	123.54
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 2.5	2.1
Ep_v	[kWh/m ²]	servizio energetico assente	
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 26.15	26.15
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 141.21	290.37
$P_{el,ren}$	[kW]	≥ 19.84	-
$CFE_{ren,ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55.00	-
$CFE_{ren,ACS}$	[%]	≥ 55.00	-

Tabella 26: Classificazione energetica pre-retrofit

7 Il caso studio di Palazzo Baleani: identificazione dei possibili interventi di retrofit

7.1 Individuazione degli interventi e definizione dei costi di retrofit

Lo step fondamentale di una diagnosi energetica è l'individuazione di strategie valide per migliorare la situazione energetica del sito oggetto di studio. In questa sezione verranno descritti gli interventi proposti per efficientare energeticamente Palazzo Baleani.

Verranno dapprima affrontati gli interventi relativi all'efficientamento termico ed in seguito verranno analizzati interventi volti all'efficientamento della parte elettrica. Verrà inoltre proposto un metodo alternativo di produzione dell'acqua calda sanitaria.

7.1.1 Interventi di efficientamento termico

Come evidenziato nell'analisi dello stato di fatto, l'energia termica dell'intero edificio viene attualmente prodotta da caldaie a metano e distribuita all'interno dei singoli ambienti da radiatori in ghisa a parete tramite un processo di scambio termico che è stato stabilito essere all'80% per irraggiamento e per il restante 20% per convezione naturale [7]. L'energia frigorifera invece è distribuita in modo disuniforme, tramite split posti all'interno dei singoli locali, tramite un processo di scambio termico che è stato stabilito essere al 10% per radiazione e per il restante 90% per convezione forzata [7]. Gli interventi proposti sono finalizzati alla riduzione dei consumi per il condizionamento dei locali ed all'azzeramento dell'emissioni in loco di CO₂ per la produzione di energia termica e possono essere divisi in due categorie, in funzione delle aree di intervento: "fabbisogno termico" e "generazione dell'energia termica".

Riduzione del fabbisogno termico

La prima categoria raggruppa tutti gli interventi volti a ridurre il fabbisogno di energia termica e frigorifera da immettere nell'edificio per garantire il comfort termico. Gli interventi racchiusi in questa categoria quindi non agiranno sull'efficienza dell'impianto di condizionamento, ma ottimizzeranno il riscaldamento e raffrescamento passivo dell'edificio. Essendo palazzo Baleani un edificio dal forte patrimonio artistico ed architettonico è classificato dal "Ministero dei Beni e delle attività culturali e del turismo" [8] come un bene architettonico soggetto a vincolo, rendendo così impossibile ogni tipo di intervento che riguardasse l'involucro esterno. L'unico intervento proposto che rientra quindi in questa categoria è l'aggiunta di una vetratura interna da 6 mm alle finestre attualmente esistenti, in modo da realizzare un'intercapedine d'aria di 20 mm.

Le finestre efficientate avranno quindi una trasmittanza termica inferiore comportando così una riduzione del flusso termico. In Tabella 27 sono riportate le caratteristiche delle finestre pre e post intervento.

	Tipologia	Spessore vetro esterno [mm]	Spessore intercapedine [mm]	Spessore vetro interno [mm]	Trasmittanza [W/m ² ·K]
Pre intervento	Vetro singolo	6	-	-	5.4
Post intervento	Doppio vetro singolo	6	20	6	2.8

Tabella 27: Caratteristiche finestre prima e dopo l'intervento di efficientamento

È stato ipotizzato di effettuare l'intervento su ogni finestra presente all'interno dell'edificio dato che attualmente presentano tutte le stesse caratteristiche termiche.

Si sottolinea che la trasmittanza non soddisfa nei suoi valori il target del Decreto Requisiti Minimi [2], a causa del vincolo di edificio storico imposto per il caso preso in esame.

Il capitale da investire è stato stimato a seguito di un'accurata indagine di mercato volta a determinare i costi di fornitura (vetro ed infissi) ed installazione per la realizzazione dell'intervento (ipotizzando di dover assumere un installatore mediamente qualificato). È stato così stimato un costo d'investimento pari a 53142.39 €. Il costo di manutenzione è stato invece assunto invariato, rispetto allo stato attuale, pari allo stipendio medio annuale di un operatore mediamente qualificato addetto alla pulizia degli stessi, pari a 13000 €/anno.

	Costo [€/m ²]	Area Finestre [m ²]	Costo TOT [€]
Fornitura [9]	75.35	311.96	23506.19
Installazione [10]	30	311.96	9358.80
TOTALE	-	-	32864.99

Tabella 28: Voci di costo

Efficientamento degli impianti di generazione dell'energia termica

La soluzione analizzata prevede la dismissione dell'attuale impianto di riscaldamento e la razionalizzazione dell'impianto di raffrescamento. L'intervento prevede la generazione di energia termica e frigorifera tramite l'installazione di un VRV e la sostituzione delle attuali caldaie a metano.

	Heat	Cool		Heat	Cool		Heat	Cool		Heat	Cool
T 1	Heat		P 1	Heat	Cool	D 11			R 1	Heat	
T 2	Heat		P 2	Heat	Cool	D 12	Heat		R 2	Heat	
T 3	Heat		P 3	Heat	Cool	D 13	Heat		R 3	Heat	
T 4			P 4	Heat	Cool	D 14	Heat	Cool	R 4	Heat	
T 5	Heat		P 5	Heat	Cool	D 15	Heat	Cool	R 5	Heat	
T 6	Heat		P 6	Heat	Cool	D 16	Heat	Cool	R 6	Heat	
T 7			P 7	Heat	Cool	D 17	Heat		R 7	Heat	
T 8			P 8	Heat	Cool	D 18	Heat		R 8	Heat	
T 9			P 9	Heat	Cool	D 19	Heat		R 9	Heat	
T 10	Heat		P 10	Heat	Cool	D 20	Heat		R 10	Heat	
T 11			P 11	Heat	Cool	D 21	Heat		R 11		
T 12			P 12	Heat	Cool	D 22	Heat	Cool	R 12	Heat	
T 13	Heat		P 13	Heat	Cool	D 23	Heat	Cool	R 13	Heat	
T 14	Heat		P 14	Heat	Cool	D 24	Heat	Cool	R 14	Heat	
T 15	Heat		P 15			D 25	Heat	Cool	R 15		
T 16	Heat		P 16	Heat	Cool	G 1	Heat		R 16	Heat	
T 17	Heat		P 17			G 2	Heat		R 17	Heat	
T 18	Heat		P 18	Heat	Cool	G 3	Heat				
T 19	Heat		P 19	Heat	Cool	G 4	Heat				
T 20			P 20	Heat	Cool	G 5	Heat				
T 21			P 21	Heat	Cool	G 6	Heat				
T 22	Heat		P 22	Heat	Cool	G 7	Heat				
T 23	Heat		P 23		Cool	G 8					
T 24	Heat		P 24	Heat	Cool	G 9	Heat				
T 25			P 25		Cool	G 10	Heat				
T 26			P 26		Cool	G 11	Heat				
T 27			P 27		Cool	G 12	Heat				
T 28			P 28		Cool	G 13	Heat				
T 29			D 1	Heat		G 14	Heat				
T 30	Heat		D 2	Heat		G 15					
T 31			D 3	Heat		G 16	Heat	Cool			
T 32	Heat		D 4	Heat		G 17	Heat				
T 33	Heat		D 5	Heat		G 18	Heat	Cool			
T 34			D 6	Heat		G 19	Heat	Cool			
T 35	Heat		D 7	Heat		G 20	Heat	Cool			
T 36	Heat		D 8	Heat		G 21	Heat				
T 37	Heat		D 9	Heat		G 22	Heat				
T 38			D 10	Heat	Cool	G 23	Heat				

Legenda	T	Piano terra	P	Primo piano	D	Secondo piano	G	Terzo piano	R	Quarto piano
----------------	---	-------------	---	-------------	---	---------------	---	-------------	---	--------------

Tabella 29: Dettaglio climatizzazione zone termiche

Nella tabella seguente sono riassunte le caratteristiche delle unità interne da installare in ogni piano. Nella valutazione attuale, trattandosi di un intervento di efficientamento energetico, sarà valutato l’impatto di tale intervento ipotizzando di non andare a raffrescare le zone attualmente prive di impianto di raffrescamento estivo.

La potenza termica delle unità interne è stata determinata a seguito dello studio del fabbisogno energetico delle singole zone termiche che si vogliono climatizzare, mentre la potenza termica dei singoli VRV è stata ottenuta considerando un fattore di contemporaneità di 0.7 nell’utilizzo delle singole unità interne, come suggerito nei manuali tecnici [11]. Da tale calcolo è stata prevista una VRF che eroghi una potenza termica nominale di 143 kW e potenza frigorifera nominale di 43 kW.

Il costo d’investimento è stato stimato consultando i tariffari per gli impianti termici presenti in letteratura [9] suddividendoli come fatto in precedenza in costi per la fornitura delle unità interne e dei VRV, i costi d’installazione sono stati ipotizzati pari al 10% del costo d’investimento.

	Prezzo [€/pezzo]	N	Prezzo totale [€]
VRV	32806.41	1	32806.64
Installazione	-	-	3280
TOTALE	-	-	35886.64

Tabella 30: Voci di costo

7.1.2 Interventi di efficientamento elettrico

Attualmente l’edificio è visto dalla rete elettrica di distribuzione come un utente esclusivamente passivo, che quindi richiede energia elettrica senza immetterne alcuna.

In Tabella 31 sono riportati i dettagli relativi al consumo elettrico annuo:

Categoria	[kWh/anno]	[%]
Illuminazione	35120	32%
Climatizzazione	63534	57%
Pc e stampanti	7250	7%
Altri carichi	4923	4%
TOTALE	110827	100%

Tabella 31: Ripartizione consumi elettrici

Gli interventi di seguito evidenziati sono così volti a ridurre il consumo di energia elettrica, agendo sulla gestione del tempo di accensione e sull’efficienza dei singoli dispositivi installati, e a garantire un determinato grado di autosufficienza energetica dell’edificio tramite la produzione in loco dell’energia elettrica. Di seguito sono elencati gli interventi proposti:

- Installazione di un impianto Fotovoltaico in copertura;
- Installazione impianto di gestione e controllo carichi da remoto.

In aggiunta agli interventi principali sopra evidenziati è stato valutato l'intervento di rifasamento dell'impianto elettrico esistente dato che i valori di assorbimento di energia attiva e reattiva riportati in bolletta attestano un valore del fattore di potenza inferiore allo 0.95 stabilito dall'Autorità per l'energia elettrica, il gas e il sistema idrico per non incorrere in penali.

Fotovoltaico

La superficie disponibile sul terrazzo presente al quarto piano dove poter installare i pannelli fotovoltaici è di circa 200 mq, rappresentato in Fig. 36 dall'area tratteggiata arancione.

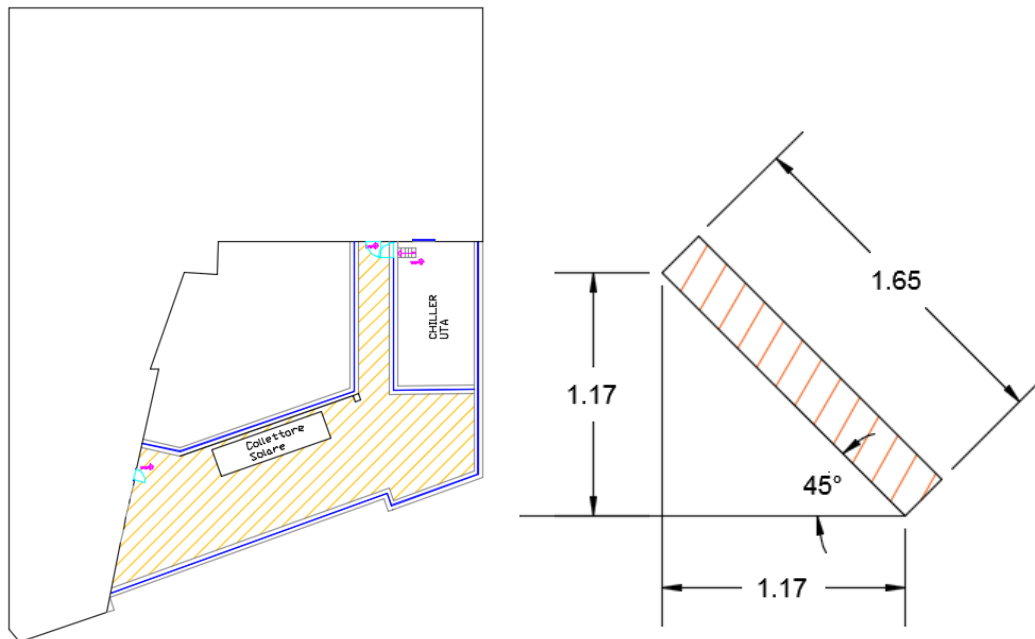


Fig. 36: Area disponibile per installazione e caratteristiche FV

L'impianto fotovoltaico pensato in copertura sarà composto da moduli in silicio monocristallino da 327 Wp [12], con un'efficienza del 20.4%. Il limite alla potenza installata è dato dalle limitate dimensioni dell'area di possibile installazione, che presenta una larghezza di 25 m ed una profondità di 8 m. Ipotizzando di installare i pannelli rivolti a Sud-Est e inclinati rispetto all'orizzontale di 45° sarà possibile installare un numero massimo di 55 moduli (prevedendo una interdistanza di 1 m per evitare l'ombreggiamento), portando la potenza di picco dell'impianto ad un valore di circa 18 kWp.

In aggiunta alla soluzione sopra citata è stato pensato di sfruttare la porzione di tetto rivolta a sud, attualmente composta da semplici tegole in laterizio, come sito d'installazione di tegole FV di nuova generazione, ottime in situazioni in cui è necessario limitare al massimo l'impatto visivo dell'intervento per non danneggiare il valore artistico del sito. In totale la superficie di tetto rivolta a sud è di 58 m², le tegole fotovoltaiche hanno una potenza di picco di 4 Wp ed un'efficienza leggermente inferiore ai normali pannelli fotovoltaici, pari a 17.2 % [13].

In ogni m² di tetto è possibile installare al più 14 tegole. Conseguentemente la potenza di picco installata tramite le tegole fotovoltaiche si attesta sui 3.248 kWp, come riportato in Tabella, in cui sono riassunte le caratteristiche dei singoli interventi.

Soluzione	N moduli	Potenza singola [Wp]	Efficienza cella [%]	Superficie totale [mq]	Potenza Totale [kWp]
Moduli FV	55	327	20.4	200	17.985
Tegole FV	812	4	17.2	58	3.248

Tabella 32: Caratteristiche pannelli FV

Gli interventi così ideati sono stati implementati sul modello, inserendo le informazioni riportate in Tabella 20 nel componente Type.

Sono stati così valutati i costi d'intervento valutando separatamente le due soluzioni attuabili:

- Installazione di soli moduli in copertura per una potenza totale installata di circa 18 kW (Soluzione A);
- Installazione di tegole fotovoltaiche in aggiunta ai moduli sopra citati per una potenza totale d'impianto pari a circa 22 kWp (Soluzione B).

	Prezzo [€/kWp]	Wp.	Prezzo totale [€]
Modulo FV	2000	17985	35970
Inverter trifase [14]	-	20000	2000
TOTALE			37970

Tabella 33: Voci di costo soluzione A

	Prezzo [€/kWp]	Wp.	Prezzo totale [€]
Modulo FV	2000	17985	35970
Tegola FV	10000	3248	32480
Inverter trifase [14]	-	22000	2270
TOTALE			70720

Tabella 34: Voci di costo soluzione B

Sistema di gestione e controllo

La realizzazione di un Sistema di controllo e gestione dei carichi prevede la possibilità di poter conoscere lo stato dell'impianto monitorato e di controllarlo a distanza. Nel caso di palazzo Baleani si è in presenza di un impianto elettrico datato del quale non si è a conoscenza dell'ubicazione esatta dei cavidotti elettrici. Per

questo motivo non si è pensato ad un impianto di building automation (come ad esempio il KNX) che comporterebbe un completo ricablaggio dell'impianto con annesse opere di demolizione e ricostruzione delle murature interne.

L'intervento proposto prevede l'aggiunta di una sensoristica specifica che comunichi in WI-FI con gli altri componenti dell'impianto di controllo ed in cavo con i dispositivi oggetto del controllo.

L'intervento proposto prevede l'installazione di:

- Sensori di presenza in ogni locale;
- Contatti magnetici sugli infissi;
- Cronotermostato in ogni locale;
- Contatori di energia elettrica bidirezionale a valle del POD;
- Dispositivi di interfaccia con gli attuatori posti a comando dell'illuminazione;
- Dispositivi di interfaccia con gli attuatori posti a comando della climatizzazione;
- Misuratori di energia termica e data logger.

Tramite i componenti sopra citati sarà possibile:

- Razionalizzare l'uso dell'energia elettrica consumata per l'illuminazione, eliminando gli sprechi derivanti dall'accensione quando all'interno del locale non vi è presenza di persona;
- Razionalizzazione dell'uso dell'energia termica immessa in ambiente annullando gli sprechi di energia derivanti dall'azionamento dell'impianto di climatizzazione con gli infissi aperti e al di fuori dell'orario di lavoro;
- Quantificare l'energia consumata e differenziarla in funzione del carico e/o dell'ambiente, individuando le fonti di eventuali sprechi e potendo agire in maniera più mirata.

Il Sistema di Gestione e Controllo dei carichi è stato implementato nel modello di simulazione modificando le schedule di accensione dell'impianto di illuminazione e di climatizzazione, andando a simulare l'eventuale presenza di persone in un ambiente dell'edificio che quindi determina l'accensione o meno dell'impianto.

La valutazione dei costi dell'impianto sono riportati in Tabella 35:

Componente	Prezzo Singolo [€/pezzo]	N	Prezzo Totale [€]
Sensore di presenza persone	30	100	3000
Contatti magnetici	12.5	190	2375
Termostato	100	60	6000
Contatori di energia elettrica bidirezionale	150	1	150
Interfaccia Illuminazione – Sistema di controllo	100	132	13200
Attuatori illuminazione	15	132	1980
Attuatori Climatizzazione	20	132	2640
TOTALE			29345

Tabella 35: Prezzi sensoristica impianto di gestione e controllo

7.1.3 Interventi di efficientamento produzione ACS

Come illustrato durante l’analisi dello stato di fatto, è attualmente presente un impianto di produzione di acqua calda sanitaria a collettori solari posto in copertura all’edificio. L’impianto è inutilizzato a causa di un guasto ad uno dei collettori solari montati in serie. L’intervento proposto prevede la sostituzione del componente guasto in modo da rimettere in funzione l’impianto da 6.4 kW presente ed eventualmente ampliarlo a seguito di una verifica del sottodimensionamento dell’attuale impianto.

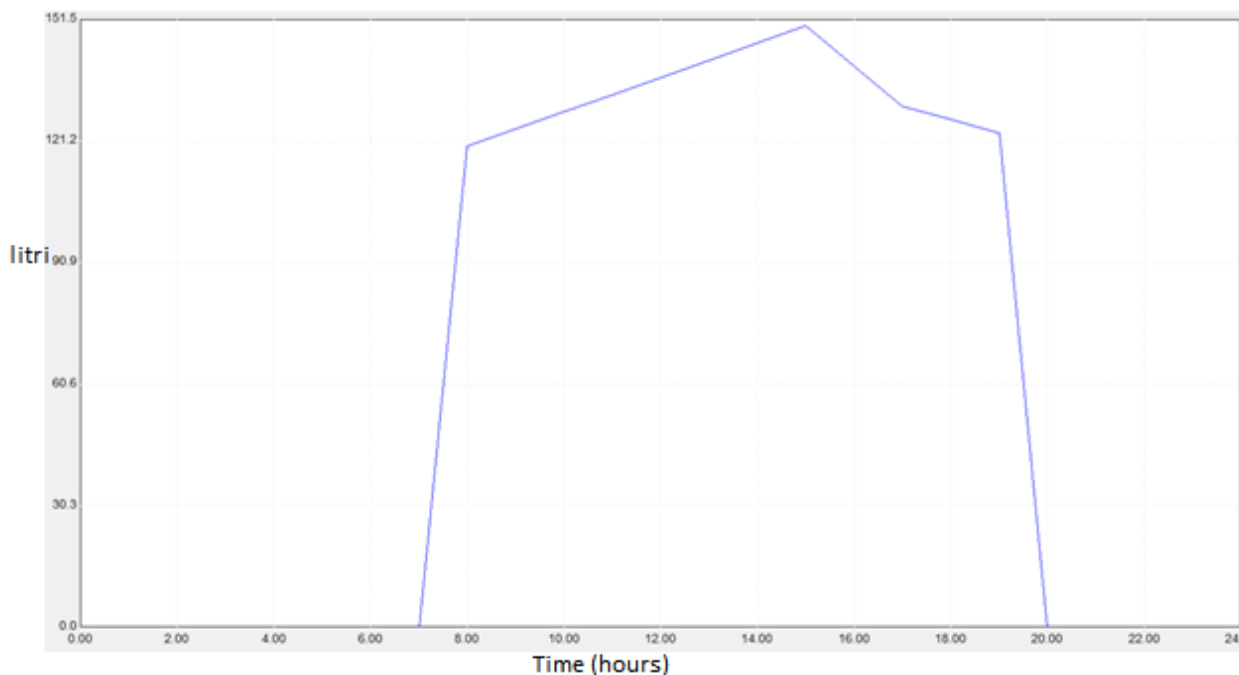


Fig. 37: Portata d’acqua calda sanitaria [litri/ora]

Utilizzando il valore di 1600 litri d’acqua calda sanitaria consumati giornalmente, con la distribuzione oraria riportata in Fig. 37, è stato implementato il modello del collettore solare sul Trnsys Simulation Studio, andando a verificare se la potenza attualmente installata riuscisse a soddisfare la richiesta termica totale. Attualmente il picco di richiesta termica dell’acqua calda sanitaria si attesta sui 3.5 kW, per tale motivo non sarà necessario aggiungere ulteriori pannelli solari, ma solamente riqualificare l’intervento esistente. I costi da sostenere per la realizzazione dell’intervento sono i seguenti riportati in Tabella 36:

	Prezzo [€/pezzo]	N	Prezzo totale [€]
Collettore Solare da 1600W	3100	1	1500
Boiler d’accumulo da 2000 lt [15]	2600	1	2600
TOTALE FORNITURA			4100

Tabella 36: Voci di costo

8 Analisi energetica ed economica degli interventi di retrofit e verifica del raggiungimento della classe nZEB

Gli interventi proposti sono stati raggruppati nelle categorie introdotte nei paragrafi precedenti:

- Interventi di efficientamento termico;
- Interventi di efficientamento elettrico;
- Interventi per la produzione dell'acqua calda sanitaria.

Gli interventi sono dapprima valutati singolarmente, studiando il proprio impatto sul contesto attuale, in seguito saranno combinati al fine di trovare quale sia la strategia migliore da seguire.

8.1 Scenari di efficientamento termico

Come illustrato precedentemente, gli interventi di efficientamento termico prevedono la diminuzione del fabbisogno termico dell'edificio tramite l'aggiunta di una vetratura interna su tutte le finestre dell'edificio e la valutazione di un diverso impianto di condizionamento all'interno dell'edificio. Nel seguente paragrafo si andranno dapprima a valutare gli interventi singolarmente e poi si combineranno tra loro al fine di individuare l'optimum tra i vari scenari. Le soluzioni che prevedono il miglioramento della climatizzazione all'interno dell'edificio sono funzione del numero delle zone climatizzate.

8.1.1 Finestratura

In questo scenario di simulazione viene variata esclusivamente la trasmittanza delle superfici trasparenti mantenendo inalterati gli altri parametri della simulazione. Di seguito vengono riportate nella Tabella 37 le caratteristiche delle nuove finestre.

	Tipologia	Spessore vetro esterno [mm]	Spessore intercapedine [mm]	Spessore vetro interno [mm]	Trasmittanza [W/m ² ·K]
Pre intervento	Vetro singolo	6	-	-	5.4
Post intervento	Doppio vetro singolo	6	20	6	2.8

Tabella 37: Caratteristiche finestre prima e dopo l'intervento di efficientamento

L'intervento è volto a ridurre il fabbisogno termico dell'intero edificio, ed in effetti dalle simulazioni effettuate si evidenzia una riduzione dell'energia termica fornita per la climatizzazione. Si sottolinea che i valori scelti sono in linea con la classificazione di edificio storico, che caratterizza il caso studiato. In Tabella 38 sono riportati i valori relativi al consumo di energia per il riscaldamento prima e dopo l'intervento.

	Energia Primaria Riscaldamento [kWh/anno]	Energia Primaria Raffrescamento [kWh/anno]	Energia primaria totale [tep]
Pre intervento	237990	63534	38.78
Post intervento	136790	72480	25.77
Variazione percentuale	-42.5%	+14.1%	33.5%

Tabella 38: Riassunto energetico simulazioni

Come si può notare il cambio degli infissi comporta un miglioramento del rendimento termico dell'edificio nei mesi estivi, ma comporterebbe un consumo maggiore di energia per la climatizzazione degli ambienti. L'impatto ambientale dell'intervento è anch'esso positivo, comportando una riduzione della CO₂ prodotta pari a circa il 12%.

In Fig. 38 e Fig. 39 è riportato il consumo di energia primaria in tep ripartito tra le varie voci, prima e dopo l'intervento, dai quale si può notare come il consumo di energia primaria sia maggiormente equilibrato tra il riscaldamento ed il raffrescamento in seguito all'intervento. Dai grafici è inoltre evidente come il consumo di energia primaria dovuta alla climatizzazione sia diminuito dell'8 %, dovuto alla diminuzione di consumi di energia prima globale.

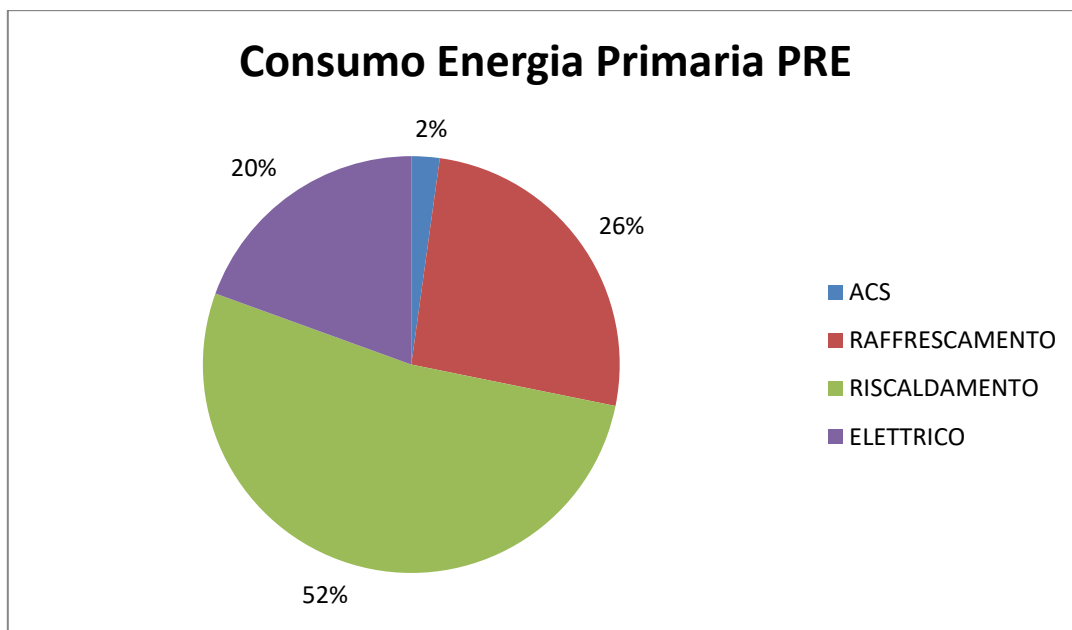


Fig. 38: Ripartizione consumi di energia primaria pre intervento

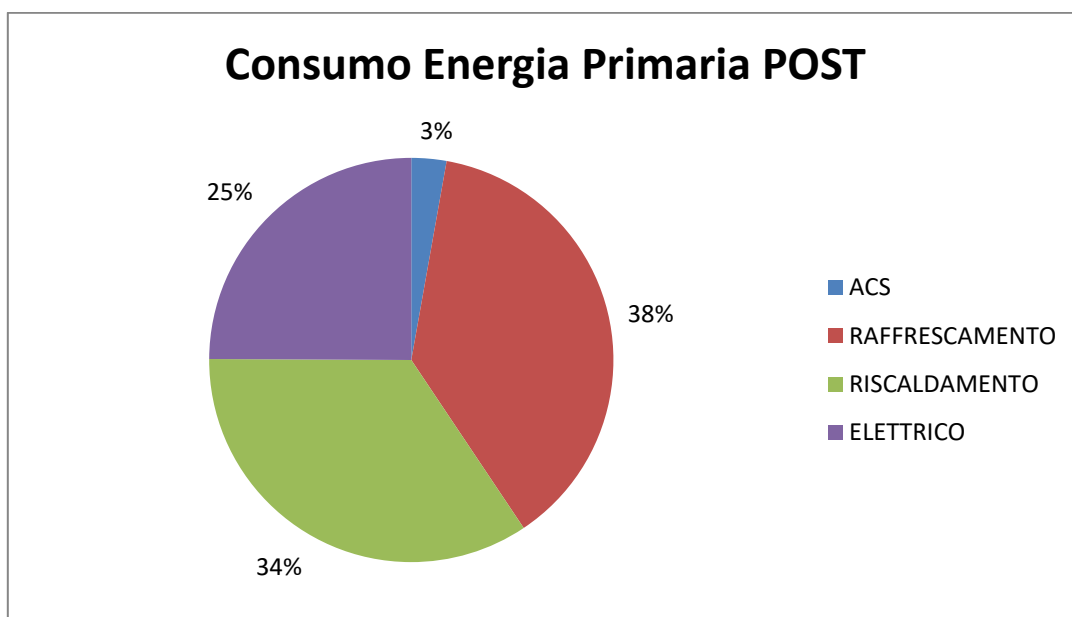


Fig. 39: Ripartizione consumi di energia primaria post intervento

In Tabella 39 sono riportati i consumi di metano e di energia elettrica nella simulazione dello stato di fatto e nel caso attuale.

	Consumo metano [m ³ /anno]	Energia elettrica assorbita [kWh/anno]
Pre intervento	25051	110827
Post intervento	15438	119785
Rapporto Percentuale	-38,4%	+8,1%

Tabella 39: Confronto spesa energetica

Di seguito la tabella riportante i parametri NZEB per lo scenario di efficientamento per la finestratura.

Parametri	u.m.	Requisiti	Stato Attuale
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.68	0.95
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.038
η_H	[%]	≥ 0.81	0.78
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 61.22	132.217
$Ep_{H,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 64.28	138.83
η_w	[%]	≥ 0.70	0.78
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 6.12	6.12
$Ep_{w,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 6.43	6.43
η_c	[%]	≥ 0.81	0.85
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	140.94
$Ep_{c,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 45.22	140.94
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 2,5	2.1
Ep_v	[kWh/m ²]	servizio energetico assente	
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 26.15	26.15
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 141.21	305.42
$P_{el,ren}$	[kW]	≥ 19.84	-
$CFE_{ren,ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55.00	-
$CFE_{ren,ACS}$	[%]	≥ 55.00	-

Tabella 40: Classificazione ZEB per efficientamento di finestratura

È possibile notare come l'intervento proposto porti all'aumento di solo alcuni dei parametri necessari per la classificazione NZEB. Nonostante l'intervento comporti un miglioramento delle caratteristiche termiche dell'involucro esterno non risulta sufficiente per diminuire il valore del parametro H'_T al di sotto del valore stabilito nell'allegato A del D.M. 26 Giugno.

8.1.2 VRV

In questo paragrafo verranno analizzati i risultati ottenuti cambiando l'attuale sistema di riscaldamento e di raffrescamento. La soluzione proposta prevede:

- Installazione di un VRV ed aggiunta di unità interne di climatizzazione in uffici, aule e sale conferenze, con libertà per l'utente di accensione e spegnimento dell'impianto.

In Fig. 40 e Fig. 41 sono rappresentati gli andamenti della potenza termica fornita dagli impianti termici alle zone termiche.

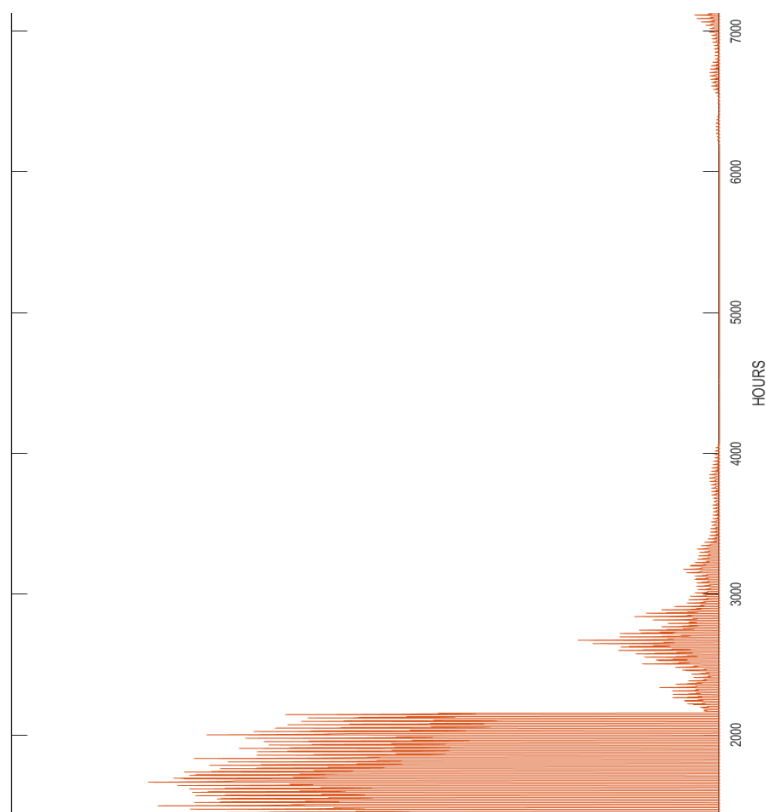


Fig. 40: Potenza termica scambiata post intervento

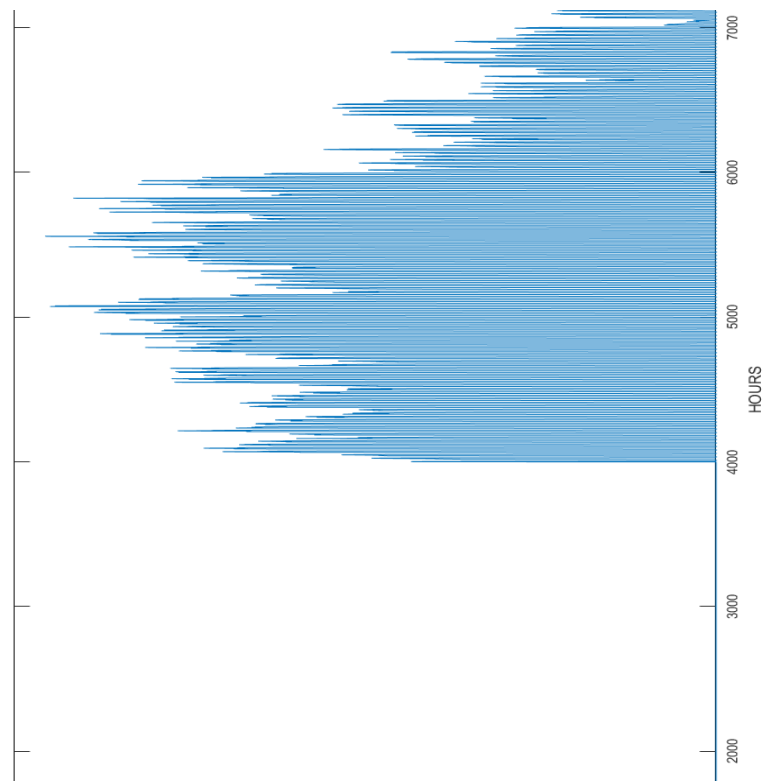


Fig. 41: Potenza frigorifera scambiata post intervento

	Energia Primaria Riscaldamento [kWh/anno]	Energia Primaria Raffrescamento [kWh/anno]	Energia primaria totale [tep]
Pre intervento	237990	63534	38.78
VRV	54629	57180	30.75
Rapporto Percentuale	-77%	-10%	

Tabella 41: Confronto energetico della soluzione proposta

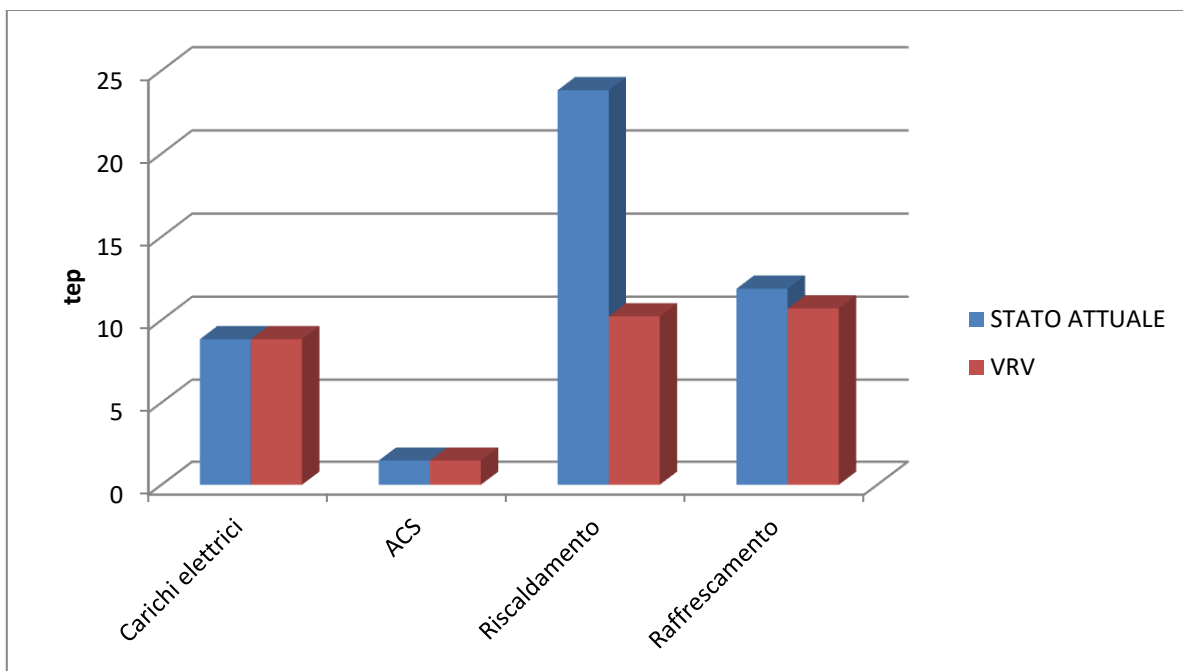


Fig. 42: Confronto ripartizione consumo energia primaria pre e post intervento

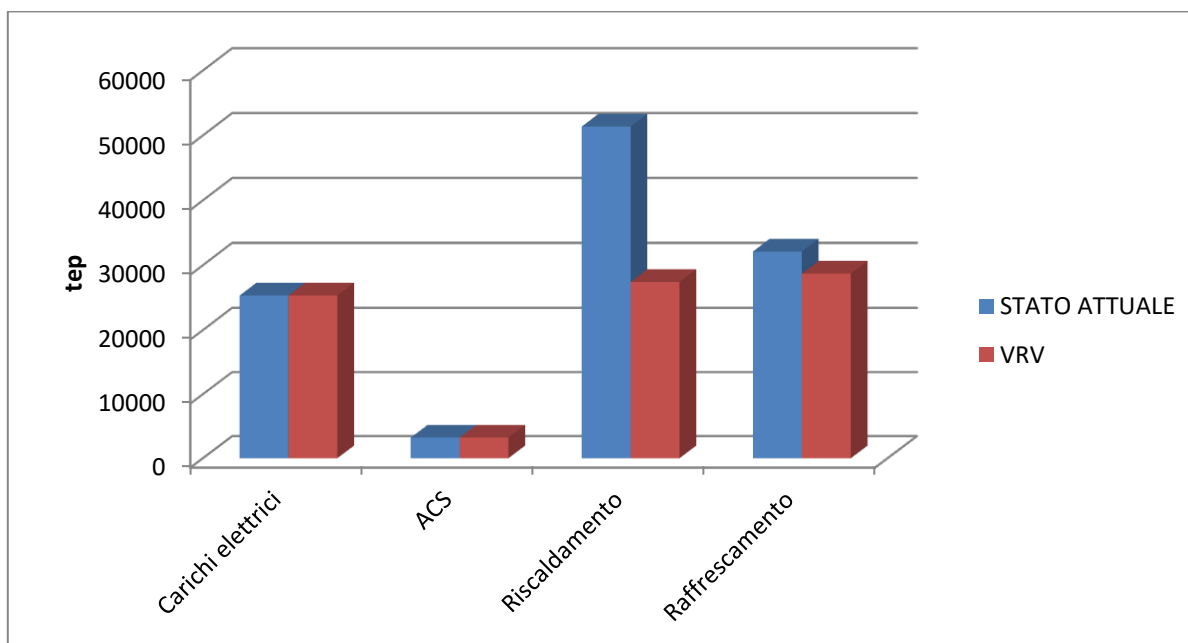


Fig. 43: Confronto ripartizione emissione CO₂

In Fig. 42 è riportato il consumo di energia primaria (tep/anno) ripartito in funzione del singolo servizio energetico presente nell'edificio oggetto di studio. È possibile notare come l'intervento proposto contribuisca ad una forte riduzione dei consumi di energia primaria per il riscaldamento ed in misura minore per il raffrescamento dell'edificio.

Di seguito sono riportati i valori dei parametri NZEB della soluzione con VRV.

Parametri	u.m.	Requisiti	NZEB1
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.68	1.15
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.051
η_H	[%]	≥ 0.81	0.82
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 61.22	30.34
$Ep_{H,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 64.28	37
η_w	[%]	≥ 0.70	0.78
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 6.12	6.12
$Ep_{w,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 6.43	6.43
η_c	[%]	≥ 0.81	0.85
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	31.76
$Ep_{c,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 45.22	37.36
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 2,5	2.1
Ep_v	[kWh/m ²]	servizio energetico assente	
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 26.15	26.15
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 141.21	94.37
$P_{el,ren}$	[kW]	≥ 19.84	-
$CFE_{ren,ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55.00	95
$CFE_{ren,ACS}$	[%]	≥ 55.00	-

Tabella 42: Classificazione ZEB per efficientamento con VRV

Si può notare un notevole risparmio di energia primaria per il riscaldamento e contemporaneamente un aumento del rendimento globale medio stagionale per il riscaldamento al di sopra del valore limite stabilito per l'edificio di riferimento. La natura dell'intervento proposto comporta il miglioramento degli impianti di generazione e distribuzione dell'energia termica dell'edificio rispettando così sia gli indici di consumo di energia primaria che i rendimenti degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento.

8.2 Scenari di efficientamento elettrico

8.2.1 Fotovoltaico

Come illustrato precedentemente, sono stati proposti due tipologie di interventi che prevedono entrambi l'installazione di un impianto FV. La soluzione A prevede la sola installazione di moduli sulla copertura, per un totale di circa 18 kWp, mentre la soluzione B prevede l'aggiunta di tegole fotovoltaiche per raggiungere un valore di potenza installata pari a circa 22 kWp. In Fig. 44 è riportata l'andamento della potenza annua di produzione del FV della soluzione A.

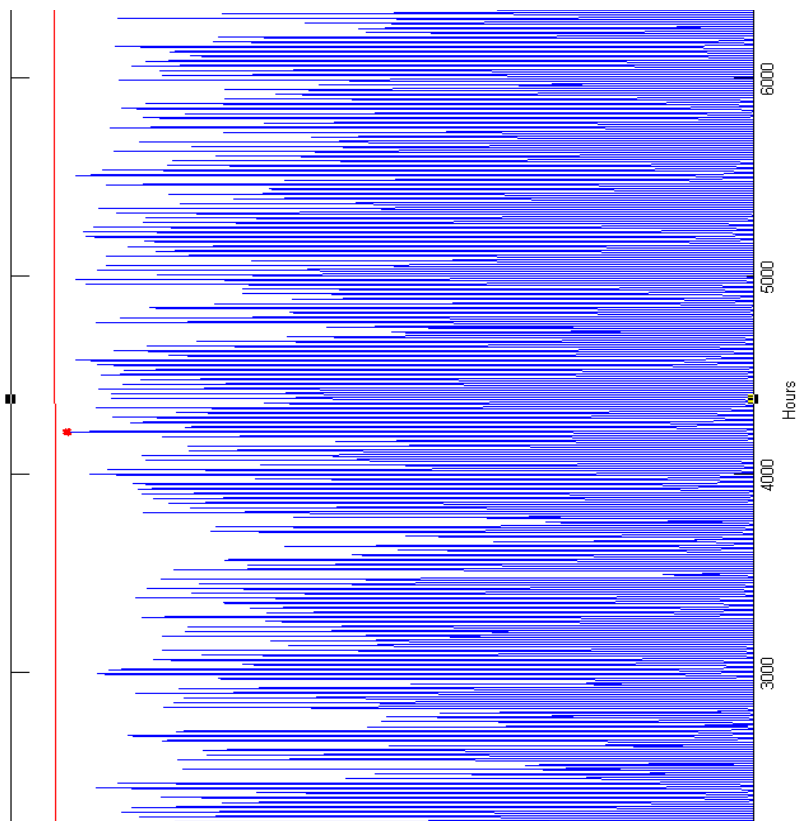


Fig. 44: Andamento della produzione da fotovoltaico della Soluzione A

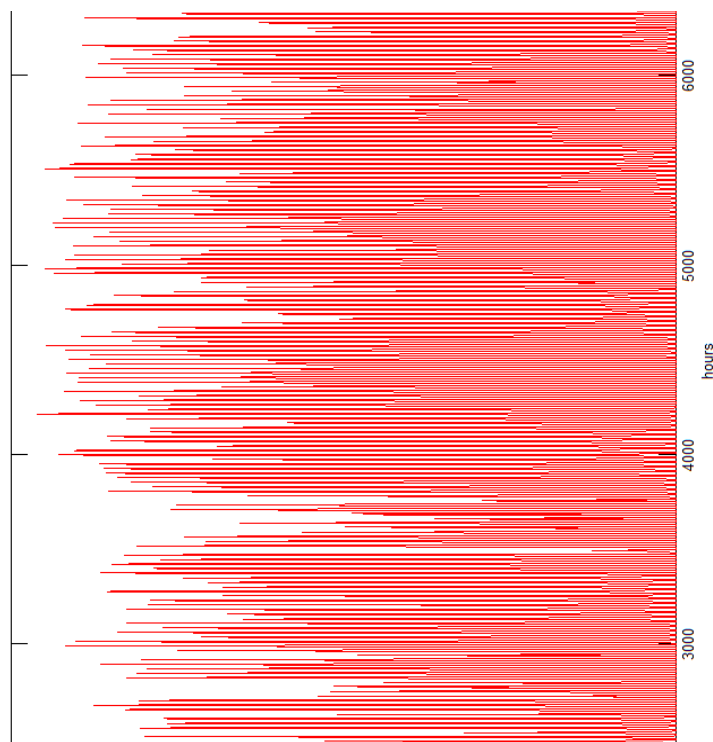


Fig. 45: Andamento della produzione da fotovoltaico delle tegole FV

È possibile notare come non si riesce a raggiungere il valore di picco, ma al massimo un valore pari a circa 17 kWp, per un totale di energia prodotta di 23058 kWh/anno, che comporta una pari riduzione di energia assorbita dalla rete elettrica.

L'andamento della potenza annua di produzione delle tegole FV è riportata invece in Fig. 45. Come si può notare anche in questo caso non viene raggiunta la potenza di picco dell'impianto. L'energia totale prodotta

dalle tegole FV è pari a 4298 kWh, che sommata all'energia prodotta dalla soluzione A dà luogo ad una produzione annua totale pari a 27356 kWh/anno.

In Tabella 43 è riportato un confronto tra le due soluzioni proposte.

Soluzione	Energia Prodotta [kWh/anno]	Energia Elettrica Assorbita da rete [kWh/anno]	Risparmio Energetico [%]	Energia primaria Risparmiata [tep]
A	23058	90822	20.2%	4.31
B	27356	86524	24.4%	5.11

Tabella 43: Confronto interventi proposti fotovoltaico

La valutazione dei parametri economici è riportata nelle Tabelle 33 e 34, dove in questo caso è stata scelta una vita dell'intervento di 20 anni.

Come evidenziato dalla valutazione economica (si veda par.7.1.2) la soluzione A è economicamente vantaggiosa rispetto alla B.

Di seguito sono riportati i valori dei parametri NZEB della soluzione con fotovoltaico.

Parametri	u.m.	Requisiti	Stato NZEB2
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.68	1.15
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.051
η_H	[%]	≥ 0.81	0.78
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 61.22	132.22
$Ep_{H,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 64.28	138.83
η_w	[%]	≥ 0.70	0.78
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 6.12	6.12
$Ep_{w,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 6.43	6.43
η_c	[%]	≥ 0.81	0.85
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	140.94
$Ep_{c,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 45.22	140.94
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 2.5	2.1
Ep_v	[kWh/m ²]	servizio energetico assente	
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 26.15	26.15
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 138.71	305.42
$P_{el,ren}$	[kW]	≥ 19.84	23
$CFE_{ren,ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55	-
$CFE_{ren,ACS}$	[%]	≥ 55	-

Tabella 44: Classificazione ZEB per efficientamento con fotovoltaico

Dalla Tabella 44 è possibile notare il raggiungimento del requisito di potenza di picco installata

8.2.2 Sistema di gestione e controllo

In questo paragrafo verrà analizzato il ruolo che può ricoprire l'impianto di gestione e controllo carichi, riferito esclusivamente alla parte elettrica, ovvero alla gestione dell'accensione dell'impianto d'illuminazione e monitoraggio dei carichi elettrici.

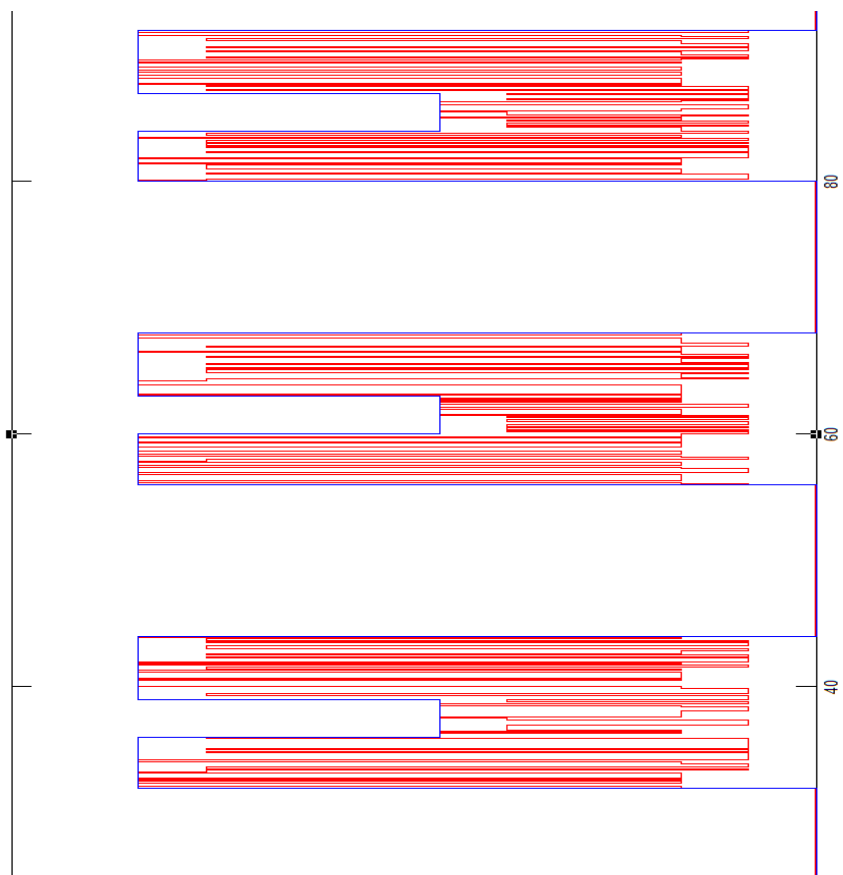


Fig. 46: Andamento assorbimento elettrico illuminazione con e senza sistema di controllo

È stato variato il criterio di accensione dei corpi luminosi senza andare a modificare la potenza complessiva che risulta essere ancora pari a circa 21 kW. In Tabella 45 sono stati riportati i consumi dell’impianto di illuminazione con e senza il sistema di controllo e monitoraggio.

	Consumo Elettrico Annuo [kWh/anno]	Energia primaria consumata [tep]
Stato Attuale	110827	46.25
Post Intervento	94900	42.70
RISPARMIO ENERGETICO [%]	14.37%	

Tabella 45: Riepilogo energetico intervento di gestione e controllo

Altro vantaggio derivante dall’installazione del sistema di controllo e telegestione carichi è la subordinazione dell’intervento all’ampliamento della rete WI-FI all’interno dell’edificio, in modo da poter permettere ai dispositivi di poter comunicare in wireless.

8.3 Scenario di efficientamento ACS

L'intervento proposto prevede la rimessa in opera dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria attualmente esistente sulla copertura di palazzo Baleani ed in disuso. L'intervento garantirebbe i risultati energetici-ambientali riportati in Tabella 46, garantendo quindi l'abbandono della caldaia per la produzione di acqua calda sanitaria.

Metano risparmiato [m³]	Tep
1130	1.00

Tabella 46: Riepilogo energetico intervento ACS

Di seguito sono riportati i valori dei parametri NZEB della soluzione con efficientamento dell'ACS.

Parametri	u.m.	Requisiti	Stato NZEB3
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.68	1.15
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.051
η_H	[%]	≥ 0.81	0.78
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 61.22	132.22
$Ep_{H,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 64.28	138.83
η_w	[%]	≥ 0.70	0.78
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 6.12	6.12
$Ep_{w,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 6.43	6.43
η_c	[%]	≥ 0.81	0.85
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	140.94
$Ep_{c,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 45.22	140.94
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 2.5	2.1
Ep_v	[kWh/m ²]	servizio energetico assente	
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 26.15	26.15
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 138.71	305.42
$P_{el,ren}$	[kW]	≥ 19.84	-
$CFE_{ren,ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55	5
$CFE_{ren,ACS}$	[%]	≥ 55	100

Tabella 47: Classificazione ZEB per efficientamento con fotovoltaico

L'intervento di ammodernamento e messa in funzione dell'impianto di produzione di acqua calda sanitaria con collettori solari, come si può notare dalla tabella precedente, comporterebbe un miglioramento limitato esclusivamente al superamento della percentuale minima di energia annua consumata per la produzione di acqua calda sanitaria. Tale intervento risulta quindi, tra gli altri elencati, quello con le minori ripercussioni positive sugli indici di prestazione energetica riportati in tabella.

8.4 Scenario globale

In questo paragrafo verrà valutato l'effetto derivante da un intervento completo di riqualificazione energetica dell'edificio, combinando tra loro gli interventi proposti e analizzati precedentemente singolarmente per l'efficientamento termico, elettrico e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Gli scenari studiati prevedono tutte le combinazioni possibili tra i tre interventi che sono risultati migliori dall'analisi del singolo ambito applicativo. Tra ambiti di intervento, di seguito viene riportata la nomenclatura che verrà utilizzata nel seguente paragrafo per identificare i vari scenari:

CODICE	SCENARIO
T	Termico (VRV + FINESTRE)
E	Elettrico (FV + SISTEMA DI GESTIONE)
A	Acqua calda sanitaria
T-E	Termico ed elettrico
T-A	Termico ed Acqua calda sanitaria
E-A	Elettrico ed Acqua calda sanitaria
T-E-A	Termico, Elettrico ed Acqua calda sanitaria

Tabella 48: Codici identificativi scenari

In Tabella 49 è stato riportato il confronto energetico-ambientale tra i vari scenari integrati, graficati nelle pagine a seguire. In verde sono stati evidenziati gli scenari migliori in funzione della grandezza analizzata.

	T	E	A	T-E	T-A	E-A	T-E-A
Consumo metano [m ³ /anno]	1130.00	25051.00	23921.00	1130.00	-	25051.00	-
Riduzione consumo metano [%]	-96%	0%	-4%	-96%	-100%	-4%	-100%
Energia Elettrica [MWh/anno]	119.82	60.92	110	104.14	119.82	60.92	104.14
Variazione consumo elettrico [%]	8%	-45%	0%	-6%	8%	-45%	-6%
Consumo Energia primaria [tep/anno]	23	32.3	40	20.04	22.3	32.33	19.47

Tabella 49: Analisi Energetica – Ambientale interventi proposti

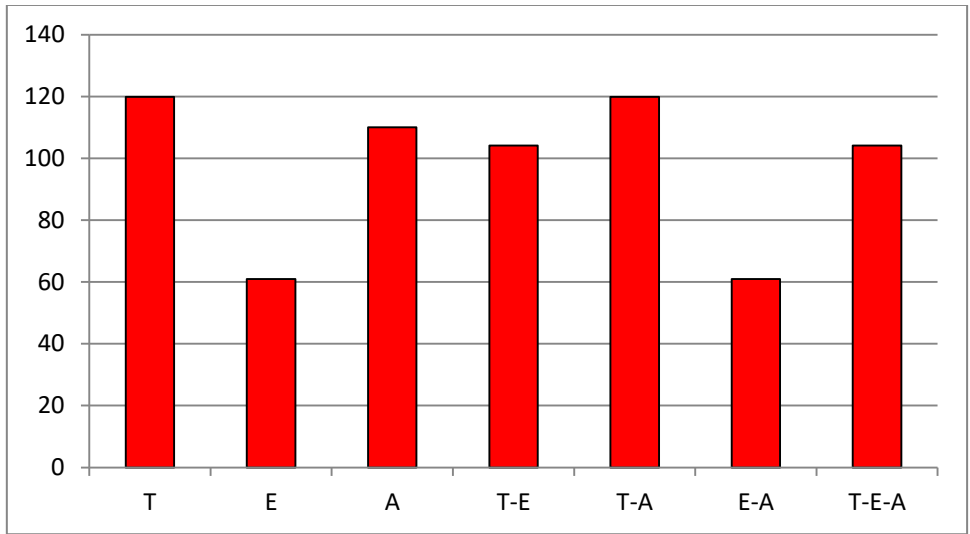


Fig. 47: Energia elettrica annua assorbita dalla rete

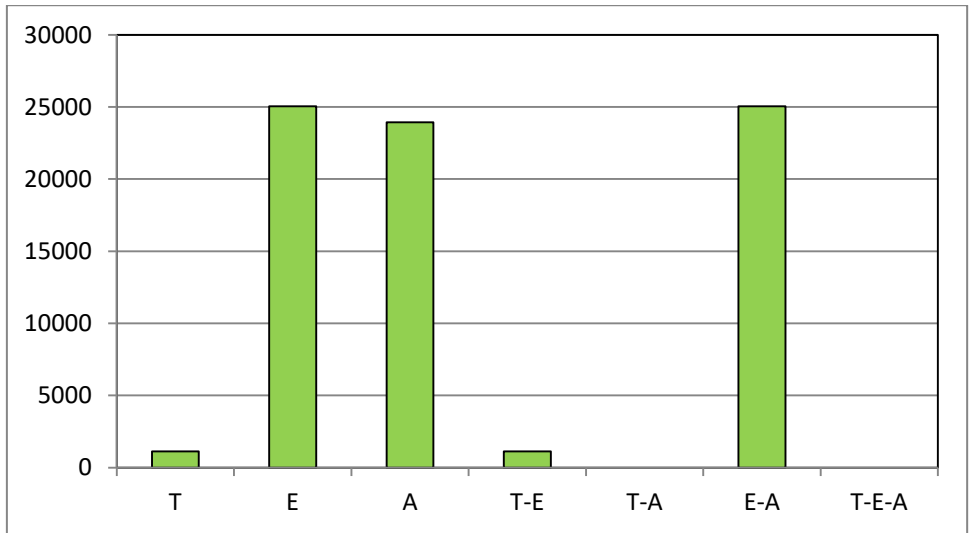


Fig. 48: Consumo di metano annuo

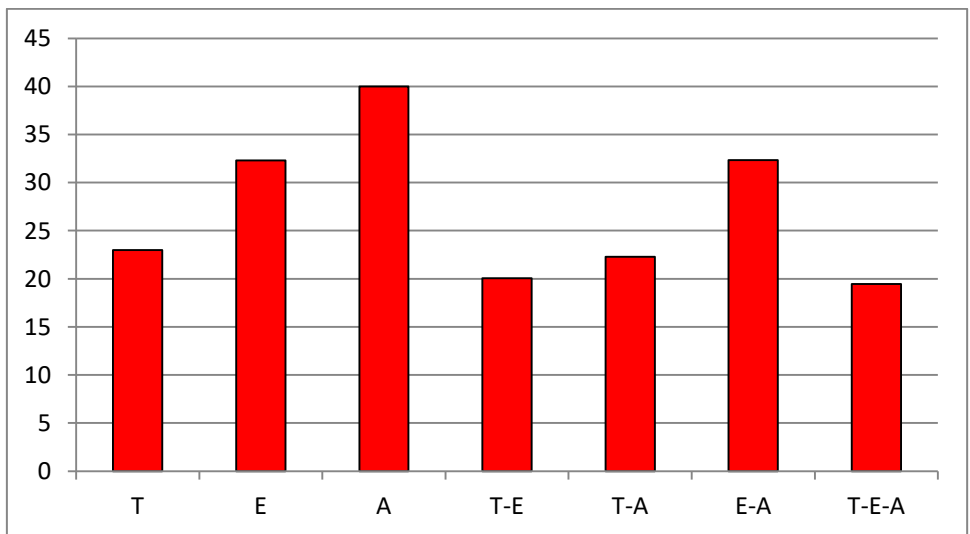


Fig. 49: Consumo di energia primaria annuo

Dai grafici e dai relativi valori riportati nelle Fig. 47-49 risulta evidente come lo scenario “T-E-A” comporti i maggiori vantaggi dal punto di vista ambientale e energetico. Si può notare come il cambiamento di energia primaria utilizzata per la climatizzazione comporti un netto miglioramento ambientale e energetico, garantendo i risultati sopra esposti.

Il quadro del raggiungimento nZEB rispetto all’insieme di tutti gli efficientamenti risulta essere il seguente:

Parametri	u.m.	Requisiti	NZEB1
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.68	0.95
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.038
η_H	[%]	≥ 0.81	0.82
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 61.22	27.34
$Ep_{H,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 64.28	35
η_w	[%]	≥ 0.70	0.78
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 6.12	6.12
$Ep_{w,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 6.43	6.43
η_c	[%]	≥ 0.81	0.85
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	33.48
$Ep_{c,nd}$	[kWh/m ²]	≤ 45.22	38.15
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 2.5	2.1
Ep_v	[kWh/m ²]	servizio energetico assente	
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 26.15	26.15
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 138.71	94.37
$P_{el,ren}$	[kW]	≥ 19.84	23
$CFE_{ren,ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55	100
$CFE_{ren,ACS}$	[%]	≥ 55	100

Tabella 50: Classificazione ZEB per efficientamento con fotovoltaico

Dall’analisi appena condotta risulta evidente come l’intervento globale permetta di raggiungere i requisiti minimi richiesti da un edificio NZEB in termini di: riduzione dei consumi di energia primaria, di energia utile, di aumento dell’efficienza degli impianti di riscaldamento, di raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria. Risulta raggiunto anche il target di rinnovabilità imposto per un edificio NZEB con i valori di potenza di FV installati superiori ai valori minimi e percentuali di consumo da fonte rinnovabile per l’acqua calda sanitaria e per la climatizzazione superiori al 55% stabilito e pari al 100% dell’energia prodotta.

Tuttavia, nonostante il netto miglioramento rispetto alla soluzione attuale non avendo potuto prevedere soluzioni che interessassero l’involucro opaco dell’edificio non è stato possibile rispettare i valori stabiliti dal parametro H'_T e di conseguenza l’edificio non può essere ritenuto NZEB.

9 Analisi economica degli interventi

I diversi scenari proposti sono stati analizzati dal punto di vista economico, al fine di valutarne la redditività. I costi unitari dei vettori energetici (gas ed elettricità) sono stati ripresi dalle bollette di fornitura. L'analisi economica è stata sviluppata utilizzando il software SEAS messo a disposizione da ENEA, considerando un tasso di inflazione del 2%, costi stabili del gas e dell'elettricità e un tasso di interesse del finanziamento pari all'1,479%, in linea con quello concesso da BEI alla Sapienza.

Intervento/SCENARIO	Costo intervento [€]	Costo SCENARIO [€]
Sostituzione infissi	32.900	
VRV	38.600	
SCENARIO T (VRV + FINESTRE)		71.500
Fotovoltaico	70.700	
Sistema di gestione e controllo	29.300	
SCENARIO E (FV + SISTEMA DI GESTIONE)		100.000
Efficientamento ACS	4.100	
SCENARIO A (Efficientamento ACS)		4.100
SCENARIO T-E (TERMICO ED ELETTRICO)		171.500
SCENARIO T-A (TERMICO E ACQUA CALDA SANITARIA)		75.600
SCENARIO E-A (ELETTRICO ED ACQUA CALDA SANITARIA)		104.100
SCENARIO T-E-A (TERMICO, ELETTRICO E ACQUA CALDA SANITARIA)		175.600

Tabella 51: Costo dei diversi interventi e dei diversi scenari previsti.

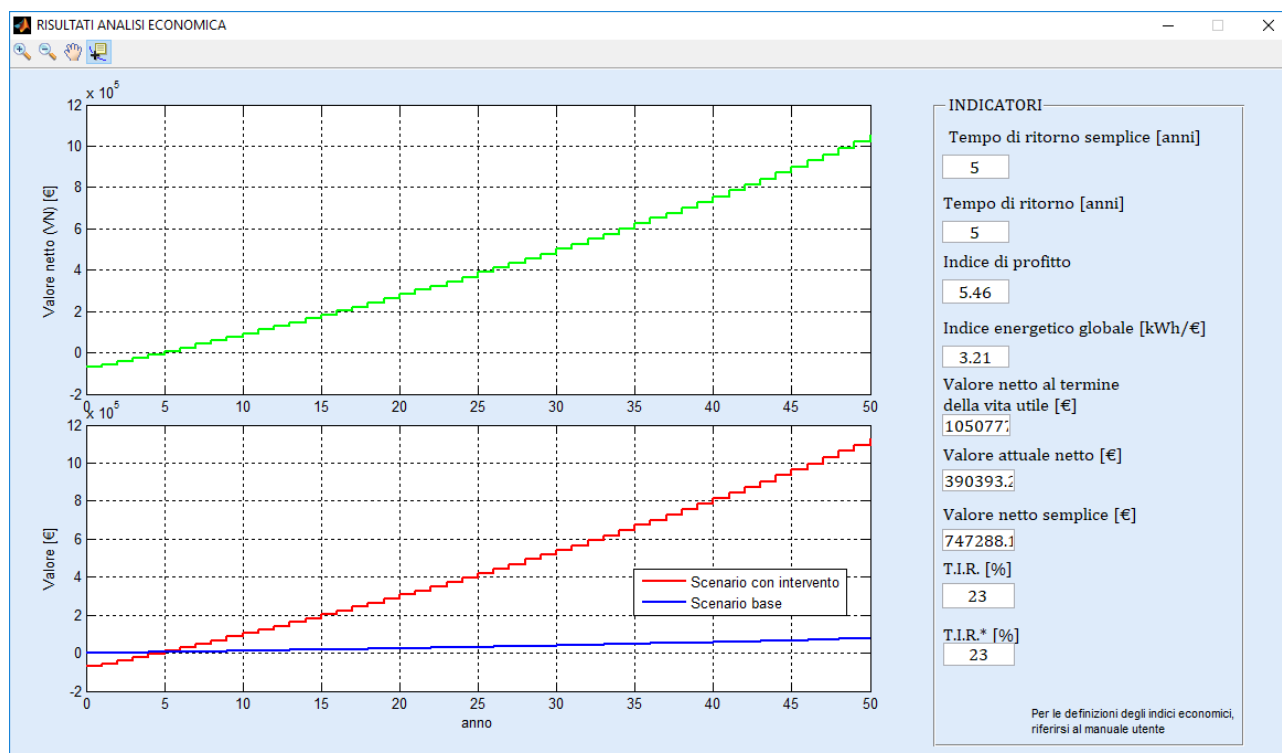


Fig. 50: Scenario T – Risultati analisi economica

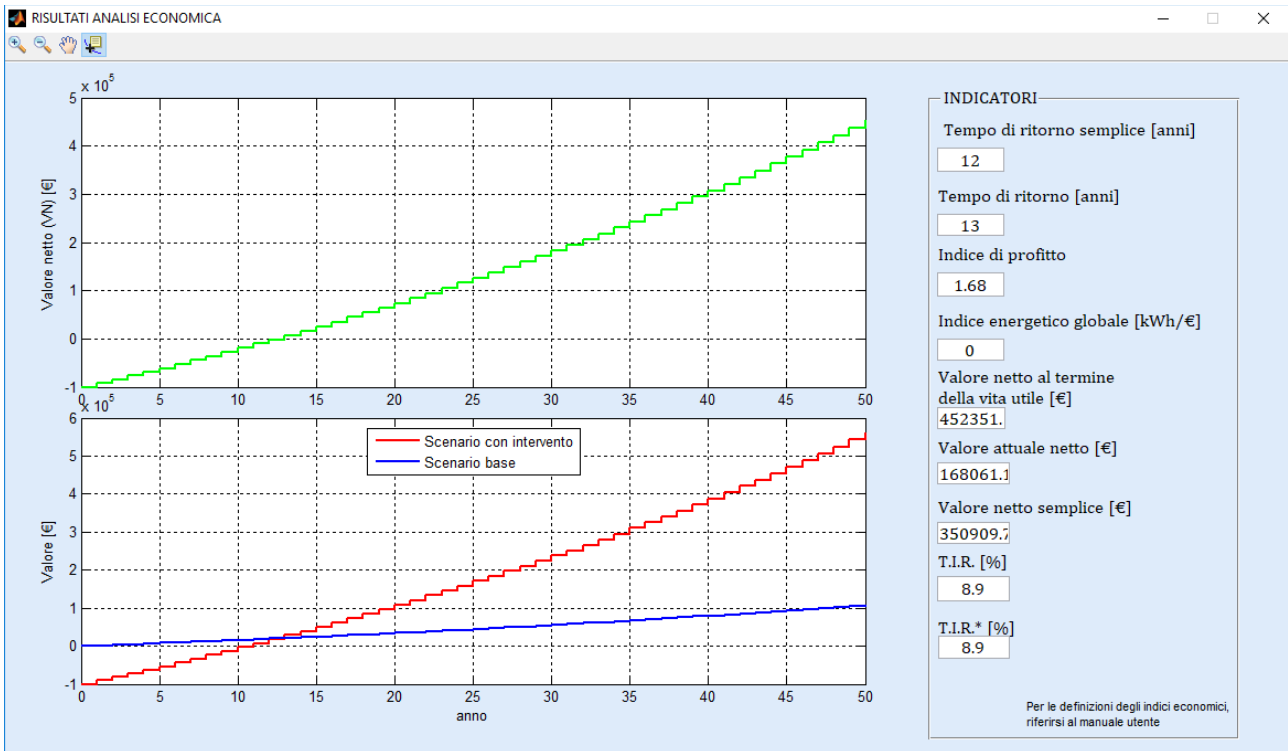


Fig. 51: Scenario E – Risultati analisi economica

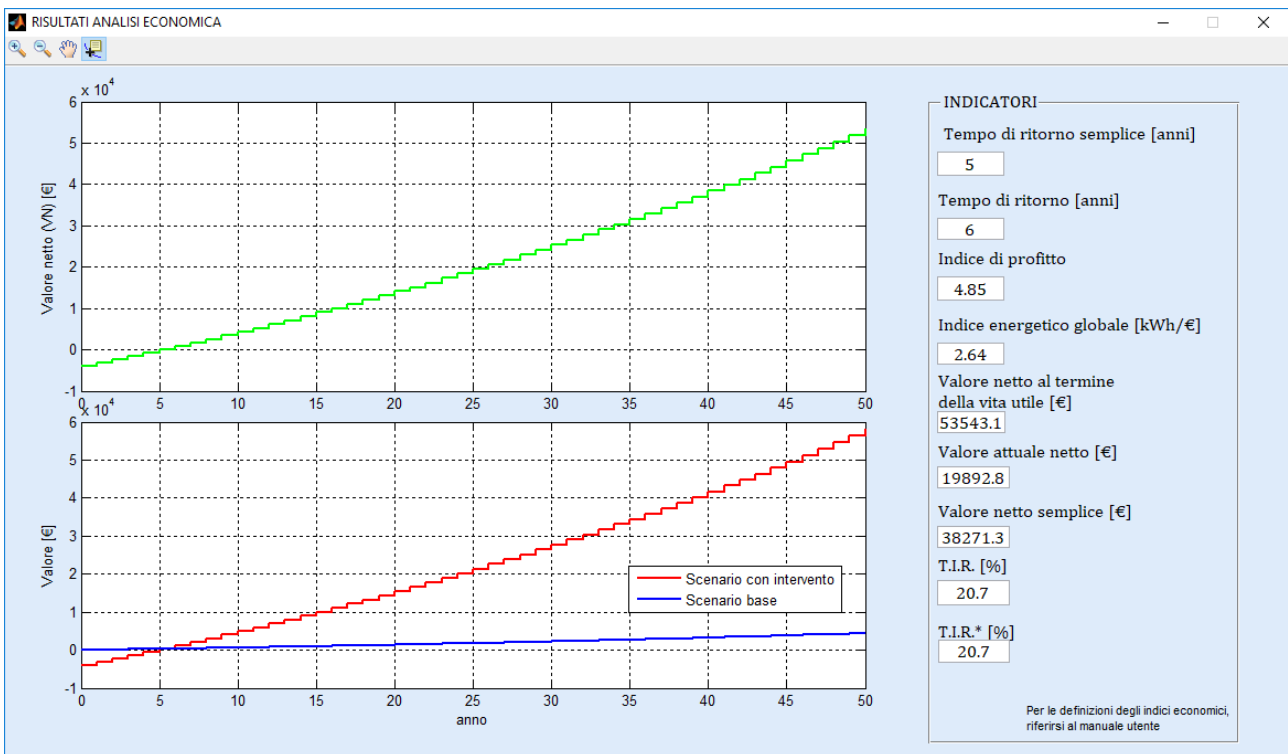


Fig. 52: Scenario A – Risultati analisi economica

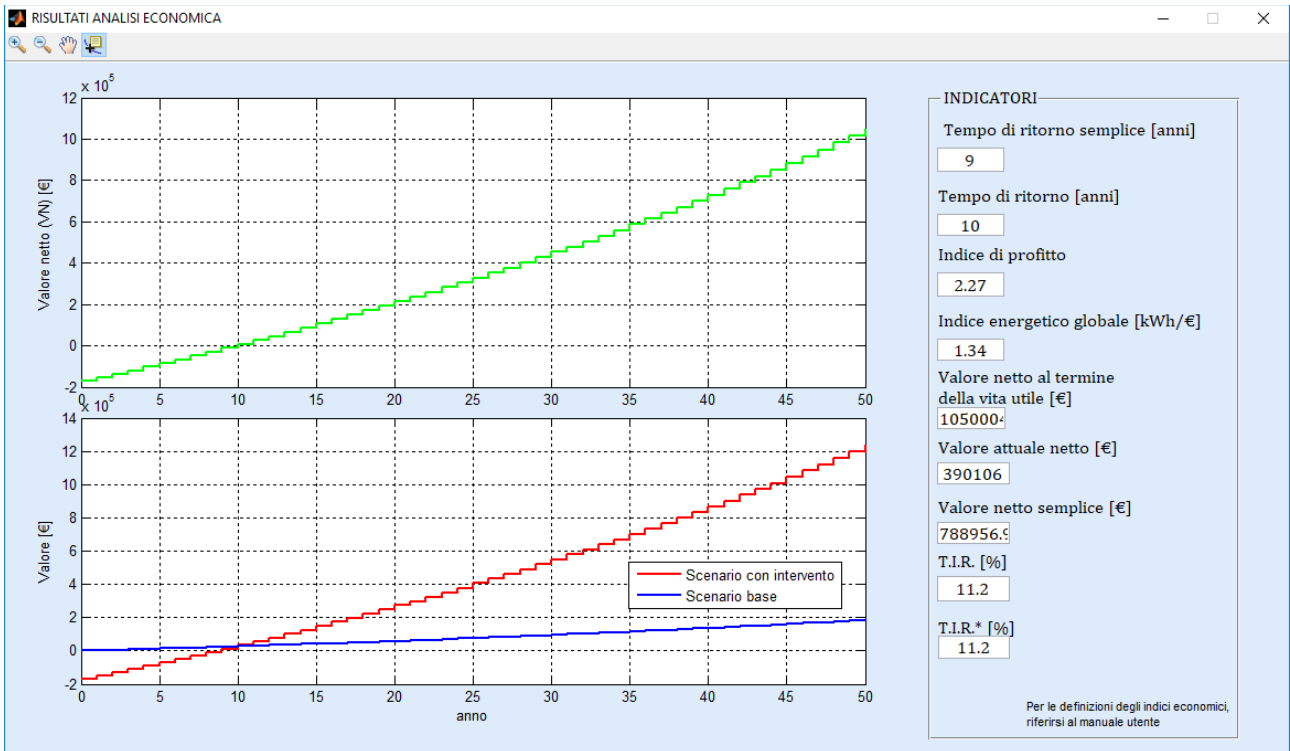


Fig. 53: Scenario T-E – Risultati analisi economica

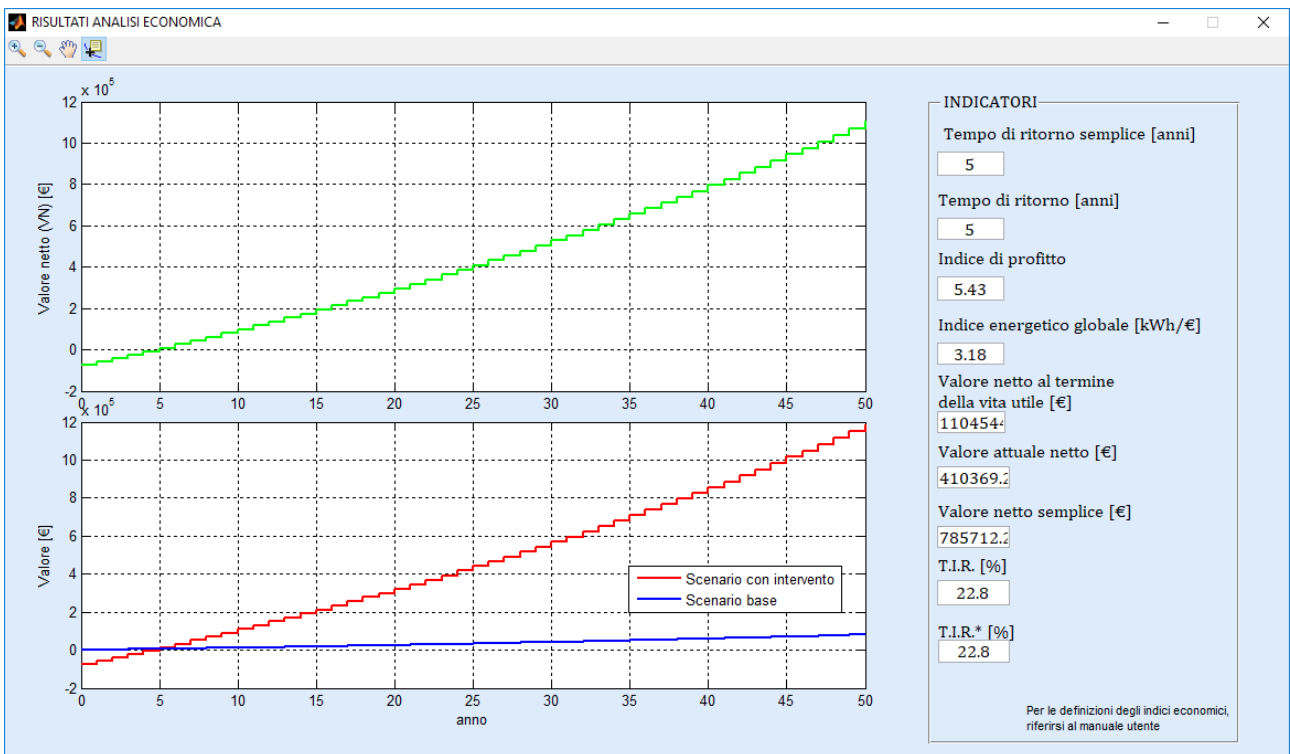


Fig. 54: Scenario T-A – Risultati analisi economica

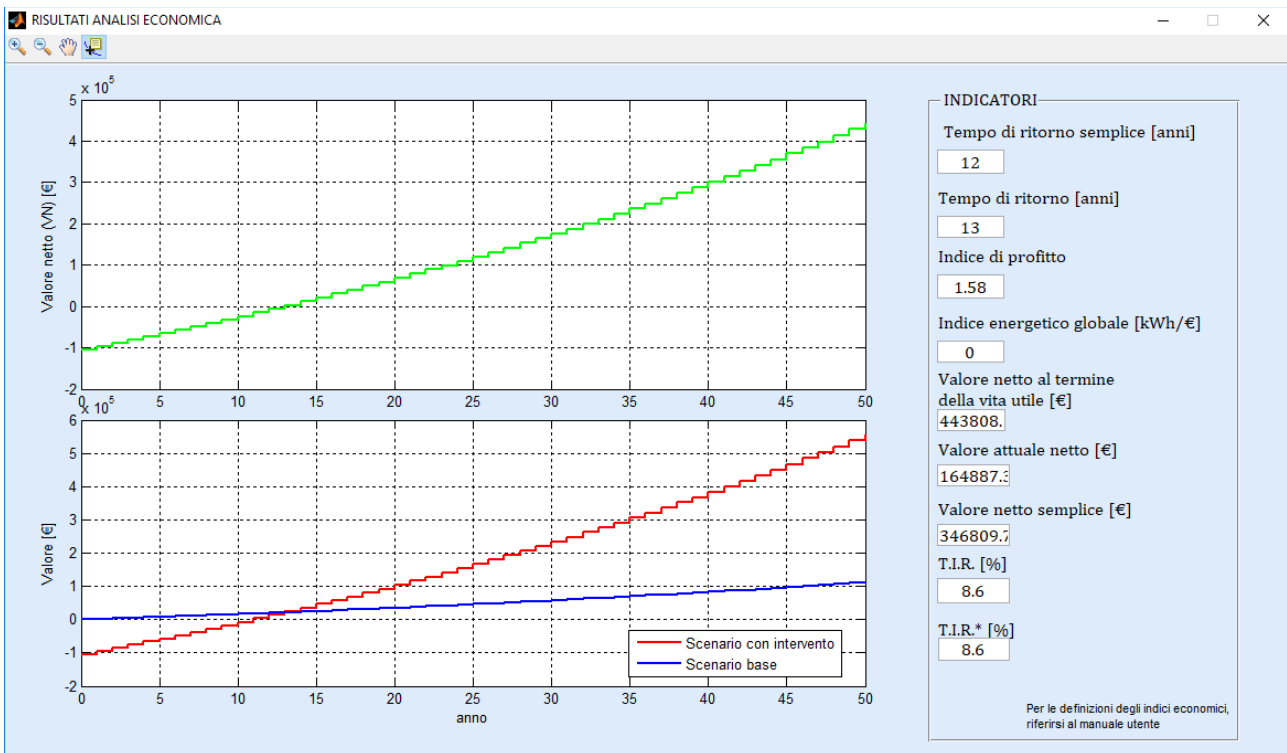


Fig. 55: Scenario E-A – Risultati analisi economica

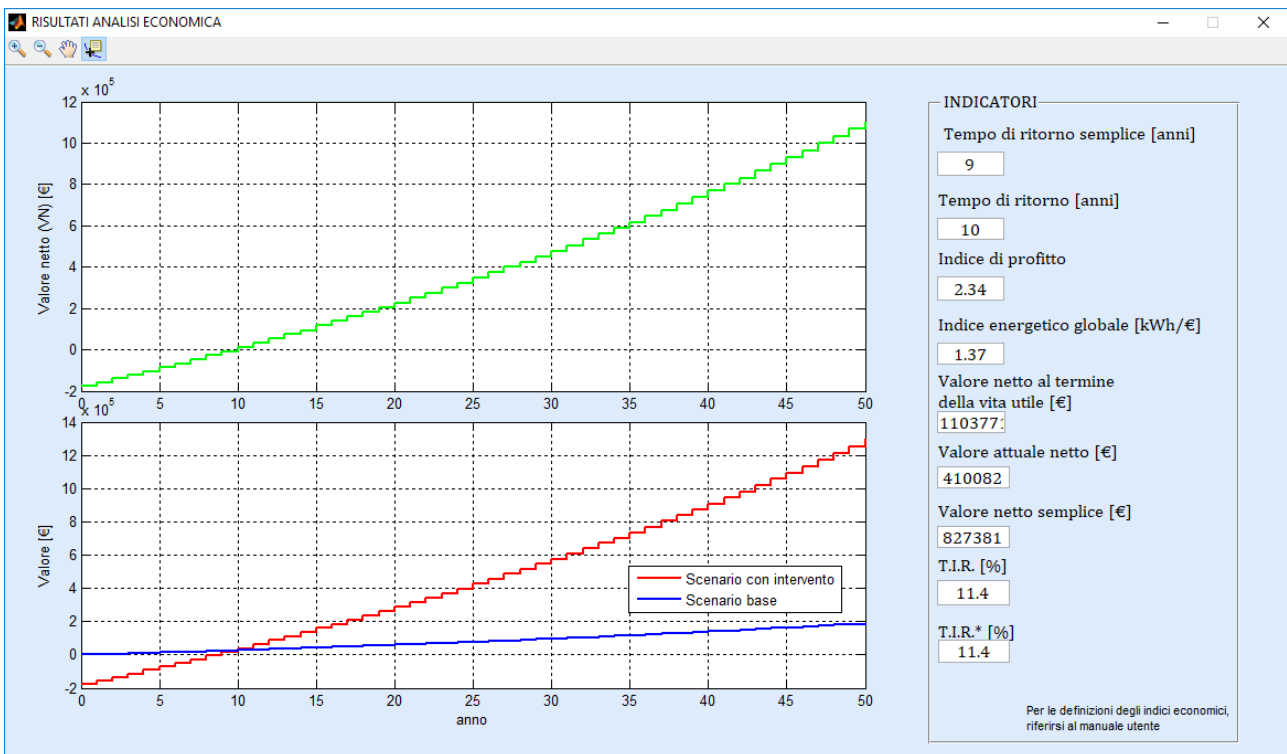


Fig. 56: Scenario T-E-A – Risultati analisi economica

I grafici delle figure seguenti riportano il tempo di ritorno degli investimenti previsti nei diversi scenari e il T.I.R..

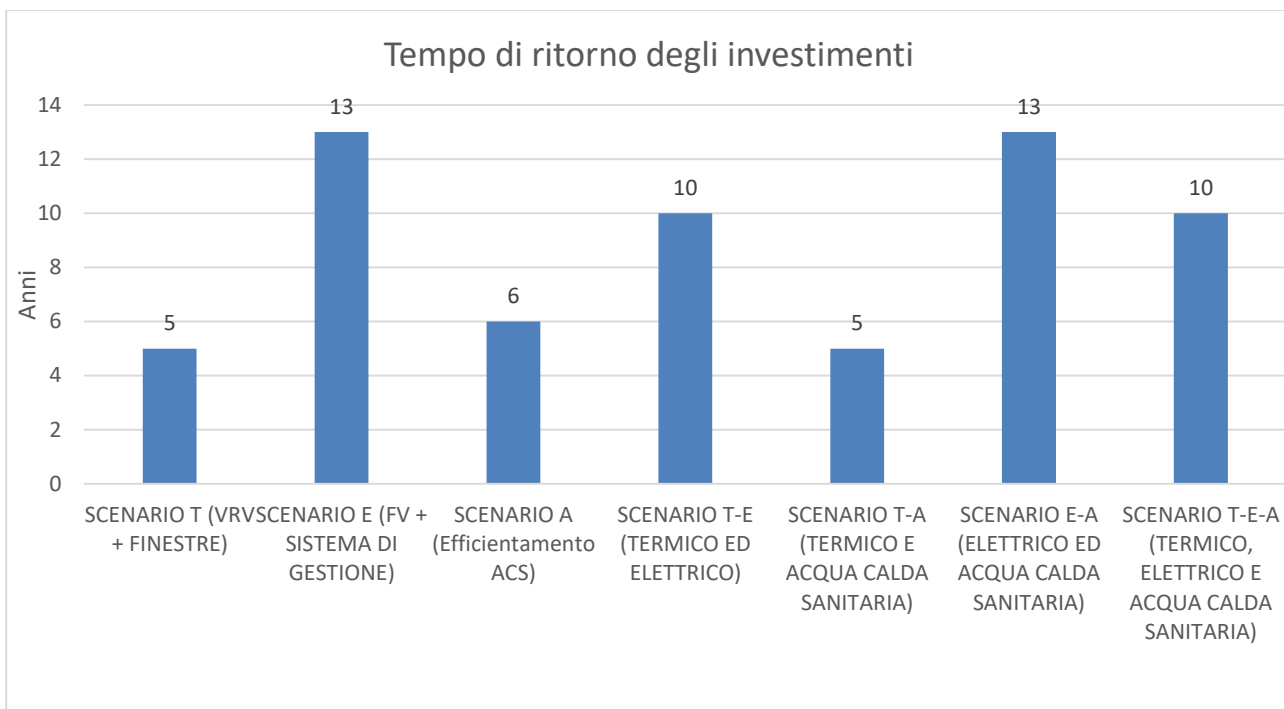


Fig. 57: Riepilogo tempo di ritorno degli investimenti

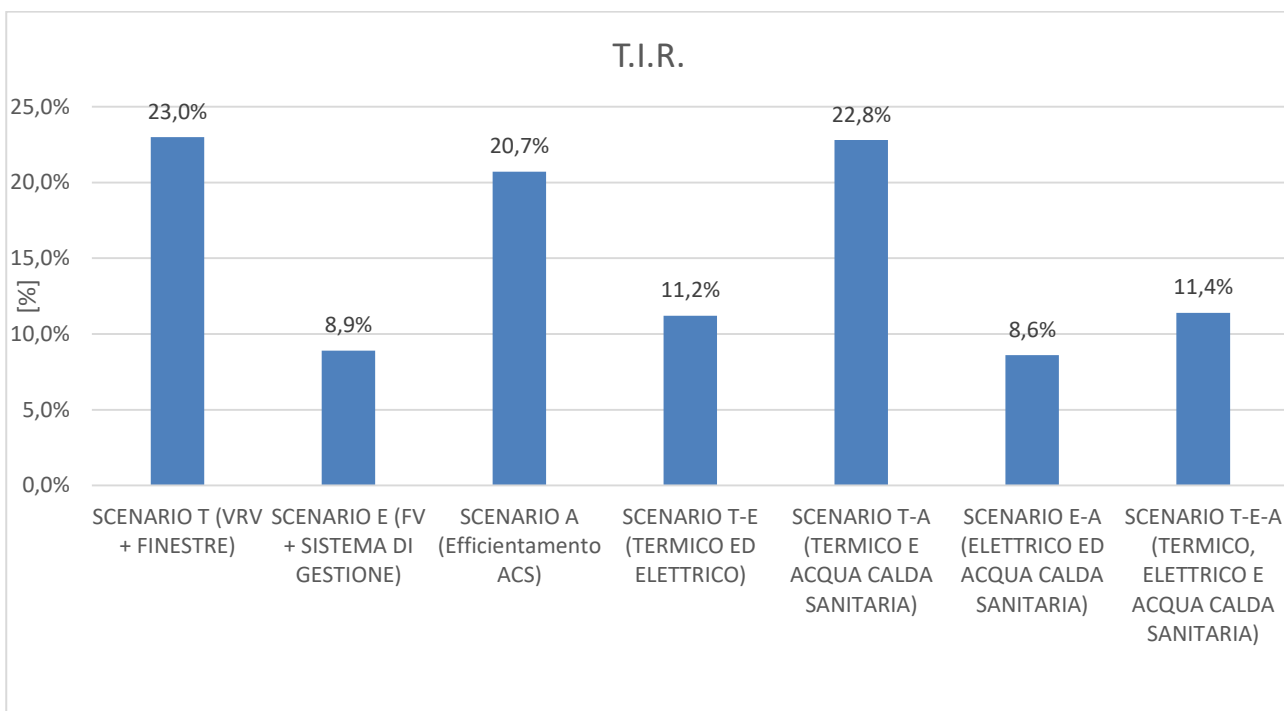


Fig. 57: Riepilogo tasso Interno di Rendimento

Lo scenario T risulta essere senz'altro il migliore, con un tempo di ritorno di 5 anni e un TIR del 23%. Considerando tutti gli interventi il tempo di ritorno è di 10 anni e il TIR è pari all'11,4%.

10 Considerazioni conclusive

Nell'ambito della presente ricerca si è valutata la possibilità di riqualificare in NZEB un edificio storico di riferimento per il comune di Roma e, più in generale, rappresentativo della zona climatica Centro Italia (zona D).

L'edificio di palazzo Baleani risulta essere un edificio con un involucro edilizio non prestante dal punto di vista energetico. Sebbene sia necessario affrontare un intervento di riqualificazione dell'involucro al fine di rientrare nei parametri per la definizione dell'edificio come NZEB, tale intervento non risulta possibile dato il valore architettonico e culturale delle murature esterne.

Non è quindi possibile raggiungere la classe N-ZEB, nonostante siano stati rispettati la totalità dei parametri riportati in Tabella 79. Tramite l'intervento proposto di installazione di un impianto FV da 23 kWp (superiore al valore limite richiesto), integrato con la generazione di energia termica tramite i sistemi VRV esistenti vengono rispettati i requisiti di consumo di energia termica da fonte rinnovabile e di consumo di energia elettrica da fonte rinnovabile. Inoltre, gli interventi proposti che prevedono l'installazione di nuovi infissi, con valori di trasmittanza consoni ai nuovi limiti stabiliti dalla normativa, e l'installazione di collettori solari in copertura consentirebbero di raggiungere sia i parametri energetici relativi al fabbisogno di energia termica per il riscaldamento che per la produzione di energia termica per riscaldamento ed acqua calda sanitaria da fonte rinnovabile.

L'analisi costi benefici condotta ha evidenziato come i tempi di ritorno di questi interventi siano verosimilmente lunghi (10 anni), rendendo difficile la realizzazione degli stessi. Nonostante ciò è stato potuto notare come l'integrazione degli interventi generi uno scenario migliore sia dal punto di vista energetico-ambientale che economico, abbassando i tempi di ritorno degli investimenti.

Riferimenti bibliografici

- [1] Ente Italiano di Normazione . *UNI 12464: Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni*. Milano: UNI. 2013.
- [2] D.M. 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”.
- [3] G. Guido Dell'Osso e A. Pierucci. *Building automation e sostenibilità in edilizia*. Milano: Maggioli Editore, 2013.
- [4] C. Pizzetti. *Condizionamento dell'aria e refrigerazione. Teoria e calcolo degli impianti*. Milano: CEA. 1985.
- [5] Solar Energy Laboratory. *TRNSYS Program Guide: Multizonal Building*. Madison. USA: University of Wisconsin-Madison, 2016.
- [6] D. Macchi. «Romapedia.» 19 Ottobre 2016. [Online]. Available: http://www.davidmacchi.com/tourguide/Palazzo_Baleani_files/Media/Romapedia%2011%20DSC_0679/Romapedia%2011%20DSC_0679.jpg?disposition=download. [Consultato il giorno 10 Giugno 2017].
- [7] Università di Firenze. «Impianti di riscaldamento.» 02 Marzo 2007, [Online], Available: http://www.taed.unifi.it/fisica_tecnica/Gabriele/03b-2007 [impianti%20di%20riscaldamento.pdf](#). [Consultato il giorno 18 Luglio 2017].
- [8] Ministero dei Beni e delle attività culturali e del turismo. «Vincoli in rete.» 20 Luglio 2017, [Online], Available: <http://vincoliinretegeo.beniculturali.it/vir/vir/vir.html>. [Consultato il giorno 20 Luglio 2017].
- [9] T. d. g. c. DEI. *Tariffario impianti tecnologici I semestre*. Roma: DEI, 2007.
- [10] Regione Lazio. «Prezzario Regione Lazio.» 05 Maggio 2016, [Online], Available: www.regione.lazio.it/binary/rl_main/tbl:documenti/INF_DGR_412_06_08_2012_Allegato3.pdf. [Consultato il giorno 10 Luglio 2017].
- [11] H-Tek. «Scheda Tecnica: Pompa di calore.» 03 Giugno 2015, [Online], Available: www.h-tec.bz/manuali/RXYQ-M%20di%20progettazione%20installazione%20%20prova-SiT39-303.pdf. [Consultato il giorno 03 Maggio 2017].
- [12] Sun Power. «Scheda Tecnica: Inverter Trifase.» 20 Maggio 2015, [Online], Available: <http://www.energeticasolareroma.com/energiasolare/wp-content/uploads/2015/01/scheda-tecnica-sun-power-327.pdf>. [Consultato il giorno 15 Giugno 2017].
- [13] Industrie Cotto Possagno. «Scheda tecnica: Tegola Fotovoltaica.» 5 Giugno 2016, [Online], Available: <http://www.cottopossagno.com/foto/doc/Coppo%20e%20Tegola%20Fotovoltaici%20mag12>.

pdf. [Consultato il giorno 5 Luglio 2017].

- [14] Sun Power. «Scheda Tecnica: Inverter Trifase.» 15 Luglio 2015, [Online], Available: <http://it.rs-online.com/p/inverter/7054818>. [Consultato il giorno 30 Giugno 2017].
- [15] ELBI. «Scheda Tecnica: Serbatoio d'accumulo solare.» 20 Febbraio 2014, [Online], Available: <http://www.cvbeltrame.it/wp-content/cataloghi/ELBI.pdf>. [Consultato il giorno 15 Marzo 2017].

Breve curriculum scientifico dei membri del gruppo di lavoro

Prof. Giuseppe Piras, Architetto e ingegnere, dottore di ricerca in Riqualificazione e recupero insediativo. Dal 2001 è Professore di Fisica Tecnica Ambientale dell'Università La Sapienza di Roma; dal 2002 al 2008 è stato docente di Impianti tecnici presso la Scuola Ufficiali del Genio Militare di Roma Corso Superiore di Specializzazione; da oltre 15 anni è Consulente tecnico presso la Procura della Repubblica di Roma. Svolge, presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica della Sapienza, attività di ricerca nei settori dell'energetica civile e del controllo ambientale, è autore di numerosi articoli e pubblicazioni. Dal 2016 è Direttore del Master universitario in "Gestione integrata e valorizzazione dei patrimoni immobiliari e urbani - Asset, Property, Facility & Energy Management" alla Sapienza Università di Roma. Dal 2015 è un componente del Senato Accademico della Sapienza Università di Roma. Dal 2001 al 2010 è stato componente di un gruppo di ricerca presso il Dipartimento di Fisica Tecnica di Roma per la certificazione energetica degli edifici e per lo studio della qualità dell'aria in ambienti confinati. Già direttore del SUMIT e Membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in "Risparmio energetico e microgenerazione distribuita"; Membro del Consiglio Nazionale della FIAS. È Referente per le iniziative nel campo del risparmio energetico e del controllo ambientale della Sapienza Università di Roma.

Nel corso degli ultimi tre anni, ha collaborato ad un progetto di ricerca internazionale di grande rilevanza "SoURCE – Sustainable Urban Cells", promosso dal Ministero degli Affari Esteri e co-finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, nell'ambito della cooperazione scientifica e tecnologica bilaterale Italia - Svezia, elaborato congiuntamente tra il centro CITERA della Sapienza Università di Roma e il Royal Institute of Technology di Stoccolma (School of Architecture and Built Environment, Dept of Urban Planning & Environment).

Ph.D. Fabio Nardecchia, nato a Roma nel 1977, è assegnista di ricerca Post-Doc presso il dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE). Laureato in Ingegneria Astronautica (2009) e Dottore di Ricerca in Energia e Ambiente (2017). Ha svolto supporto alla didattica per i corsi di Aerodinamica, Gasdinamica, Fisica Tecnica, Edifici Ecosostenibili e Progettazione delle Smart Cities. Principali campi di studio: termofluidodinamica monofase e bifase, tecniche dello scambio termico convettivo e conduttivo, 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, reti energetici, fonti rinnovabili. Autore di oltre 20 pubblicazioni su riviste internazionali o in atti di congressi. Docente per il corso di perfezionamento in Smart Cities e Communities. Titolare di consulenze o collaboratore per vari contratti di ricerca nell'ambito della diagnosi, dell'efficienza, della normativa, della pianificazione e della conversione energetica.

Ph.D. Flavio Rosa laureato in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio presso la Facoltà di Ingegneria di Roma La Sapienza. Abilitato alla professione di Ingegnere e iscritto all'albo della provincia di Roma. Dottore di Ricerca in Energetica conseguito presso il DINCE Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia con una tesi sull'utilizzo delle Biomasse in aree naturali protette. Assegnista di ricerca: A.A. 2010/11 Studio e valutazione delle criticità ambientali legate al trasporto marittimo di merci pericolose, AA.AA. 2011/12 2012/13 Implementazione energie rinnovabili all'interno delle aree portuali. Docente a contratto di Fisica Tecnica Ambientale presso la facoltà di Architettura di Roma per gli AA.AA. 2014/15 e 2015/16. Docente Master Universitario di I livello BIM- Building Information Modeling Facoltà Architettura Roma Sapienza e Master di I livello Gestione del Processo Edilizio – Project Management. Tutor e correlatore di tesi nel campo delle FER e loro interazione con il costruito presso Facoltà Architettura Roma La Sapienza. Revisore articoli scientifici per riviste del gruppo Elsevier e PLEIA Conference.

Autore di pubblicazioni nel campo delle energie rinnovabili e riqualificazione energetica all'interno di edifici storici.

Federica Barbanera, dottoranda in Energia e Ambiente, lavora nell'ambito della certificazione ambientale a scala edilizia e a scala urbana. Ha esperienza anche nell'ambito della gestione sostenibile della fascia costiera avendo partecipato a due progetti europei con il dipartimento DIAEE di Sapienza.