



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggio e misure energetiche di un edificio elevate prestazioni. Confronto tra dati derivanti da calcolo e dati effettivi

F. Cumo, F. Nardecchia, D. Groppi, B. De Lieto Vollaro, C. Romeo

MONITORAGGIO E MISURE ENERGETICHE DI UN EDIFICIO A ELEVATE PRESTAZIONI. CONFRONTO TRA DATI DERIVANTI DA CALCOLO E DATI EFFETTIVI

F. Cumo, F. Nardecchia, D. Groppi, A. D'Angelo, B. De Lieto Vollaro - C.I.T.E.R.A - Centro di Ricerca Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente-Sapienza Università di Roma
C. Romeo - ENEA

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Monitoraggio e misure energetiche degli edifici a elevate prestazioni energetiche

Responsabile del Progetto: ing. Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Monitoraggio e misure energetiche di un edificio a elevate prestazioni. Confronto tra dati derivanti da calcolo e dati effettivi"*

Responsabile scientifico ENEA: Arch. Carlo Romeo

Responsabile scientifico CITERA (Sapienza): Prof. Fabrizio Cumo

Indice

1	SOMMARIO	5
2	INTRODUZIONE	7
3	IL CASO STUDIO: PALAZZO THEODOLI	8
3.1	CARATTERIZZAZIONE DEL CASO STUDIO	10
3.1.1	<i>Involucro</i>	17
3.1.2	<i>Impianti elettrici</i>	19
3.1.3	<i>Sistemi di climatizzazione invernale/estiva</i>	19
3.1.3.1	Centrale termica	20
3.1.3.2	Centrale di condizionamento	22
3.1.3.3	Unità Multi a espansione diretta	24
3.1.3.4	Terminali di utenza	25
4	ANALISI ENERGETICA TRAMITE MODELLAZIONE NUMERICA	27
4.1	IL SOFTWARE TRNSYS	27
4.1.1	<i>Dati di input</i>	27
4.1.2	<i>Le zone termiche</i>	28
4.2	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO	32
4.2.1	<i>Simulation Studio</i>	32
4.2.1.1	Dati climatici	33
4.2.1.2	Shading	33
4.2.1.3	Controllo	33
4.2.1.4	Forzanti	33
4.2.2	<i>TRNBUILD</i>	34
4.2.2.1	Definizione caratteristiche strutture	34
4.2.2.2	Definizione dei carichi termici interni	34
4.2.2.3	Occupancy	35
4.2.2.4	Illuminazione ed apparecchiature elettriche	36
4.2.2.5	Ricambi d'aria	37
4.2.2.6	Impianto di climatizzazione	37
4.2.2.7	Outputs del modello TRNBuild	37
4.3	FABBISOGNO TERMICO ED ELETTRICO EDIFICIO	38
4.3.1	<i>Ventilazione</i>	38
4.3.2	<i>Impianto termico</i>	39
4.3.3	<i>Definizione degli output</i>	40
5	ANALISI ENERGETICA DELLO STATO DI FATTO E VALIDAZIONE DEL MODELLO CON STORICO DEI CONSUMI REALI	41
5.1	CONSUMI ENERGETICI: VALUTAZIONE D'ESERCIZIO	41
5.2	VALUTAZIONE ENERGETICA ADATTATA ALL'UTENZA	42
5.3	CALIBRAZIONE DEL MODELLO ENERGETICO	44
5.4	CONSUMI ELETTRICI: VALUTAZIONE D'ESERCIZIO	45
5.5	VALUTAZIONE ELETTRICA ADATTATA ALL'UTENZA	47
5.6	CALIBRAZIONE DEL MODELLO ELETTRICO	48
6	IL CASO STUDIO DI PALAZZO THEODOLI: IDENTIFICAZIONE DEI POSSIBILI INTERVENTI DI RETROFIT	50
6.1	INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI E DEFINIZIONE DEI COSTI DI RETROFIT	50
6.1.1	<i>Interventi di efficientamento termico</i>	50
6.1.2	<i>Interventi di efficientamento elettrico</i>	51
7	ANALISI ENERGETICA ED ECONOMICA DEGLI INTERVENTI DI RETROFIT	54
7.1	SCENARI DI EFFICIENTAMENTO TERMICO	54

7.1.1	<i>Finestratura</i>	54
7.2	SCENARI DI EFFICIENTAMENTO ELETTRICO.....	56
7.2.1	<i>Fotovoltaico</i>	56
7.2.2	<i>Sistema di gestione e controllo</i>	56
7.3	SCENARIO GLOBALE	57
8	ANALISI ECONOMICA	60
	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	66
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	67

1 Sommario

L'obiettivo di questo lavoro è il calcolo dei fabbisogni energetici di un edificio vincolato, conducendo l'analisi energetica tramite un software di simulazione dinamica (TRNSYS), necessario per valutare la effettiva corrispondenza tra i dati energetici stimati e i dati reali provenienti da bollette elettriche e termiche.

Si è dapprima individuato un caso-studio della PA come edificio storico di riferimento nel comune di Roma rappresentativo delle tipologie di edifici vincolati uso uffici e, più in generale, rappresentativo della zona climatica Centro Italia (zona D).

Si è partiti dal reperimento dati riguardanti la struttura dell'edificio, degli impianti per il riscaldamento e per il raffrescamento, procedendo 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 proceduto all'analisi del reale comportamento e del consumo energetico del sistema, costituito dall'insieme dell'involucro edilizio e di tutti gli impianti e dispositivi tecnologici che si trovano al suo interno. È stata conseguentemente eseguita una simulazione energetica che ha consentito di costruire il bilancio in usi finali di energia sia termica che elettrica in regime estivo ed in regime invernale, suddividendo i consumi nelle più significative categorie.

Sono stati quindi confrontati i risultati della simulazione con i dati dei consumi reali provenienti dall'analisi di tre anni di bollette energetiche (elettriche e gas), per valutare l'adeguatezza del modello realizzato tramite la valutazione percentuale degli scostamenti tra dato reale e dato simulato.

I risultati ottenuti sono stati oltremodo soddisfacenti con scostamenti medi intorno al 12% e scostamenti massimi intorno al 20%.

Sulla scorta dei positivi riscontri ottenuti è stato utilizzato il modello per completare la diagnosi energetica ipotizzando interventi tecnici migliorativi (essenzialmente sugli impianti e sull'incremento di produzione di energia da fonte rinnovabile), valutandone non solo la fattibilità tecnica, ma anche e soprattutto quella economica.

The objective of this work was the calculation of the energy requirements of a constrained building, conducting the energy analysis through a dynamic simulation software (TRNSYS), necessary to evaluate the actual correspondence between the estimated energy data and the actual data coming from bills electric and thermal.

It has been first identified a case study representative of the types of buildings bound to use the PA offices as a historic reference building in the municipality of Rome and, more generally, representative of the Central Italy climate zone (zone D).

It has been started by collecting data concerning the building structure, the heating and cooling systems, proceeding with the collection of data relating to the selected building through analysis of the available documentary material, inspections, interviews with the personnel and monitoring of the meters. Then it has been proceeded to the analysis of the real behaviour and energy consumption of the system, consisting of the whole building envelope and all the technological systems and devices that are inside it.

As a result, an energy simulation was carried out which made it possible to construct the budget for end use of both thermal and electric energy in the summer and winter regime, subdividing consumption into the most significant categories.

The results of the simulation were then compared with the real consumption data coming from the analysis of three years of energy bills (electricity and gas), to evaluate the adequacy of the model realized through the percentage evaluation of the deviations between real and simulated data.

The results obtained were extremely satisfactory, with average differences of around 12% and maximum variations of around 20%.

On the basis of the positive results obtained, the model was used to complete the energy diagnosis by hypothesizing technical improvements (mainly on plants and on the increase of energy production from renewable sources), evaluating not only the technical feasibility, but also and above all the economic one.

2 Introduzione

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

Il presente lavoro si inserisce nel Piano Annuale di Realizzazione 2017, 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 "Monitoraggio e misure energetiche degli edifici a elevate prestazioni". Il tema sviluppato nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e CITERA – Centro Interdisciplinare Territorio Edilizia Restauro Ambiente della SAPIENZA Università di Roma riguarda il confronto tra la determinazione dei consumi energetici degli edifici valutati con metodi standard e la misurazione degli stessi con gli effettivi dati di consumi rilevati in campo: oggetto di tali valutazioni sono edifici ad elevate prestazioni per i quali lo scostamento è presumibilmente ancora più rilevante.

È prevista l'individuazione di un caso-studio rappresentativo delle tipologie di edifici vincolati uso uffici della PA sito in fascia climatica D, che, nonostante il vincolo architettonico può essere considerato a pieno titolo un edificio ad elevate prestazioni energetiche.

Lo studio prevede una valutazione "convenzionale" standard (metodo tailored) dei consumi energetici secondo la normativa vigente (UNI TS 11300) che tiene però conto di dati climatici e di carichi interni/esterni misurati. Per le valutazioni durante la stagione di climatizzazione estiva le valutazioni prevedranno l'utilizzo di simulazioni dinamiche.

3 Il caso studio: Palazzo Theodoli

Il palazzo oggetto del caso studio in esame è Palazzo Theodoli. Questo edificio è sito tra via del giardino Theodoli, via del Parlamento e via del Corso, è attualmente sede degli uffici, studi e sale conferenze della Camera dei Deputati. È situato nel centro storico di Roma nel rione Colonna.



Figura 1: Ubicazione Palazzo Theodoli

L'edificio si colloca ad un'altitudine di 20 metri sul livello del mare, ad una latitudine nord di $41^{\circ}54'07.3''$ e una longitudine est di $12^{\circ}28'46.6''$.

Il complesso dell'edificio Theodoli è allo stato attuale il risultato della fusione fra due edifici: Palazzo Bianchelli e Palazzo Theodoli avvenuta nel 1989.

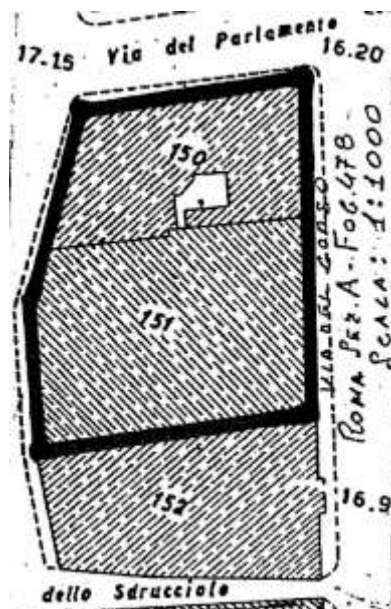


Figura 2: Riferimenti catastali degli edifici Theodoli (Particella 150) e Bianchelli (Particella 151)

Urbanisticamente i due edifici si inseriscono all'interno della città storica Zona Territoriale Omogenea A (ZTO A).

Palazzo Theodoli (particella 150 in Figura 2) è stato inserito nel Piano Regolatore di Roma nel tessuto T3 (tessuti di ristrutturazione urbanistica otto-novecentesca). Tessuti e complessi di edifici caratterizzati da un disegno urbano unitario strutturatosi, nella fase post-unitaria e nel ventennio tra le due guerre, all'interno

delle Mura Aureliane, attraverso sventramenti e demolizioni finalizzati all'apertura di nuove strade e piazze e alla riconfigurazione di spazi pubblici di relazione. I caratteri peculiari sono:

- una regola di disposizione degli edifici caratterizzata da un'edificazione compatta, a fronti continue allineate sulle nuove strade e piazze, con spazi aperti interni, chiostre e cortili, che svolgono una funzione di aerazione e illuminazione;
- una diffusa difficoltà di relazione con i tessuti preesistenti in termini di rapporti morfologici e volumetrici e di qualità degli spazi interposti che ha, nella maggioranza dei casi, alterato la continuità spaziale e funzionale dei percorsi, delle visuali e degli allineamenti storici non definendo sempre gerarchie tecniche, funzionali, simboliche e monumentali tra le diverse componenti adeguate alla complessità e qualità dei contesti storici;
- un'edilizia dai caratteri fortemente caratterizzati e omogenei dal punto di vista tipo morfologico e architettonico;
- una prevalenza di tipi edilizi seriali appartenenti alle famiglie delle case d'affitto post-unitarie.

Palazzo Bianchelli, particella 151, rientra invece nel tessuto di origine medioevale (T1) come definito dalle Norme tecniche del PRG vigente nel comune di Roma. Si tratta di specifiche morfologie d'impianto dei "Tessuti di origine medievale" (T1) della Città Storica condizionati da alcuni grandi edifici speciali antichi sia nell'impianto planimetrico che nelle strutture in elevazione. All'interno dei Tessuti suddetti, caratterizzati anche in altre parti dalla irregolarità e tortuosità della viabilità come esito di lenti e progressivi adattamenti a preesistenti percorsi e tessuti seriali ma anche dalla regolarità geometrica e progettata delle riconfigurazioni rinascimentali, i processi secolari di riutilizzo, scomposizione e ricomposizione delle preesistenti grandi strutture a funzione pubblica di epoca romana è ancora chiaramente leggibile nelle geometrie dispositive degli spazi aperti e degli edifici richiedendo quindi una specifica attenzione, negli interventi di recupero, alla salvaguardia di questo straordinario palinsesto.

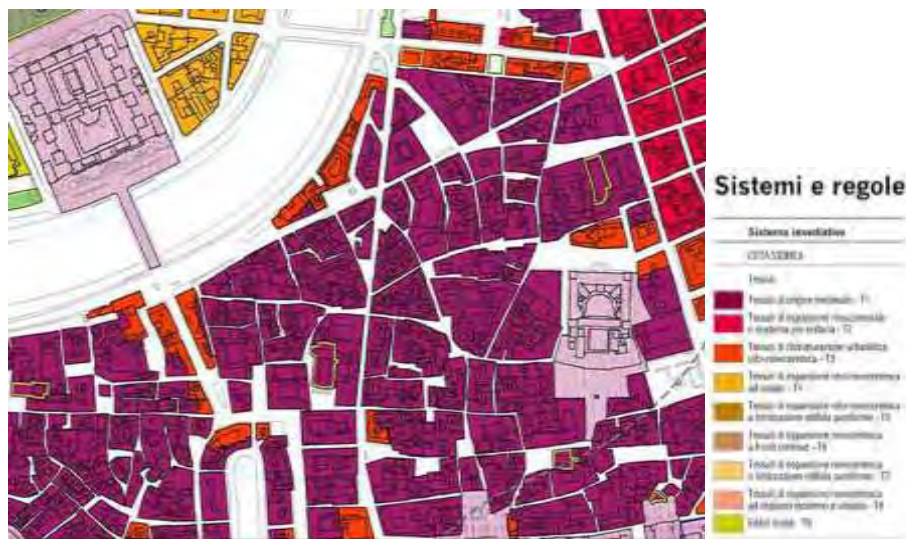


Figura 3: Tessuto urbanistico in cui ricade il Palazzo Theodoli

Ferme restando le norme dei "Tessuti di origine medievale" (T1, art. 22), gli interventi di recupero di cui alle categorie ammesse, nel confermare il disegno della viabilità e dell'edificazione esistente con le specifiche regole, dovranno prestare particolare attenzione alla presenza e alla conservazione dei resti degli edifici speciali antichi sulle cui fondamenta e con le strutture dei quali si è realizzato il processo di edificazione dei secoli successivi, garantendo nel contempo la salvaguardia delle giaciture e delle tessiture murarie che testimoniano tale processo di stratificazione nel tempo.



Figura 4: Vista dell'edificio lato Palazzo Theodoli

3.1 Caratterizzazione del caso studio

L'edificio Theodoli preso in esame ha una consistenza impiantistica molto articolata. Lo stato attuale risente della storia architettonica e di gestione dei due edifici che risultano essere una sola unità in un'ottica edificio-impianti. All'interno dell'edificio sono presenti le seguenti funzioni a servizio del personale e dei deputati della Camera:

- Sale conferenze
- Asilo nido
- Uffici e studi parlamentari
- CED

Questa articolazione di funzioni determina una presenza di impianti tecnologici, quali il condizionamento e l'illuminazione, che è stato necessario inserire in un involucro di pregio in un'area urbanistica (ZTO A) vincolata.





Figura 5: Prospetti Palazzo Theodoli

La sensibilità storico architettonica dell'edificio, ponendolo fra quelli di notevole interesse storico, e quindi soggetto a vincoli di vario tipo, condiziona gli interventi sull'intero sistema edificio-impianto.

Priorità nella manutenzione sia ordinaria che straordinaria dell'edificio Theodoli è quello di intervenire con interventi ben integrati dal punto di vista dell'impatto visivo, garantendo allo stesso tempo l'efficienza energetica.

Gli ambienti climatizzati dell'edificio sono mantenuti a temperatura uniforme attraverso più impianti di climatizzazione e diverse tecnologie, centralizzate e non. Il processo manutentivo degli impianti tecnologici viene condotto in funzione delle aree e degli edifici che negli anni la Camera dei Deputati, e nello specifico dell'edificio di palazzo Theodoli, ha preso in gestione, o in caso di manutenzioni straordinarie. È stato quasi sempre necessario attuare gli interventi manutentivi caso per caso senza una visione d'insieme del complesso.

Nella presente analisi energetica sono stati individuati i principali impianti tecnologici, di climatizzazione ed elettrici, e sono state individuate e definite le zone termiche ad esse asservite: ciascuna zona è stata caratterizzata per superficie e volume in relazione ai piani all'interno degli edifici.

Tabella 1: Definizione delle zone termiche all'interno dell'edificio Theodoli con i colori corrispondenti a quelli delle tavole

Zona termica	Spazi climatizzati
1	Sala lotti
2	Asilo nido
3	Piano Terra
4	Primo piano
5	Secondo piano
6	Terzo piano
7	Quarto piano
8	Corridoi e scale piano terra
9	Corridoi e scale secondo piano
10	Corridoi e scale piano terzo
11	Corridoi e scale piano quarto
12	Corridoi e scale piano quinto
13	CED primo piano
14	Zone non riscaldate

Le zone termiche sopra descritte sono servite da impianti per la climatizzazione come di seguito riportato:

1. Sala lotti
 - a. 10) n. 2 gruppi frigoriferi raffreddati ad aria, marca Aermec modello NRA 350, ciascuno della potenzialità di 74kW, a servizio della UTA "Sala lotti";
 - b. n.1 Pompa di calore espansione diretta Panasonic U-6LE1E8 15 kWf-18 kWt con 4 unità interne.
2. Asilo Nido
 - a. n.1 Pompa di calore espansione diretta Panasonic U-6LE1E8 15 kWf-18 kWt con 4 unità interne.
3. Primo e terzo piano
 - a. UTA "n. 2" di trattamento dell'aria primaria a servizio del 1° e 3° piano dell'edificio, marca Aermec modello NCT11, anno di costruzione 1999, della portata nominale di 12.000 m3/h.
4. Secondo e quarto piano
 - a. UTA "n. 1" di trattamento dell'aria primaria a servizio del 2° e 4° piano dell'edificio, marca Aermec modello NCT11, anno di costruzione 1999, della portata nominale di 12.000 m3/h.
5. Centro Elaborazione Dati (CED)
 - a. 2 x Sanyo SPW C256 VEH8
 - b. 2 x Panasonic u-71pe1e8
 - c. Sanyo CRV2 44EH
 - d. PANASONIC U-12 CPE 1E5A
 - e. SANYO SPW-CR484GVH8B
 - f. PANASONIC U-12 CPE 1E5A
 - g. PANASONIC U-12 CPE 1E5A
 - h. PANASONIC U-71PE1E5
 - i. PANASONIC U-71PE1E5A
 - j. PANASONIC U-125PE1E8A
 - k. PANASONIC U-125PE1E8A
 - l. PANASONIC U-125PE1E8A
 - m. PANASONIC U-71PE1E5A
6. Intero edificio
 - a. n. 3 caldaie per la produzione di acqua calda per usi sanitari e di alimentazione del circuito dei Fan Coil, marca Bongioanni modello Bongas 1/7 I, anno di costruzione 1999, ciascuna della potenzialità di 79.5 kW (Pressione nominale = 5 bar), equipaggiate con bruciatore di tipo atmosferico alimentato a gas metano, anno di costruzione 1999, della potenza di 20 W;
 - b. n. 1 caldaia per la produzione di acqua calda per usi sanitari e di alimentazione del circuito dei fan coil, marca Bongioanni modello Bongas 1/7 I, anno di costruzione 2007, della potenzialità di 79.5 kW (Pressione nominale = 5 bar), equipaggiata con bruciatore di tipo atmosferico alimentato a gas metano, anno di costruzione 2007, della potenza di 20 W;
 - c. n. 4 x 86 kWt Junkers Cerapur (Termico + ACS).



Figura 6: Planimetria del piano terra



Figura 7: Planimetria architettonica primo piano



Figura 8: Planimetria architettonica secondo piano



Figura 9: Planimetria architettonica terzo piano



Figura 10: Planimetria architettonica quarto piano



Figura 11: Planimetria architettonica piano coperture

Il modello del sistema edificio-impianto finale è risultato articolato tramite i volumi analizzati. I dati caratteristici delle superfici e dei volumi sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2: Dati caratteristici

	Superfici (m²)
Piano interrato	550
Piano terra	1808
Piano terra – Ammezzatto Sala lotti	95
Primo piano	1800
Secondo piano	1790
Terzo piano	1770
Quarto piano	1720
Totale	9105

Superficie in pianta netta dei piani	9105 m ²
Volume netto	31550 m ³

3.1.1 Involucro

L'edificio allo stato attuale è la fusione di un edificio risalente al 1600, palazzo Bianchelli e di palazzo Theodoli edificato alla fine del XIX secolo. Le tecniche costruttive di quest'ultimo sono simili al primo. I maschi murari e quelli di spina sono stato realizzati in mattoni "romani" con spessori al piano interrato di 120 cm e rastremati a 90 a piano terra e con ulteriore rastremazione a partire dal terzo piano a 50 cm di spessore.

Gli intonaci esterni sono a base di calce e pozzolana per il fondo e intonaco di finitura a calce. Gli interni nel corso degli interventi di ristrutturazione sono stati quasi tutti realizzati con intonaci a base di calce e cemento. Non sono presenti strati di isolamento né esterno né interno.

Le chiusure opache verticali sono rivestite tutte da intonaco senza isolamento e le chiusure trasparenti di diverse geometrie sono tutte composte da telaio in legno con taglio termico con vetrocamera.

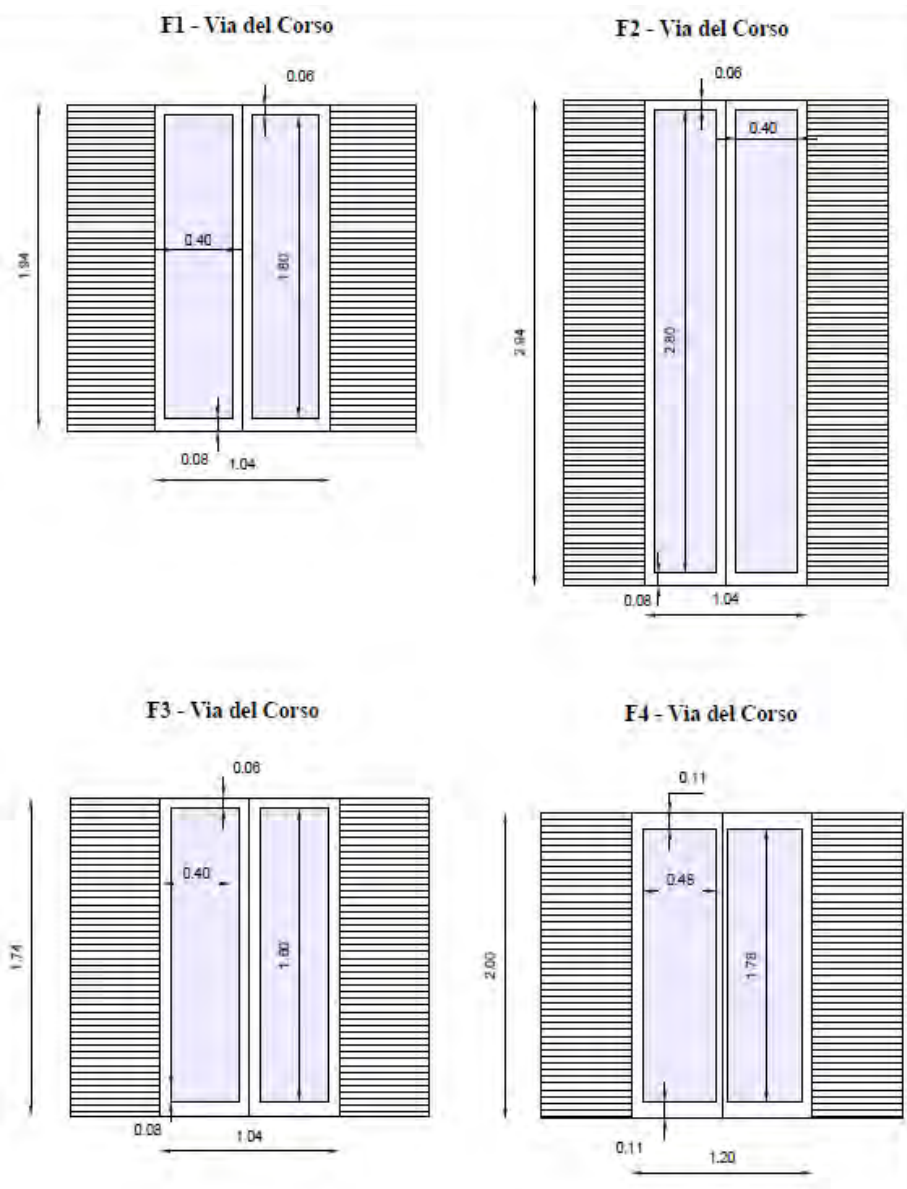


Figura 12: Abaco finestre

Le coperture sono del tipo non isolato termicamente e si differenziano in due tipologie: praticabile con pavimentazione e non praticabile.

Dal punto di vista delle caratteristiche termiche è stato individuato un tipo di parete verticale, in muratura piena non isolata con intercapedine, con spessore totale di circa 40 cm. La trasmittanza termica media della struttura è pari a $1.13 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Dal punto di vista del paramento esterno siamo in presenza di pannelli prefabbricati in calcestruzzo brecciato, con presenza di ricorsi e piccoli aggetti in corrispondenza delle parti finestrate, che sono in un ottimo stato di manutenzione, essendo, per la natura dello stesso materiale costituente l'elemento edilizio, praticamente indistruttibili.

È stato individuato un tipo di solaio inferiore, la cui la trasmittanza è pari a $1.34 \text{ W/m}^2\text{K}$ e si estende per una superficie totale pari a circa 1007 m^2 .

Il solaio di copertura non isolato è costituito da pavimentazione in marmette di cemento. La trasmittanza termica è di $1.50 \text{ W/m}^2\text{K}$

I serramenti presenti sono costituiti da doppio vetro con telaio in legno con taglio termico. Da un'analisi delle caratteristiche di trasmittanza della finestra la tipologia di serramento semplice ha una trasmittanza termica $3.74 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tutte le superfici finestrate classiche hanno schermature solari costituite da persiane.

La superficie totale degli elementi vetrati è di 450 m^2 .

3.1.2 Impianti elettrici

Il Palazzo Theodoli è collegato alla rete elettrica locale di ACEA, con un punto di consegna in Media Tensione a 20000 V.

Al primo piano seminterrato dell'edificio è posizionata la cabina di trasformazione MT/BT. A valle della cabina di trasformazione BT/MT, sono posizionati i quadri generali di bassa tensione. Le varie utenze sono raggruppate in tre linee differenti che garantiscono un diverso livello di sicurezza di alimentazione.

In particolare, è possibile individuare:

- la linea di emergenza: in tale linea sono raggruppate tutte le utenze che necessitano di essere alimentate costantemente. A tale proposito, si segnala che su tale linea sono installati gli UPS;
- la linea privilegiata: tale linea è caratterizzata da una ridondanza dei cavi e degli interruttori tale da garantire continuità di servizio in caso di guasti;
- la linea normale: la continuità di servizio è garantita dai gruppi elettrogeni.

3.1.3 Sistemi di climatizzazione invernale/estiva

Sono stati effettuati più sopralluoghi all'interno degli spazi di Palazzo Theodoli, sia quelli accessibili all'utenza sia quelli tecnici. È stata acquisita la documentazione tecnica, che nei limiti della sicurezza che la funzione dell'edificio richiede è stata fornita dagli uffici amministrativi e tecnici.

È possibile suddividere ciascun impianto di climatizzazione in cinque macro-componenti:

- generazione (termica e frigorifera);
- distribuzione (del fluido termovettore);
- regolazione (di centrale, dei terminali d'utenza);
- emissione (terminali d'utenza);
- accumulo (se presente).

La configurazione impiantistica è abbastanza articolata in quanto spazi con destinazioni e funzioni diverse sono asserviti da soluzioni tecnologiche differenti.

Sono presenti impianti di climatizzazione degli spazi ad uso ufficio del tipo ad Aria Primaria con immissione di aria nei singoli ambienti e riprese nei corridoi per la gestione dei carichi termici latenti. Le porte sono dotate di griglie di transito in quanto gli uffici si trovano in sovrappressione rispetto ai corridoi (Figura 13).



Figura 13: Griglie di transito sulle porte degli uffici climatizzati con impianto ad aria primaria

Nei singoli uffici sono presenti unità a ventilconvettore per la gestione dei carichi termici sensibili. Sono presenti diverse unità per il riscaldamento dell'acqua che alimentano sia le batterie calde delle UTA che i ventilconvettori oltre che a tre accumuli per ACS da 1000 litro cadauno. Sempre in copertura sono posizionati i gruppi frigoriferi e le 4 Unità di Trattamento Aria a servizio della CED, della Sala lotti e l'asilo nido e degli uffici del Palazzo

3.1.3.1 Centrale termica

La centrale termica è posizionata sulla copertura del Palazzo in appositi locali (Figura 14).



Figura 14: Generatori di calore Junkers e Bongioanni

Sono presenti n.5 generatori tradizionali marca BONGIOANNI tipo BONGAS 1/7I potenzialità di 79.5 kW ciascuna alimentate a Gas (3 delle quali installate nel 1999 e le restanti 2 nel 2007) più n. 4 generatori marca Junkers Cerapurda 86 kW caduna.

Si riporta di seguito una tabella con le specifiche dei generatori di calore e le aree servite:

Tabella 3: Dettagli centrale termica

Centrale termica		Q.tà	Pot Unit [kWt]
Intero edificio	n. 3 caldaie per la produzione di acqua calda per usi sanitari e di alimentazione del circuito dei radiatori, marca Bongioanni modello Bongas 1/7 I, anno di costruzione 1999, ciascuna della potenzialità di 79.5 kW (Pressione nominale = 5 bar), equipaggiate con bruciatore di tipo atmosferico alimentato a gas metano, anno di costruzione 1999, della potenza di 20 W;	3	79.5
Intero edificio	n. 1 caldaia per la produzione di acqua calda per usi sanitari e di alimentazione del circuito dei radiatori, marca Bongioanni modello Bongas 1/7 I, anno di costruzione 2007, della potenzialità di 79.5 kW (Pressione nominale = 5 bar), equipaggiata con bruciatore di tipo atmosferico alimentato a gas metano, anno di costruzione 2007, della potenza di 20 W;	2	79.5
Intero edificio	n. 4 x 86 kWt Junkers Cerapur (Termico + ACS)	4	397.5

La centrale termica presenta attualmente un sistema di termoregolazione sufficientemente aggiornato.

La centrale termica è sempre in funzione, in quanto deve garantire la copertura del fabbisogno per la produzione di ACS.

Il riscaldamento degli ambienti avviene secondo gli orari di seguito riportati.

Tabella 4: Orari di funzionamento degli impianti di riscaldamento

Stagione invernale	Condizionamento			Riscaldamento		
	Lun-Ven	Sab.	Dom.	Lun-Ven	Sab.	Dom.
Uffici, corridoi e servizi	8-19	Spento	Spento	8-19	Spento	Spento
Sala lotti	7-17*	Spento	Spento	7-17*	Spento	Spento
Asilo Nido	8-16	Spento	Spento	8-16	Spento	Spento
CED	Sempre acceso			-		

**La climatizzazione nella Sala lotti è attiva solo nei giorni in cui la sala è effettivamente utilizzata*

3.1.3.2 Centrale di condizionamento

Sempre sulla copertura dell'edificio sono posizionate i gruppi frigo e le pompe di calore (Figure 15-18).



Figura 15: UTA



Figura 16: Pompe di calore



Figura 17: Vista dall'alto degli impianti termici



Figura 18: Pompe e le valvole di regolazione della centrale

Si riportano in Tabella 5 le specifiche tecniche delle macchine per il ciclo del freddo.

Tabella 5: Dettagli gruppi frigo

Gruppi Frigo	Modello e marca	Unità	Pot Unit [kWf]
Aria primaria	n. 1 gruppo frigorifero del tipo a pompa di calore, marca EMICON, MODELLO PAH602 ka anno costruzione 2014, ciascuno della potenza frigorifera di 656 kW;	1	656
Aria primaria	n. 1 gruppo frigorifero del tipo a pompa di calore, marca RC-Group serie Glider.HP modello 640.V2.Y3, anno di costruzione 2009, della potenza frigorifera di 640 kW;	1	640
CED	n. 2 gruppi frigoriferi a servizio del CED, marca RC-Group serie Easy modello 160 Q4N8D-FT, anno di costruzione 2008, ciascuno della potenza di 160 kW;	2	160
CED	n. 1 gruppo frigorifero a servizio del CED, marca RC-Group serie Easy modello 160 Q4N8D-FT, anno di costruzione 2011, della potenza di 160 kW;	1	160
Sala lotti PT + nido	n. 2 gruppi frigoriferi raffreddati ad aria, marca Aermec modello NRA 350, ciascuno della potenzialità di 74kW, a servizio della UTA "Punto Camera e nuova portineria";	2	74
	Totale		1924

La termoregolazione della centrale agisce attraverso un'unica lettura centralizzata dai vari circuiti serviti. In particolare, a seguito del decremento della temperatura di ritorno, diminuirà il carico frigorifero erogato dal gruppo.

Gli orari di raffrescamento sono, invece, riportati in Tabella 6.

Tabella 6: Orari di funzionamento degli impianti di raffrescamento

Stagione estiva	Condizionamento		
	Lun-Ven	Sab.	Dom.
Uffici, corridoi e servizi	8-19	Spento	Spento
Sala lotti	7-17*	Spento	Spento
Asilo Nido	8-16	Spento	Spento
CED	Sempre acceso		

**La climatizzazione nella Sala lotti è attiva solo nei giorni in cui la sala è effettivamente utilizzata*

3.1.3.3 Unità Multi a espansione diretta

La flessibilità di uso degli spazi e la necessità di intervenire con soluzioni impiantistiche che necessitano di spazi tecnici ridotti hanno portato l'amministrazione del palazzo a installare sistemi VRV ad espansione diretta. La facilità di montaggio e le ridotte opere edili necessarie rappresentano una soluzione molto semplice che va però a discapito dell'efficienza energetica complessiva del sistema edificio-impianti.

La presenza dei locali CED al primo piano ha richiesto una potenza frigo elevata da garantire h 24 e con funzione di riserva.

Tabella 7: Dati caratteristici VRF
Sistemi VRV ad espansione diretta

		Assorb Elett [kWe]	Pot_tot [kWt]	Pot_tot [kWf]
CED	2 x Sanyo SPW C256 VEH8	7.04	4.28	4.2
	2 x Panasonic u-71pe1e8	9.06	16	14.2
	Sanyo CRV2 44EH	4	8.5	7.1
	PANASONIC U-12 CPE 1E5A	6.4	12.5	14.5
	SANYO SPW-CR484GVH8B	4.25	3.8	3.8
	PANASONIC U-12 CPE 1E5A	6.4	12.5	14.5
	PANASONIC U-12 CPE 1E5A	6.4	12.5	14.5
	PANASONIC U-71PE1E5	4	7.1	8
	PANASONIC U-71PE1E5A	4	7.1	8
	PANASONIC U-125PE1E8A	6.7	12	14
	PANASONIC U-125PE1E8A	6.7	12	14
	PANASONIC U-125PE1E8A	6.7	12	14
	PANASONIC U-71PE1E5A	4	7.1	8
Sala lotti	n.1 Pompa di calore espansione diretta Panasonic U-6LE1E8 15 kWf-18 kWt con 4 unità interne	8	18	15
Totale		99.75	165.66	172.2

Nella figura seguente sono riportate le unità esterne a servizio del CED.



Figura 19: Unità esterne a servizio del CED al primo piano

3.1.3.4 Terminali di utenza

All'interno dell'edificio sono presenti le seguenti tipologie di terminali d'utenza:

- fan-coil a quattro tubi;
- radiatori;
- unità split collegati a unità esterne multi a servizio di alcuni uffici.



Figura 20: installazione tipo dei ventilconvettori negli uffici con sistema di regolazione a lato macchina

Termoregolazione dei corpi emissivi

I terminali di utenza, fan-coil e radiatori sono sprovvisti di sistemi di termoregolazione.

In particolare:

- i fan-coil presentano solamente un sistema di regolazione manuale on/off;
- i radiatori risultano sprovvisti di valvola termostatica.

4 Analisi energetica tramite modellazione numerica

In questa parte sarà descritta l'analisi termo-energetica dell'edificio considerato effettuata tramite simulazione dinamica. La simulazione dinamica del comportamento termico di un edificio è una scelta necessaria per valutare la provenienza dei consumi energetici e per così predisporre le necessarie azioni di risparmio energetico da attuare. I vantaggi che si possono ottenere attraverso un approccio numerico sono: la possibilità della verifica dei consumi dell'edificio; la possibilità di eseguire un'analisi dei risultati sull'audit energetico dell'edificio; effettuare un'analisi degli interventi di efficientamento energetico da mettere in opera.

Simulando dinamicamente il comportamento dell'edificio è possibile verificare la correttezza dei consumi rilevati. In questo modo, confrontando i dati ottenuti con l'audit con i risultati delle simulazioni, è possibile verificare il corretto utilizzo degli impianti energetici prefissandosi come obiettivo di evitare possibili sprechi energetici. Il problema maggiore è che l'audit energetico, da solo, non è in grado di fornire tutte le informazioni necessarie per capire la causa dei consumi. È pertanto necessario utilizzare la simulazione dinamica come strumento di analisi con lo scopo di indagare le cause che generano tali consumi. In questo modo è possibile verificare in tempi rapidi i possibili interventi di miglioramento da applicare.

4.1 Il software TRNSYS

Per la simulazione dinamica di Palazzo Theodoli è stato utilizzato il software TRNSYS, acronimo di "TRaNsient SYstem Simulation program", versione 18 [1]. Il codice è stato sviluppato dal "Solar Energy Laboratory" dell'università di Wisconsin–Madison e attualmente è uno tra i software più utilizzati per lo studio di sistemi dinamici nel campo energetico. Il suo utilizzo spazia dallo studio di impianti termici ed elettrici alimentati con fonti tradizionali e/o rinnovabili all'analisi d'impianti HVAC fino alla caratterizzazione dell'intero comportamento energetico degli edifici.

Il nucleo del programma è il "Simulation Studio", un ambiente di lavoro composto da elementi, chiamati "Type", che descrivono il problema fisico oggetto della simulazione. Il modello generale che si vuole simulare sarà quindi composto da un insieme di Type interconnesse tra loro in modo da formare un diagramma a blocchi che racchiude tutte le relazioni tra i vari elementi essenziali del sistema. Simulation Studio è il nucleo principale del programma, dove avviene l'effettivo funzionamento del codice. In questa parte si devono scegliere i parametri di controllo: tempo di simulazione, tipologia di solutore numerico, passo di discretizzazione temporale, etc.

Ogni Type è descritto da un modello matematico, scritto in FORTRAN77, che attraverso una finestra grafica di gestione permette di trattare ogni elemento come una scatola chiusa; l'operatore definirà i parametri e le grandezze di Input e Output necessarie per garantirne il corretto funzionamento della simulazione. TRNSYS possiede una vasta libreria di Type che permettono di simulare un'innumerabile casistica di fenomeni fisici dinamici che si possono avere nella realtà di tutti i giorni.

4.1.1 Dati di input

La fase preliminare del lavoro prevede il reperimento di tutti quei dati che consentiranno la corretta definizione geometrica e termofisica delle strutture componenti l'edificio da studiare. Sono inoltre necessari i dati climatici della località in cui l'edificio è situato. Sono principalmente necessarie le planimetrie dell'edificio, caratteristiche termofisiche delle strutture e i dati climatici, per poter impostare la simulazione.

Attraverso i sopralluoghi, l'analisi delle planimetrie e dei dati forniti dal personale dell'ufficio tecnico, è stato possibile reperire informazioni sulle dimensioni degli ambienti (lunghezza, larghezza, altezza, confini con altri ambienti, destinazioni d'uso, etc.), sulla tipologia e caratteristiche delle strutture opache e trasparenti, sulla stratigrafia dei muri, sull'occupazione giornaliera di ogni singola zona termica.

Poiché la simulazione dinamica di Palazzo Theodoli è effettuata su base oraria, è necessario avere a disposizione i dati climatici delle località di riferimento con dettaglio orario. Si è deciso, perciò, di utilizzare come primo approccio il software METEONORM [2] che consente di ottenere i dati meteorologici orari di qualunque località terrestre, per poi integrare con dati puntuali. I dati climatici utilizzati nella simulazione in TRNSYS sono: irradiazione diretta e diffusa su superficie orizzontale; temperatura di bulbo secco; umidità relativa; velocità del vento.

La località in cui è situato l'edificio è la città di Roma (Latitudine: 41.902°; Longitudine: 12.48°; Altezza sul livello del mare: 34 m).

Tabella 8: Dati climatici medi mensili di Roma

Mese	T ambiente medie mensile [°C]
Gennaio	7.6
Febbraio	8.8
Marzo	11.9
Aprile	14.9
Maggio	19.7
Giugno	23.8
Luglio	26.5
Agosto	26.5
Settembre	21.9
Ottobre	17.9
Novembre	12.7
Dicembre	8.7
Anno	16.7

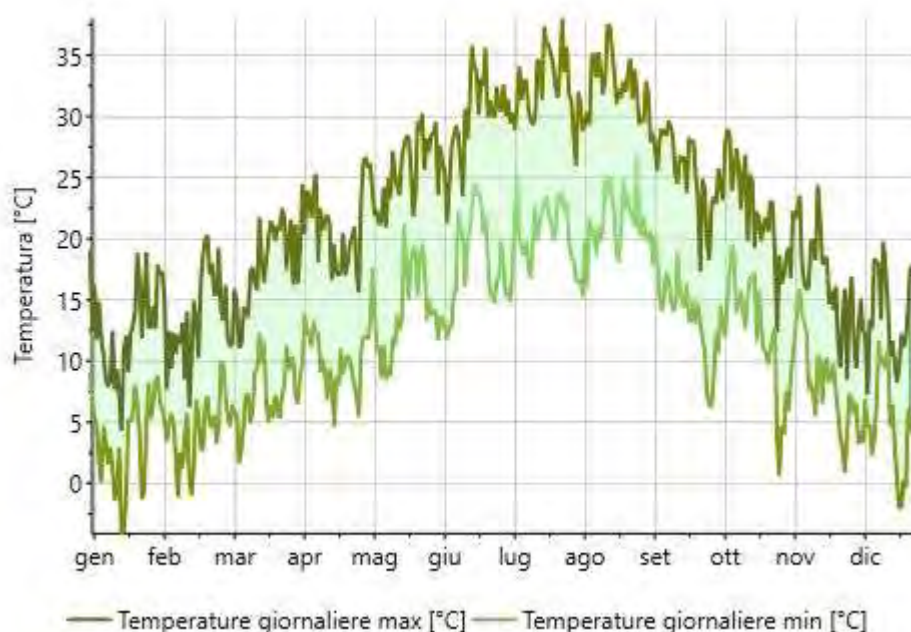


Figura 21: Andamento temperatura minima e massima di Roma

4.1.2 Le zone termiche

TRNSYS modella l'edificio dividendolo in zone termiche, cioè un ambiente che ha in comune con altri ambienti i valori delle grandezze termoigrometriche. Per questo motivo occorre stabilire a priori una strategia che consenta di identificare in maniera univoca la categoria di utilizzo di ogni ambiente

costituente l'edificio Theodoli, osservando le prescrizioni normative [3] e semplificando, ove possibile, con lo scopo di ottenere un compromesso tra l'accuratezza e la complessità del modello e i tempi di calcolo. Questi sono ovviamente strettamente dipendenti dal numero di zone termiche da simulare.

Le grandezze termoigrometriche che caratterizzano le varie tipologie di zone termiche sono, come da prescrizioni del D.P.R. 14/01/97 [4]:

- Temperatura minima della zona [°C]
- Temperatura massima della zona [°C]
- Umidità relativa minima [%]
- Umidità relativa massima [%]
- Ventilazione (ricambi d'aria) [vol/h]

Dalle planimetrie dell'edificio è possibile stabilire la destinazione d'uso dei vari locali. Applicando le prescrizioni del D.P.R. 14/01/97 [4], sono state individuate circa 5 diverse tipologie di zone termiche (CED, Sala lotti, Asilo Nido, Ufficio, Corridoio e servizi), caratterizzate ognuna da valori dei parametri termoigrometrici, che sono poi state ripetute per i vari piani arrivando ad un totale di zone termiche simulate uguale a 13. Nell'individuare le zone termiche sono state compiute delle semplificazioni che hanno permesso di limitare la tipologia e il numero di zone entro una quantità tale da soddisfare le potenzialità dei computer a disposizione.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 22: Zone termiche per piano: a) terra; b) primo; c) secondo; d) terzo; e) quarto. In celeste è indicata la zona termica Sala lotti, in verde scuro l'asilo nido, in verde chiaro corridoi e servizi, in rosso gli uffici ed in blu il CED.

In Figura 23 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.

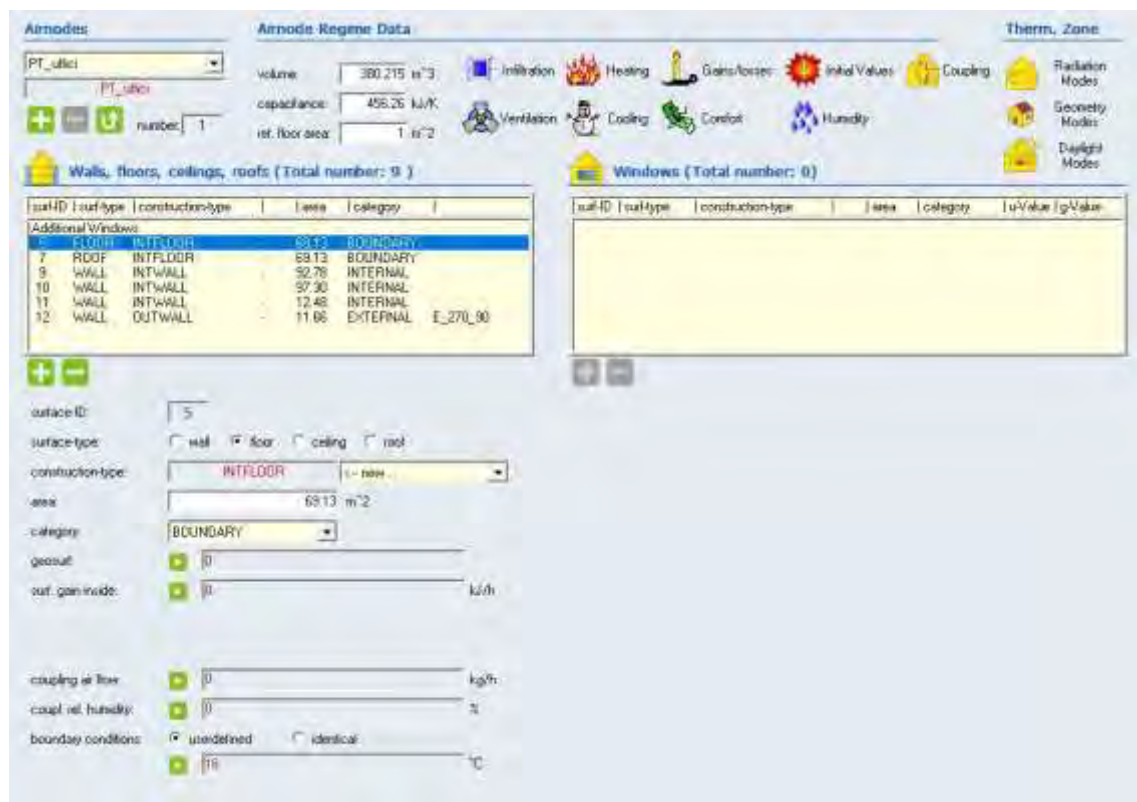


Figura 23: Interfaccia TRNSYS per la definizione dei parametri di zona

Per quanto riguarda il calore sensibile, il valore impostato è pari a 8 W/m² suddiviso in 50% parte convettiva e 50% parte radiativa. L'apporto di calore latente è stato stimato pari a 7.7 W/m², valore ricavato dalla normativa UNI-TS 11300 [5].

4.2 Implementazione del modello

In questo paragrafo verranno specificati e dettagliati tutti i passaggi necessari per inserire nel codice tutte le informazioni descritte in precedenza.

Nella prima parte verrà illustrato lo sviluppo del modello su Simulation Studio, per poi affrontare la modellazione su TRNBuild.

4.2.1 Simulation Studio

Il modello Trnsys (Figura 24) è composto da una serie di Type con cui si può modellare l'edificio, gestire i dati di input, eseguire il controllo degli elementi presenti nell'edificio e gestire i risultati delle simulazioni. Le Type a loro volta sono raccolte in Macro, per rendere il modello più leggibile.

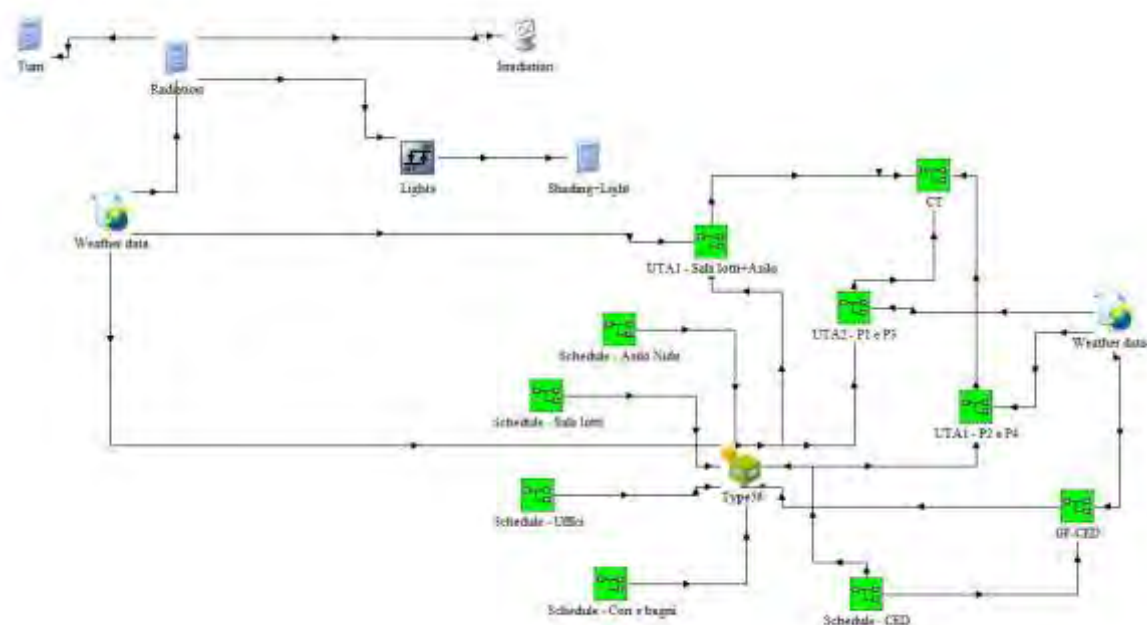


Figura 24: Schermata generale "Simulation Studio"

4.2.1.1 Dati climatici

La Macro dei dati climatici contiene i seguenti elementi: Type 15.6; Type 65d e blocco equazioni. Al Type 15.6 è assegnato il compito di leggere il file di dati meteo e calcolare le varie componenti (diretta, diffusa e riflessa) di irradiazione per le superfici comunque inclinate e orientate che compongono la struttura. Il calcolo dell'irradiazione incidente sulle superfici comunque inclinate e orientate è effettuato considerando un'albedo fissa di 0.2 e il modello di cielo anisotropo di Perez [1]

4.2.1.2 Shading

TRNSYS non calcola automaticamente l'ombreggiatura degli edifici. Le pareti dell'edificio in cui sono proiettate delle ombre devono avere come dati in ingresso dei valori d'irradiazione concordi con i periodi in cui tale parete non è esposta al sole. Per tener conto di questo aspetto si è fatto uso della Type 68 e della procedura seguente: si è diviso il perimetro dell'edificio in diverse superfici verticali, tante quante sono quelle dell'edificio considerato e per ogni parete è stato assegnato un solo valore di ombreggiamento; la porzione di cielo è stata divisa in 16 settori equi distanziati di 22.5° sessagesimali e ad ogni parete è stato assegnato di un sistema di riferimento polare con origine nella mezzogiorno della parete; è stata calcolata l'ostruzione verticale causata dal fenomeno dell'ombreggiamento. Questa procedura è stata ripetuta per ogni singola parete per tutti i piani

4.2.1.3 Controllo

È stato necessario predisporre diversi sistemi di controllo e gestione della simulazione, per garantire il corretto funzionamento del modello. I sistemi di controllo utilizzati agiscono sui dati climatici in ingresso all'edificio e sull'impianto di riscaldamento e raffrescamento. Il controllo dell'impianto prevede la possibilità di disattivare/attivare il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione all'interno dell'edificio, etc. In particolare, per gestire gli impianti ridondanti (CED) è stata settata una diversa temperatura di controllo in modo tale da far attivare gli split singoli solo nel caso in cui l'impianto VRV non si in grado di mantenere la temperatura nei limiti preposti.

4.2.1.4 Forzanti

Questa macro è utilizzata per imporre le condizioni al contorno presenti nelle zone di separazione delle varie zone. Queste condizioni sono assegnate imponendo i valori di temperatura delle zone confinanti,

ipotizzando che esse si trovino esattamente nei valori minimi e massimi, rispettivamente per il periodo invernale (1 Novembre – 15 Aprile) ed estivo (16 Aprile – 31 Ottobre) del loro range assegnato nella fase di definizione delle zone termiche.

4.2.2 TRNBUILD

Utilizzando TRNBUILD è possibile modellare il comportamento termico dell'edificio. Il primo passaggio consiste nel definire tutte le grandezze d'input che dal "Simulation Studio" devono pervenire al Type 56. Queste grandezze sono: i dati meteorologici (temperatura ambiente [°C]; umidità relativa [%]; temperatura del cielo [°C]; irradiazione diretta e totale [$\text{kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]); angolo di incidenza della radiazione diretta su tutte le superfici verticali che compongono la struttura dell'edificio; le temperature delle zone adiacenti a quelle simulate che non compaiono nel modello; i parametri utilizzati per controllare l'accensione, lo spegnimento, la regolazione degli impianti (assumono valore 1 se l'impianto è acceso e 0 se l'impianto è spento).

4.2.2.1 Definizione caratteristiche strutture

Tramite il "Layer Type Manager" presente in TRNBUILD vengono ora impostate le caratteristiche termofisiche dei materiali che compongono le stratigrafie delle superfici opache dell'edificio. Per ogni strato occorre definire la tipologia, scegliendo se si tratta di un elemento massivo o meno, fornendo per ogni materiale la conduttività termica [$\text{kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}\cdot\text{K})$], la capacità termica [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], la densità [kg/m^3] e dove necessario il valore della resistenza termica [$(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{kJ}$].

Successivamente, utilizzando il "Wall Type Manager", si passa all'unione dei vari strati per costruire le pareti opache. Per ogni superficie occorre definire la sequenza stratigrafica con i relativi spessori, l'assorbimento solare interna ed esterna, i coefficienti di scambio termico convettivi e il coefficiente di scambio termico. I valori dei coefficienti utilizzati sono i seguenti:

- Strutture opache verticali: $1.13 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$;
- Solaio interpiano: $1.37 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$;
- Solaio di copertura: $1.50 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$;
- Pavimento verso terra: $1.08 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$;
- Finestre: $3.74 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

La costruzione delle strutture trasparenti avviene scegliendo nel software le tipologie di vetro e d'infilso le cui caratteristiche più si avvicinano a quelle individuate in fase di rilievo. Per ogni tipologia di superficie opaca sono stati impostati i valori dei coefficienti di scambio termico convettivo pari a $11 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ per l'interno e $64 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K})$ per l'esterno.

4.2.2.2 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 e macchinari che in esercizio raggiungono temperature superiori a quella ambiente.

Altro aspetto importante riguarda la possibilità di inserire i carichi interni di una zona termica all'interno del software, attraverso l'interfaccia "Gains".

Per i valori di riferimento per l'edificio Theodoli sono stati impostati mediamente i seguenti valori [5], [6]:

- Densità di potenza dovuta alle persone: $150 \text{ W}/\text{persona}$;
- Densità di potenza dovuta all'illuminazione: $10 \text{ W}/\text{m}^2$;
- Densità di potenza dovuta alle apparecchiature elettroniche: $3.2 \text{ W}/\text{m}^2$.

4.2.2.3 Occupancy

Per definire gli apporti termici derivanti dalla presenza umana all'interno dell'ambiente è stato necessario definire due parametri: il tipo di attività svolta dalle persone ed il numero di persone presenti all'interno.

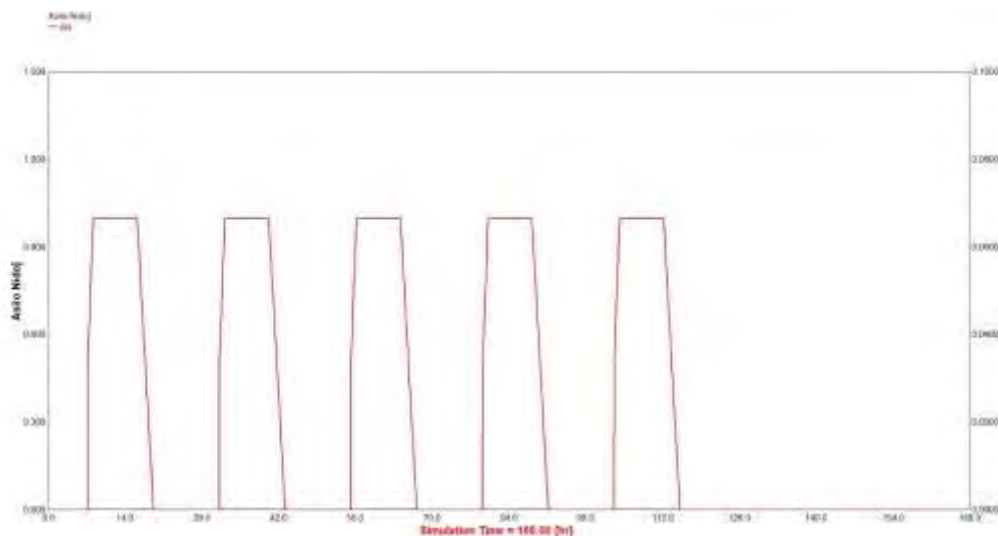
In questo lavoro la potenza termica prodotta dal corpo umano in funzione del tipo di attività svolta è stata considerata, in funzione della tabella proposta dalla ISO 7730 denominata "Rates of Heat Gain from Occupants of Conditioned Spaces" [7].

Per l'edificio Theodoli è stato impostato un valore della densità di potenza dovuta alle persone pari a 150 W/persona [6].

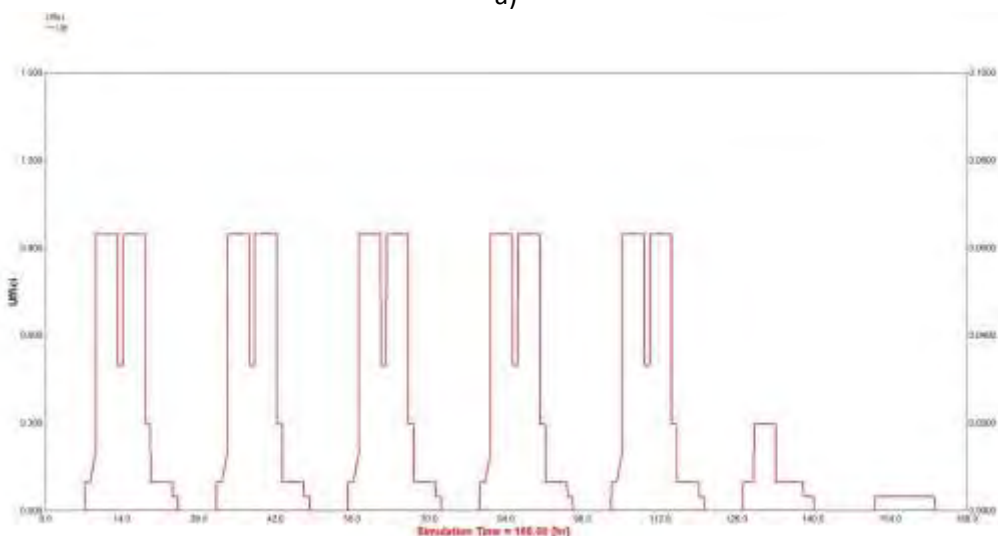
Le attività svolte all'interno dell'edificio sono:

- "Seated, light work, typing" nei luoghi di lavoro (uffici, sala congressi) 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 Figura 25:



a)



b)

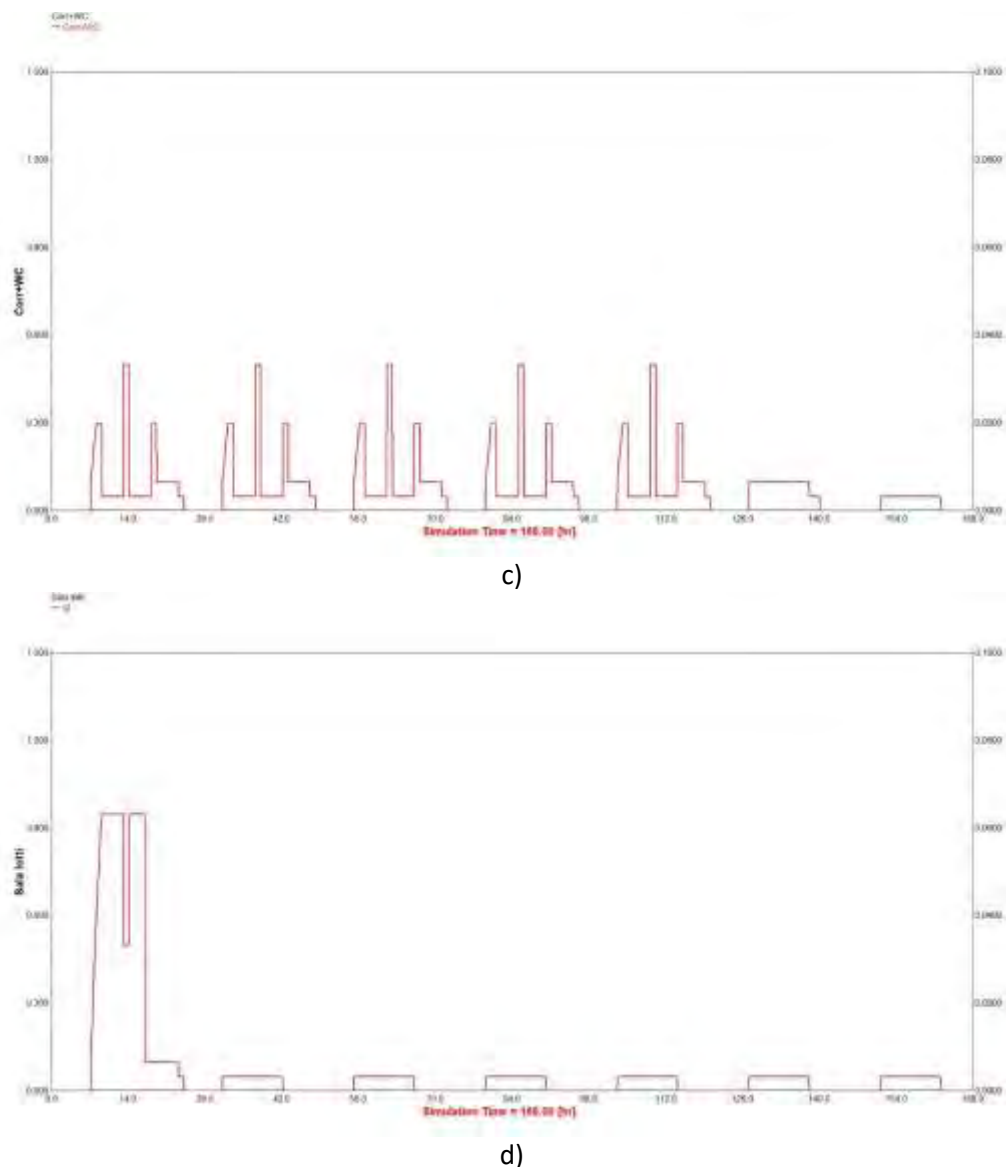


Figura 25: Schedule occupancy dell'asilo (a), degli uffici (b), dei corridoi e servizi (c) e della Sala Iotti (d).

4.2.2.4 Illuminazione ed apparecchiature elettriche

Per determinare la quota parte di carichi dovuti all'illuminazione è stato moltiplicato il valore di densità di potenza installata (W/m^2) per l'estensione della superficie. 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 Theodoli 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 sotto forma di radiazione verso le superfici circostanti. Il restante 50% viene dissipato per conduzione e per convezione" [6].

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

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

- Densità di potenza dovuta all'illuminazione: 10 W/m^2 ;

- Densità di potenza dovuta alle apparecchiature elettroniche: 3.2 W/m^2 .

4.2.2.5 Ricambi d'aria

Nella singola zona termica è possibile impostare la frequenza di apertura delle finestre. Non essendo a conoscenza di tale dato, data la carenza di sistemi di controllo e registro di tali eventi, è stata scelta in modo autonomo al fine di garantire un'apertura razionale che permettesse di non aggravare il bilancio termico all'interno del locale.

Il valor medio di portata d'aria di ricambio all'interno del singolo locale è stato impostato pari a $11 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.2.2.6 Impianto di climatizzazione

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

Tramite la schermata principale è possibile:

- Impostare il valore di temperatura sopra (Cooling) o sotto (Heating) 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) del quale 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 10 sono riportati gli input al modello di Trnsys Build relativi all'impianto di climatizzazione:

Tabella 9: Input Modello TRNBuild

Input
Temperatura di set point del riscaldamento: $20 \text{ }^\circ\text{C}$
Percentuale di umidità relativa in ambiente prima di cominciare ad umidificare: 38%
Temperatura di setpoint del raffreddamento: $26 \text{ }^\circ\text{C}$
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

4.2.2.7 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.

Gli output relativi alla singola zona termica e validi per tutte le zone termiche sono:

- Temperatura dell'aria all'interno della zona termica;
- la potenza termica sensibile fornita dal sistema di riscaldamento;
- la potenza termica sensibile fornita dal sistema di raffreddamento;
- 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;
- la potenza elettrica dovuta ai carichi interni (illuminazione e apparecchiature).

4.3 Fabbisogno termico ed elettrico edificio

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 suddividere il "Fabbisogno termico ed elettrico edificio" in tre macro aree: area comprendente i dati di input per il modello del TRNBuild; area costituita dal modello sviluppato sul Trnsys Build; area comprendente gli output dell'edificio e ottenuti tramite la simulazione.

I dati climatici inseriti nel modello sono relativi a Ciampino, in quanto rappresenta la località (tra le disponibili) geograficamente più vicina alla sede di Theodoli. 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.

Come specificato precedentemente, l'impianto di climatizzazione di Palazzo Theodoli è di tipo "misto" e a tutt'aria (Sala lotti e Asilo nido), composto da 3 UTA e 1 VRV dimensionate per garantire la qualità dell'aria all'interno dei locali condizionati e fan coils per il controllo della temperatura all'interno dell'ambiente e per assolvere ad entrambi i ruoli nella Sala lotti e nell'asilo nido.

4.3.1 Ventilazione

L'azione svolta dalle 3 UTA e 1 VRV presenti nell'edificio è stata implementata impostando le portate d'aria immesse in ambiente. La portata d'aria è stata ipotizzata costante nel periodo di funzionamento in quanto attualmente l'impianto non è provvisto di sistemi di regolazione della portata. Gli input forniti al TRNBuild impostati nel modello TRNSYS Simulation Studio sono i seguenti:

- Portata d'aria ventilante delle singole zone termiche [m^3/h];
- Temperatura dell'aria immessa in ambiente [$^{\circ}\text{C}$].

Sono stati implementati due input distinti di portata d'aria in funzione del tipo di organo di distribuzione presente all'interno dell'ambiente:

- Bocchette di mandata UTA= 250 [m^3/h];
- Diffusori = 150 [m^3/h].

Tali valori di input vengono successivamente elaborati dal modello TRNBuild che li moltiplica per il numero di bocchette di mandata e diffusori presenti nella singola zona termica (normalizzandoli in funzione della volumetria della zona termica) ottenendo così il corretto valore di portata d'aria immessa. In Figura 26 è riportato l'interfaccia di TRNBuild che permette di impostare i valori di portata immessa.

Figura 26: Ventilation Type Manager da TRNBuild

4.3.2 Impianto termico

Come precedentemente esposto, il controllo della temperatura all'interno degli ambienti è affidato ai Fan coils ed in minor modo ai radiatori presenti esclusivamente nei locali sanitari. I Fan Coils sono stati simulati utilizzando il Type 91 presente nella libreria TRNSYS 18.

Ogni Fan Coil implementato all'interno dell'edificio è stato messo in comunicazione con l'ambiente da climatizzare.

In Figura 27 è rappresentato in maniera schematica il funzionamento del modello implementato. Il Fan Coil riceve in input il valore della temperatura della zona termica da climatizzare ed avendo impostato un valore di temperatura dell'acqua in ingresso fisso (70 °C in inverno e 15 °C in estate) in funzione del salto di temperatura esistente genera un output di energia termica fornita alla zona termica che viene letto come input dalla Type 56.

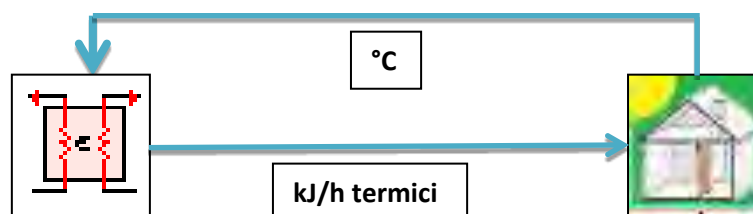


Figura 27: Schema logico di funzionamento del modello

Per semplicità di calcolo e data la carenza di informazioni in merito all'impianto di distribuzione dell'energia termica (connessioni, tubazioni, diramazioni, etc.) è stato ipotizzato un rendimento di distribuzione per il sistema idronico e aeraulico pari a quello riportato sulla norma UNI TS 11300. Il flusso termico erogato quindi dalle pompe di calore e dai VRV è stato calcolato moltiplicando il flusso termico (frigorifero) fornito alle zone termiche per 0.83 per distribuzione aeraulica e 0.81 per distribuzione idronica.

4.3.3 Definizione degli output

Il modello di Trnsys Simulation Studio legge i dati di input precedentemente descritti e 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 e output elettrici.

Gli output termici forniscono informazioni riguardanti la temperatura all'interno delle singole zone termiche, l'andamento orario della potenza termica fornita, 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.

Gli output ambientali riportano il quantitativo di CO₂ prodotto dall'impianto di condizionamento. I dati sono stati ottenuti andando a sommare l'anidride 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:

$$E_{\text{primaria}} = v_{\text{metano}} \cdot H_i = \frac{E_{\text{risc}}}{\eta} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{anno}} \right] \quad (1)$$

Dall'energia primaria è stato ottenuto il volume annuo di metano bruciato ipotizzando un potere calorifico inferiore (Hi) di 35 MJ/m³ [3]. 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:

$$(1 \text{ kg}) \text{ CH}_4 + (17.4 \text{ kg}) \text{ aria} = (2.75 \text{ kg}) \text{ CO}_2 + (2.25 \text{ kg}) \text{ H}_2\text{O} + (13.4 \text{ kg}) \text{ N}_2 \quad (2)$$

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

L'obiettivo di questo paragrafo è quello di dimostrare la corretta convergenza dei risultati delle simulazioni dinamiche con i dati reali derivanti da bollette acquisite.

Si sono quindi effettuate analisi dinamiche con Trnsys per gli anni 2015, 2016 e 2017, sia per la parte di consumo elettrico, sia per la parte relativa al fabbisogno di gas. Effettuata una comparazione con i dati derivanti da bollette, si è infine calcolato l'errore percentuale tra i risultati simulati e quelli reali.

5.1 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 2015, 2016 e 2017 i cui valori sono riportati con cadenza mensile in Tabella 10 e illustrati graficamente in Figura 28.

Tabella 10: Consumi energetici mensili per riscaldamento

Consumi energetici [m ³]			
MESE	Stagione		
	2015	2016	2017
GENNAIO	6850	6869	7252
FEBBRAIO	6809	6390	6629
MARZO	6218	5454	4863
APRILE	2287	1514	2029
MAGGIO	214	297	249
GIUGNO	86	240	28
LUGLIO	9	232	19
AGOSTO	9	61	150
SETTEMBRE	9	16	11
OTTOBRE	1195	1311	1509
NOVEMBRE	4298	5041	5152
DICEMBRE	7294	7254	7330
ANNUALE	35278	34679	35221

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.

Tabella 11: Temperatura giornaliera media mensile dell'aria esterna

Stagione	Temperatura aria [°C]											
	Mese											
	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Set.	Ott.	Nov.	Dic.
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
2017	6.9	12.1	14.9	17.1	22.8	28.2	29.9	31.1	22.5	16.8	11.7	8.0

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).

Tabella 12: Gradi giorno per periodo di riscaldamento

Stagione	Gradi giorno [°C d]
2015	1140
2016	1071
2017	1415

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 2015, 2016 e 2017. I dati relativi ai consumi mensili sono stati relazionati ai gradi giorno di riscaldamento per la città di Roma relativi ai tre anni considerati.

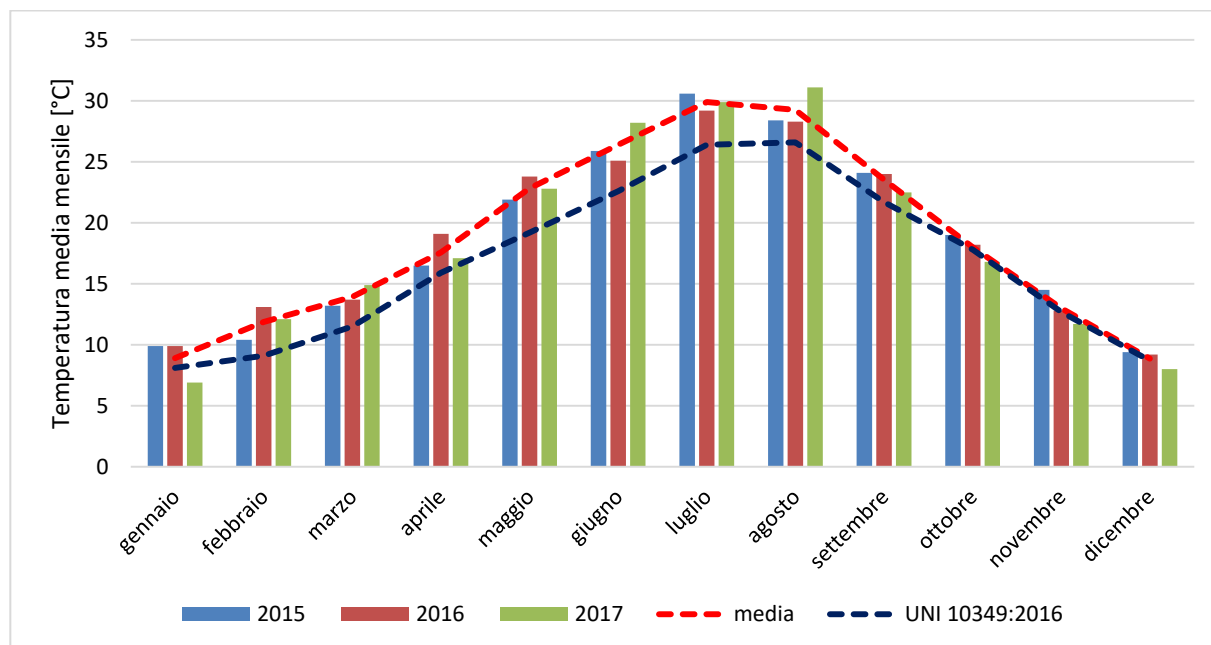


Figura 28: Valutazione d'esercizio stagione per le tre stagioni considerate

5.2 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 29, distinti in parte dovuta al riscaldamento e parte relativa a ACS:

Tabella 13: Consumi energetici mensili

MESE	Consumi energetici [m ³]								
	Stagione								
	2015			2016			2017		
	Riscald.	ACS	Totale	Riscald.	ACS	Totale	Riscald.	ACS	Totale
GENNAIO	7444.4	658.2	8102.6	5718.9	494.1	6213.1	5650.1	486.2	6136.4
FEBBRAIO	5715.5	359.5	6075.0	4934.7	302.0	5236.7	5454.3	353.8	5808.1
MARZO	6492.3	744.5	7236.8	5667.9	633.2	6301.1	3959.4	449.2	4408.6
APRILE	1940.8	588.1	2529.0	954.1	295.2	1249.3	1711.5	524.8	2236.3
MAGGIO	137.9	54.5	192.4	245.6	93.4	339.0	155.5	61.6	217.0
GIUGNO	45.4	22.8	68.2	174.6	86.2	260.8	20.4	10.2	30.6
LUGLIO	5.9	2.2	8.0	142.7	61.7	204.5	15.5	5.9	21.5
AGOSTO	6.6	1.6	8.1	54.9	13.0	67.9	103.2	25.2	128.4
SETTEMBRE	1.2	0.5	1.7	10.3	4.1	14.4	7.0	2.8	9.8
OTTOBRE	1041.3	264.7	1306.0	874.3	215.7	1089.9	1326.8	336.6	1663.4
NOVEMBRE	3521.2	327.1	3848.4	4210.3	393.2	4603.5	5155.1	484.6	5639.7
DICEMBRE	6321.3	522.6	6843.9	7387.1	607.9	7995.0	7587.7	647.9	8235.6
ANNUALE	32673.7	3546.3	36220.1	30375.4	3199.8	33575.2	31146.4	3388.9	34535.3

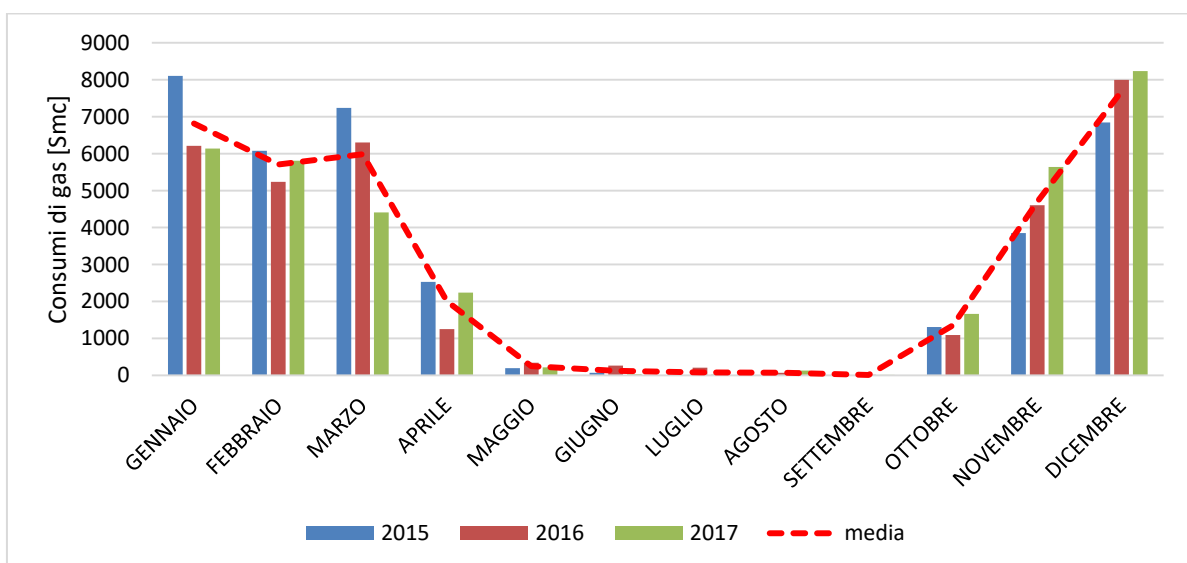


Figura 29: Valutazione adattata all'utenza per le tre stagioni considerate

5.3 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:

Tabella 14: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2015

Confronto			
MESE	Stagione 2015		
	Valutazione d'esercizio [m ³]	Valutazione Adattata all'utenza [m ³]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	6850	8102.6	-18.3
FEBBRAIO	6809	6075.0	10.8
MARZO	6218	7236.8	-16.4
APRILE	2287	2529.0	-10.6
MAGGIO	214	192.4	10.1
GIUGNO	86	68.2	20.7
LUGLIO	9	8.0	10.7
AGOSTO	9	8.1	9.8
SETTEMBRE	9	1.7	81.1
OTTOBRE	1195	1306.0	-9.3
NOVEMBRE	4298	3848.4	10.5
DICEMBRE	7294	6843.9	6.2
ANNUALE	35278	36220.1	-2.7

Tabella 15: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2016

Confronto			
MESE	Stagione 2016		
	Valutazione d'esercizio [m ³]	Valutazione Adattata all'utenza [m ³]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	6869	6213.1	9.55
FEBBRAIO	6390	5236.7	18.05
MARZO	5454	6301.1	-15.53
APRILE	1514	1249.3	17.48
MAGGIO	297	339.0	-14.14
GIUGNO	240	260.8	-8.65
LUGLIO	232	204.5	11.87
AGOSTO	61	67.9	-11.32
SETTEMBRE	16	14.4	9.77
OTTOBRE	1311	1089.9	16.86
NOVEMBRE	5041	4603.5	8.68
DICEMBRE	7254	7995.0	-10.22
ANNUALE	34679	33575.2	3.2

Tabella 16: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2017

Confronto			
MESE	Stagione 2017		
	Valutazione d'esercizio [m ³]	Valutazione Adattata all'utenza [m ³]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	7252	6136,4	15.38
FEBBRAIO	6629	5808,1	12.38
MARZO	4863	4408,6	9.35
APRILE	2029	2236,3	-10.22
MAGGIO	249	217,0	12.83
GIUGNO	28	30,6	-9.17
LUGLIO	19	21,5	-13.12
AGOSTO	150	128,4	14.38
SETTEMBRE	11	9,8	10.87
OTTOBRE	1509	1663,4	-10.23
NOVEMBRE	5152	5639,7	-9.47
DICEMBRE	7330	8235,6	-12.35
ANNUALE	35221	34535,3	1.9

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 fra i risultati ottenuti dalle due valutazioni si attesta su di un valore medio del 12% in tutte e tre le annualità. Tutte le stagioni presentano inoltre un valore massimo di discostamento compreso tra il 17% e 20%, ma solo in singoli mesi dell'anno. Quindi si può affermare che per il comparto consumi energetici, il modello di edificio modellato tramite Trnsys, risulta rappresentativo del suo comportamento reale.

5.4 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 e altri carichi vari.

Per tali consumi si hanno a disposizione le bollette del comparto elettrico per le annualità 2015, 2016 e 2017 i cui valori sono riportati con cadenza mensile in Tabella 17 e illustrati graficamente in Figura 30.

Tabella 17: Consumi elettrici mensili

Consumi elettrici [MWh]			
MESE	Stagione		
	2015	2016	2017
GENNAIO	191.5	184.2	220.1
FEBBRAIO	175.5	176.6	182.4
MARZO	186.4	187.2	187.0
APRILE	181.8	201.7	196.8
MAGGIO	202.1	210.0	203.1
GIUGNO	183.4	186.3	221.7
LUGLIO	166.0	161.5	163.8
AGOSTO	187.2	174.6	204.8
SETTEMBRE	201.5	182.2	179.4
OTTOBRE	210.8	200.9	205.1
NOVEMBRE	184.7	160.6	158.5
DICEMBRE	185.9	189.8	186.8
ANNUALE	191.5	184.2	220.1

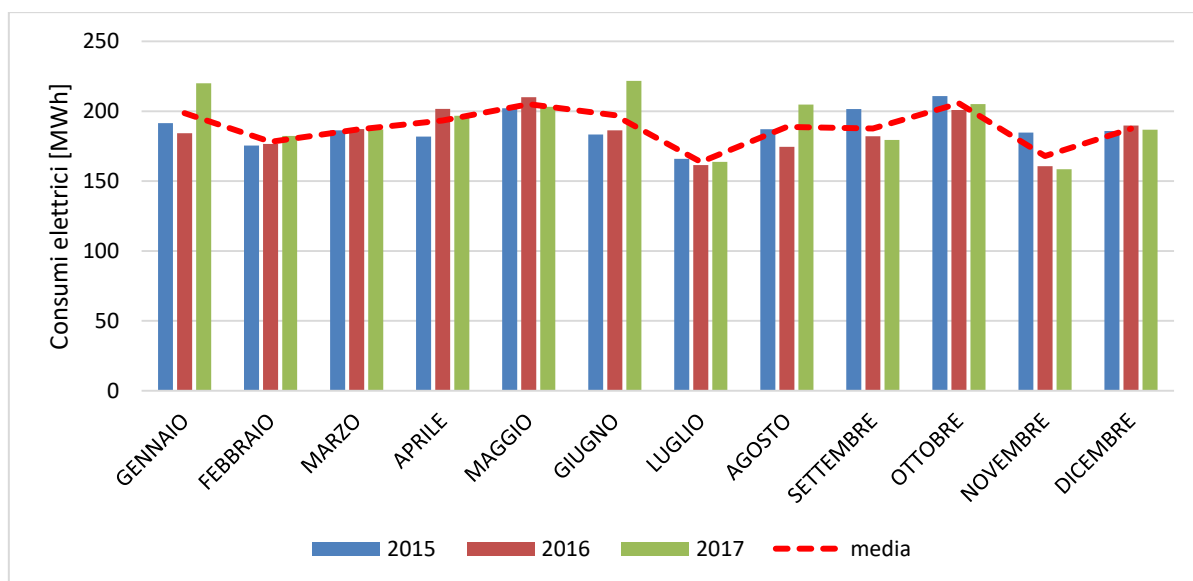


Figura 30: Valutazione d'esercizio stagione per le tre stagioni considerate

Una prima analisi sui dati di consumo può essere effettuata attraverso un confronto dei dati stagionali con il valore medio dei tre anni considerati.

Dal confronto emerge il tipico andamento mensile dei consumi elettrici, con variazioni legate ai consumi per la climatizzazione invernale ed estiva, nei mesi più freddi e nei mesi più caldi.

Si evidenzia anche come in alcuni mesi i consumi risultino ben superiori alla media.

Al fine di valutare le motivazioni di tale scostamento è stata condotta un'analisi sulle temperature medie mensili degli anni presi in considerazione, utilizzando l'archivio dei dati meteo della stazione meteorologica di Roma Urbe.

L'osservazione del grafico precedente conduce a due considerazioni:

- la prima considerazione è relativa al confronto dei valori medi registrati e i dati climatici della Norma UNI 10349:2016 [8]. In particolare, emerge immediatamente come per tutti i mesi degli anni considerati la temperatura media mensile risulti superiore al valore della Norma nella sua ultima versione, aggiornata nel 2016;

- la seconda osservazione riguarda i mesi per i quali si era constatato un andamento anomalo; tali mesi sono caratterizzati da temperature anomale rispetto alla media (febbraio 2015, luglio 2015) e quindi la motivazione dei dati anomali sopra individuati è riconducibile alle diverse esigenze di climatizzazione.

5.5 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 31, distinti in raffrescamento, illuminazione e tutti gli altri apparati elettrici:

Tabella 18: Consumi energetici mensili elettrici

MESE	Consumi elettrici [MWh]											
	Stagione											
	2015				2016				2017			
	Raffr.	Illum.	Varie	Totale	Raffr.	Illum.	Varie	Totale	Raffr.	Illum.	Varie	Totale
GENNAIO	127.2	42.9	37.3	207.4	93.0	42.9	37.3	173.2	115.9	42.9	37.3	196.0
FEBBRAIO	81.6	42.9	37.3	161.8	77.0	42.9	37.3	157.2	78.6	42.9	37.3	158.8
MARZO	126.1	42.9	37.3	206.2	127.7	42.9	37.3	207.9	95.7	42.9	37.3	175.9
APRILE	130.4	42.9	37.3	210.6	97.3	42.9	37.3	177.5	140.4	42.9	37.3	220.6
MAGGIO	81.3	42.9	37.3	161.5	148.7	42.9	37.3	228.9	104.2	42.9	37.3	184.4
GIUGNO	90.8	42.9	37.3	171.0	134.2	42.9	37.3	214.4	161.7	42.9	37.3	241.9
LUGLIO	64.8	42.9	37.3	144.9	66.8	42.9	37.3	147.0	97.9	42.9	37.3	178.1
AGOSTO	92.8	42.9	37.3	173.0	112.3	42.9	37.3	192.5	102.3	42.9	37.3	182.4
SETTEMBRE	99.8	42.9	37.3	180.0	89.2	42.9	37.3	169.4	65.3	42.9	37.3	145.5
OTTOBRE	154.5	42.9	37.3	234.6	94.8	42.9	37.3	175.0	162.0	42.9	37.3	242.1
NOVEMBRE	96.0	42.9	37.3	176.2	56.5	42.9	37.3	136.7	103.8	42.9	37.3	184.0
DICEMBRE	94.3	42.9	37.3	174.4	132.5	42.9	37.3	212.7	125.8	42.9	37.3	206.0
ANNUALE	1240	515	447	2202	1230	515	447	2192	1354	515	447	2316

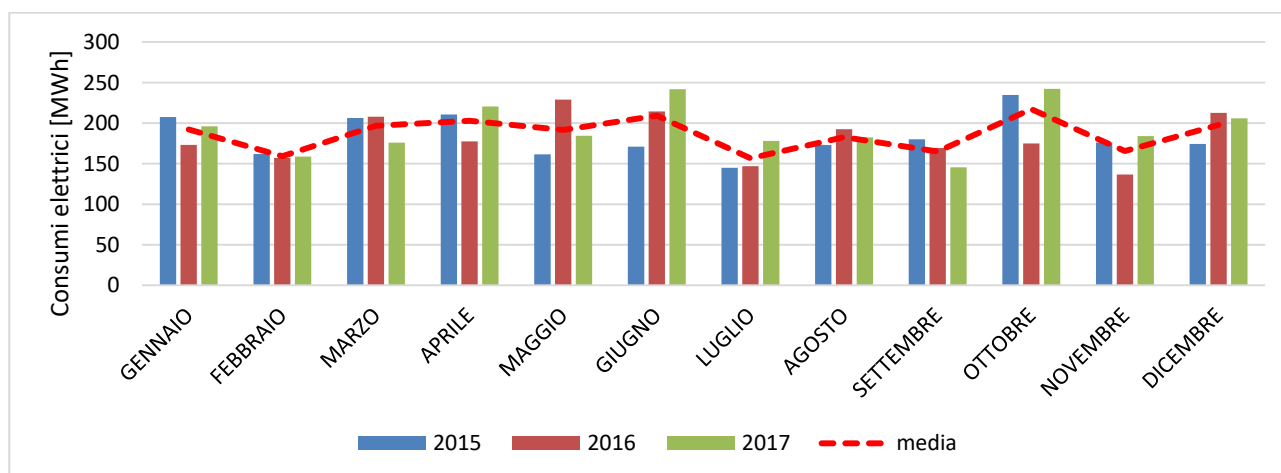


Figura 31: Valutazione adattata all'utenza per le tre stagioni considerate

5.6 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:

Tabella 19: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2015

Confronto			
MESE	Stagione 2015		
	Valutazione d'esercizio [MWh]	Valutazione Adattata all'utenza [MWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	191.5	207.4	-8.29
FEBBRAIO	175.5	161.8	7.80
MARZO	186.4	206.2	-10.64
APRILE	181.8	210.6	-15.81
MAGGIO	202.1	161.5	20.09
GIUGNO	183.4	171.0	6.74
LUGLIO	166.0	144.9	12.69
AGOSTO	187.2	173.0	7.59
SETTEMBRE	201.5	180.0	10.69
OTTOBRE	210.8	234.6	-11.29
NOVEMBRE	184.7	176.2	4.62
DICEMBRE	185.9	174.4	6.17
ANNUALE	2256.9	2201.7	2.45

Tabella 20: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2016

Confronto			
MESE	Stagione 2016		
	Valutazione d'esercizio [MWh]	Valutazione Adattata all'utenza [MWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	184.2	173.2	5.99
FEBBRAIO	176.6	157.2	11.00
MARZO	187.2	207.9	-11.03
APRILE	201.7	177.5	12.00
MAGGIO	210.0	228.9	-9.00
GIUGNO	186.3	214.4	-15.05
LUGLIO	161.5	147.0	9.00
AGOSTO	174.6	192.5	-10.25
SETTEMBRE	182.2	169.4	7.00
OTTOBRE	200.9	175.0	12.92
NOVEMBRE	160.6	136.7	14.92
DICEMBRE	189.8	212.7	-12.06
ANNUALE	2215.7	2192.2	1.06

Tabella 21: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2017

Confronto			
MESE	Stagione 2017		
	Valutazione d'esercizio [MWh]	Valutazione Adattata all'utenza [MWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	220.1	196.0	10.92
FEBBRAIO	182.4	158.8	12.92
MARZO	187.0	175.9	5.92
APRILE	196.8	220.6	-12.08
MAGGIO	203.1	184.4	9.24
GIUGNO	221.7	241.9	-9.07
LUGLIO	163.8	178.1	-8.75
AGOSTO	204.8	182.4	10.93
SETTEMBRE	179.4	145.5	18.92
OTTOBRE	205.1	242.1	-18.05
NOVEMBRE	158.5	184.0	-16.05
DICEMBRE	186.8	206.0	-10.24
ANNUALE	2309.6	2315.6	-0.26

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 medio si attesta tra il 10% e il 12%. Si riscontra un picco massimo di discostamento nell'anno 2015, pari al 20% nel mese di maggio, mentre per gli altri anni si ha un discostamento massimo del 18% in mesi particolari. Quindi, analizzando l'errore medio, anche per la parte elettrica si può affermare che, il modello di edificio modellato tramite Trnsys risulta rappresentativo del suo comportamento reale.

6 Il caso studio di Palazzo Theodoli: identificazione dei possibili interventi di retrofit

6.1 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 Theodoli.

Verranno dapprima affrontati gli interventi relativi all'efficientamento termico ed in seguito verranno analizzati interventi volti all'efficientamento della parte elettrica.

6.1.1 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 fan coil negli uffici e nei corridoi, da radiatori in ghisa a parete nei servizi e da impianti a tutt'aria nella Sala lotti e nell'asilo nido. L'energia frigorifera invece è distribuita in modo disuniforme, tramite un impianto VRV e split di backup nel CED e tramite fan coil negli uffici e nei corridoi. L'intervento proposto è finalizzato alla riduzione dei consumi per il condizionamento dei locali e conseguentemente all'azzeramento dell'emissioni in loco di CO₂ per la produzione di 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 Theodoli 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 22 sono riportate le caratteristiche delle finestre pre e post intervento.

Tabella 22: Caratteristiche finestre prima e dopo l'intervento di efficientamento

	Tipologia	Spessore vetro esterno [mm]	Spessore intercapedine esterna [mm]	Spessore vetro intermedio [mm]	Spessore intercapedine interna [mm]	Spessore vetro interno [mm]	Trasmittanza [W/m ² ·K]
Pre intervento	Vetro doppio	4	12	14	-	-	3.74
Post intervento	Vetro triplo	4	12	14	20	6	2.8

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 [3], 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 91233 €. 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.

Tabella 23: Voci di costo

	Costo [€/m ²]	Area Finestre [m ²]	Costo TOT [€]
Fornitura [9]	75.35	866	65253
Installazione [10]	30	866	25980
TOTALE	-	-	91233

6.1.2 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 24 sono riportati i dettagli relativi al consumo elettrico annuo prendendo come esempio l'anno 2017:

Tabella 22: Ripartizione consumi elettrici

Categoria	[kWh/anno]	[%]
Illuminazione	514596	23.01
Climatizzazione	1274427	56.98
Altri carichi	447480	20.01
TOTALE	2236503	100%

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 90 mq, entrambi nel lato nord della copertura e parte dei quali su di un torrino. Il posizionamento del FV da installare è rappresentato in Figura 32 in blu.

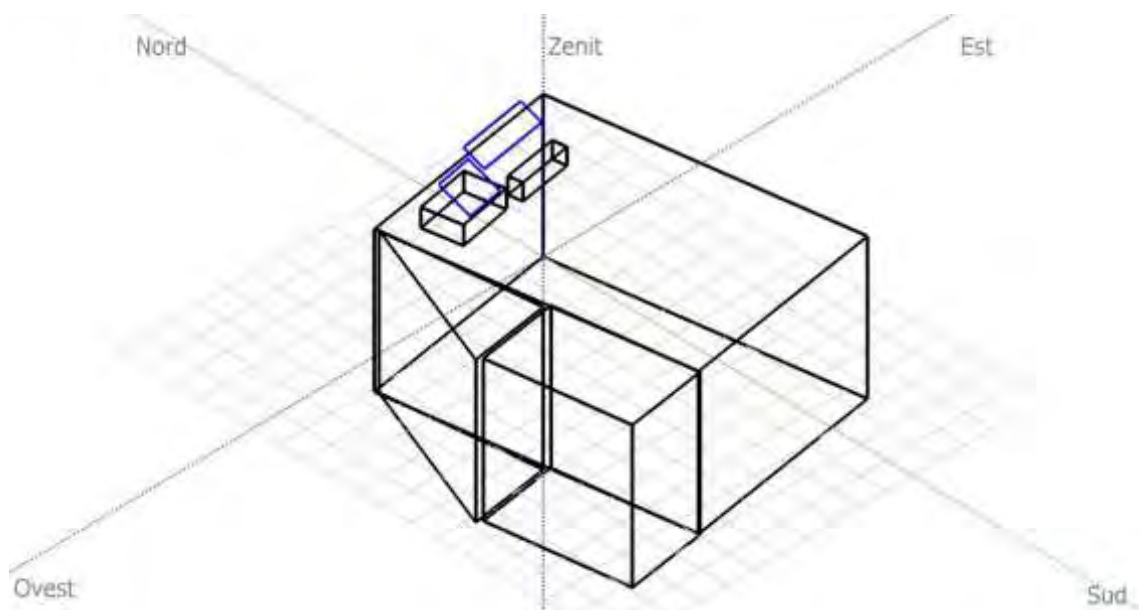


Figura 32: Area disponibile per installazione e caratteristiche FV

L'impianto fotovoltaico pensato in copertura sarà composto da moduli in silicio monocristallino da 300 Wp ciascuno [12], con un'efficienza del 18.3%. Il limite alla potenza installata è dato dalle limitate dimensioni dell'area di possibile installazione. Ipotizzando di installare i pannelli rivolti a Sud-SudEst e inclinati rispetto all'orizzontale di 30° sarà possibile installare un numero massimo di 54 moduli suddivisi in due campi composti rispettivamente da 24 e 30 moduli portando ad una potenza di picco dell'impianto ad un valore di circa 16.2 kWp con una produzione complessiva annua di 21.59 MWh/a.

In Tabella 25 sono riassunte le caratteristiche dei singoli campi FV.

Tabella 23: Caratteristiche pannelli FV

Soluzione	N moduli	Superficie totale [mq]	Potenza Totale [kWp]
Modulo FV1	24	39.42	7.2
Modulo FV2	30	49.28	9

Gli interventi così ideati sono stati implementati sul modello inserendo le informazioni riportate in Tabella 25 nel componente Type.

Sono stati così valutati i costi d'intervento valutando l'installazione dei due campi FV.

Tabella 24: Voci di costo

	Prezzo [€/kWp]	O&M [€/anno]	Wp.	Prezzo totale [€]
Modulo FV	1830	200	16200	29646

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 Theodoli 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;
- Contatori di energia elettrica bidirezionale a valle del POD;
- Dispositivi di interfaccia con gli attuatori posti a comando dell'illuminazione;
- Misuratori di energia termica e data logger.

Tramite i componenti sopracitati 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;
- 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 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 27:

Tabella 25: Prezzi sensoristica impianto di gestione e controllo

Componente	Prezzo Singolo [€/pezzo]	N	Prezzo Totale [€]
Sensore di presenza persone	30	170	5100
Contatori di energia elettrica bidirezionale	150	1	150
Interfaccia Illuminazione – Sistema di controllo	100	160	16000
Attuatori illuminazione	15	160	2400
TOTALE			23650

7 Analisi energetica ed economica degli interventi di retrofit

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

- Interventi di efficientamento termico;
- Interventi di efficientamento elettrico;

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.

7.1 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. 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.

7.1.1 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 28 le caratteristiche delle nuove finestre.

Tabella 28: Caratteristiche finestre prima e dopo l'intervento di efficientamento

	Tipologia	Spessore vetro esterno [mm]	Spessore intercapedine esterna [mm]	Spessore vetro intermedio [mm]	Spessore intercapedine interna [mm]	Spessore vetro interno [mm]	Trasmittanza [W/m ² ·K]
Pre intervento	Vetro doppio	4	12	14	-	-	3.74
Post intervento	Vetro triplo	4	12	14	20	6	2.8

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 31 sono riportati i valori relativi al consumo di energia per il riscaldamento prima e dopo l'intervento considerando i fattori di conversione indicati da DGR 967/2015 e alla DGR 1275/2015. In particolare, si è considerato un fattore di conversione pari a 2.42 per l'energia elettrica prelevata dalla rete ed uno di 1.05 per il gas naturale ed un PCI di 9.59 kWh/Sm³.

Tabella 29: Riassunto energetico simulazioni

	Consumo Gas per Riscaldamento [Sm ³ /anno]	Energia Primaria Riscaldamento [MWh/anno]	Energia Elettrica Raffrescamento [MWh/anno]	Energia Primaria Raffrescamento [MWh/anno]	Energia primaria totale per climatizzazione [MWh/a]
Pre intervento	31398	316.17	1274.43	3084.11	34482
Post intervento	24975	251.48	1252.78	3031.73	3283
Variazione percentuale	20.46		1.7		3.44

Come si può notare il cambio degli infissi comporta un miglioramento del rendimento termico dell'edificio soprattutto nei mesi invernali in cui viene utilizzato il sistema di riscaldamento. Questo ovviamente comporta anche un positivo impatto ambientale dell'intervento dovuto alla riduzione della CO₂ prodotta. In Figura 33 e in Figura 34 è riportato il consumo di energia primaria percentuale ripartito tra le varie voci prima e dopo l'intervento dai quali si può notare come il consumo di energia primaria rimanga sempre notevolmente sbilanciato verso i consumi elettrici e soprattutto di raffrescamento, questo è dovuto soprattutto alla presenza dei CED ed all'efficiente utilizzo dei sistemi di generazione termica per i quali infatti non sono state proposte migliorie. Dai grafici è inoltre evidente come il consumo di energia primaria dovuta alla climatizzazione sia diminuito di circa il 3.5%, dovuto alla diminuzione di consumi di energia prima globale.

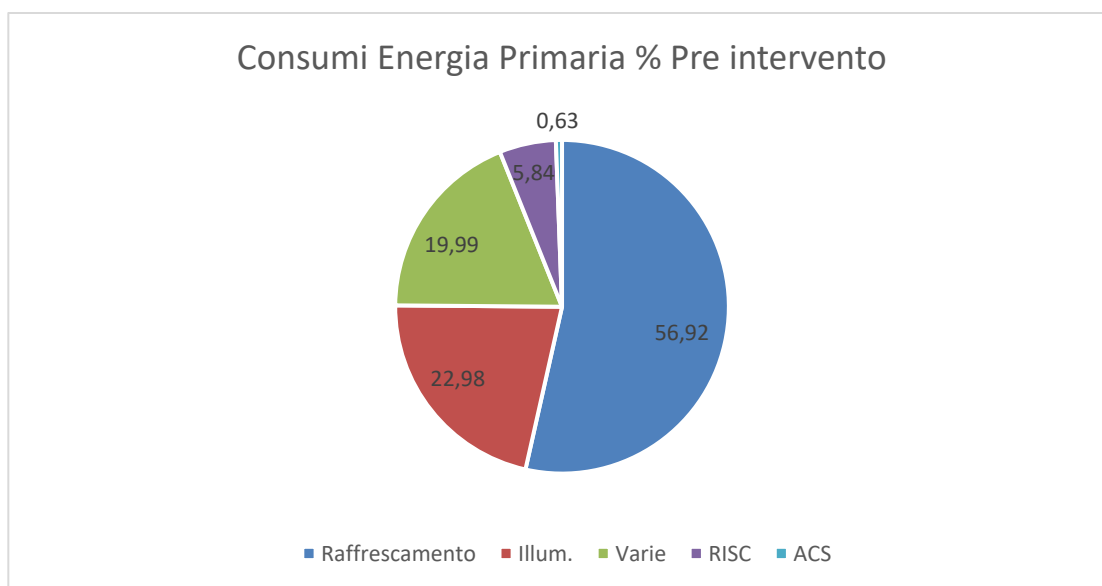


Figura 33: Ripartizione consumi di energia primaria pre intervento

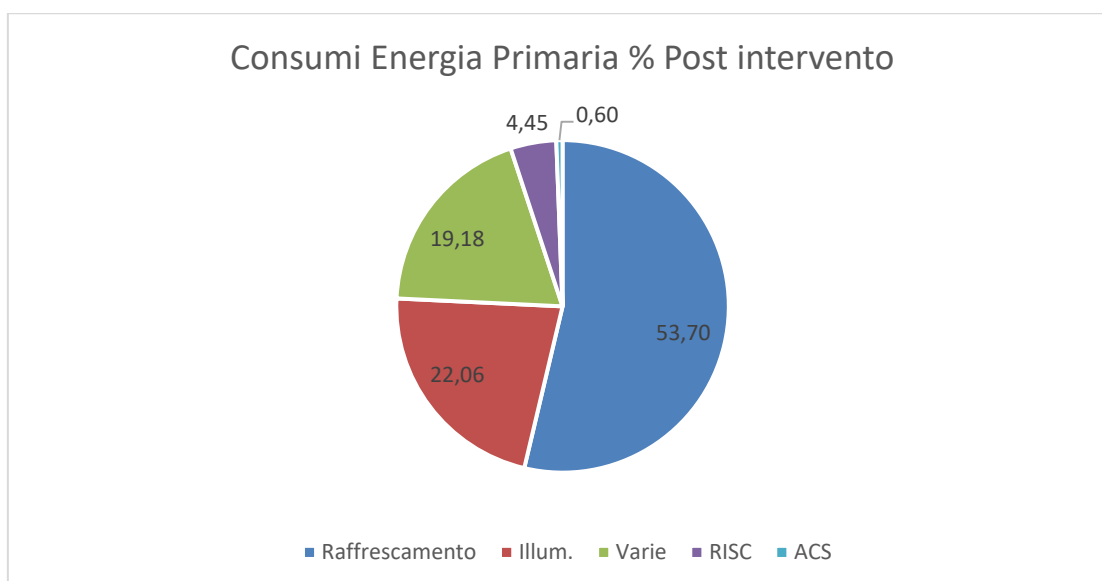


Figura 34: Ripartizione consumi di energia primaria post intervento

7.2 Scenari di efficientamento elettrico

7.2.1 Fotovoltaico

Come illustrato precedentemente, è stata proposta l'installazione di due impianti FV per un totale di 16.2 kWp. In Figura 35 è riportata l'andamento della potenza annua di produzione di entrambi gli impianti FV.

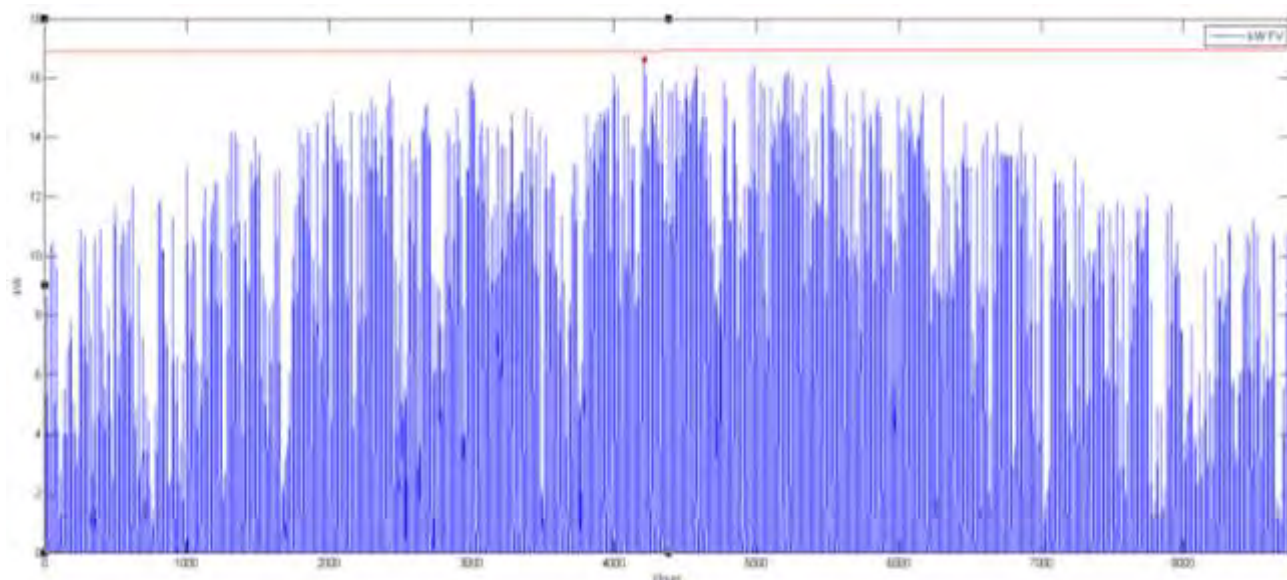


Figura 35: Andamento della produzione da fotovoltaico della Soluzione A

È possibile notare come non si riesca a raggiungere il valore di picco ma al massimo un valore pari a circa 16 kWp.

Il totale di energia prodotta di 21594 kWh/anno che comporta una pari riduzione di energia assorbita dalla rete elettrica che equivale ad una riduzione annua dei circa l'1%. Tale valore non ha quindi un impatto rilevante sui consumi dell'edificio dato il pochissimo spazio disponibile sulla copertura.

In Tabella 30 è il dettaglio della produzione dei due campi FV insieme.

Tabella 30: Dettagli meteo e produzione fotovoltaico

	GlobHor Wh/m²	DiffHor Wh/m²	GlobInc Wh/m²	GlobEff kWh/m²	E_FV MWh
Gennaio	50.7	30.00	76.1	69.6	1.051
Febbraio	69.0	32.70	98.6	91.5	1.367
Marzo	114.5	51.50	142.4	133.9	1.960
Aprile	137.4	72.60	148.9	139.5	2.013
Maggio	179.4	83.10	178.9	168.3	2.358
Giugno	191.7	82.00	183.6	172.7	2.392
Luglio	204.7	80.30	201.3	190.1	2.574
Agosto	175.0	76.40	185.5	175.0	2.380
Settembre	126.1	54.20	151.0	142.5	1.990
Ottobre	89.1	40.70	119.4	111.5	1.599
Novembre	53.2	28.60	79.8	73.5	1.076
Dicembre	40.8	25.40	61.8	56.0	0.833
Anno	1431.6	657.49	1627.4	1524.2	21.594

La produzione specifica (o ore equivalenti) dei due impianti risulta essere uguale a 1333 kWh/kW_p/anno.

7.2.2 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 [9].

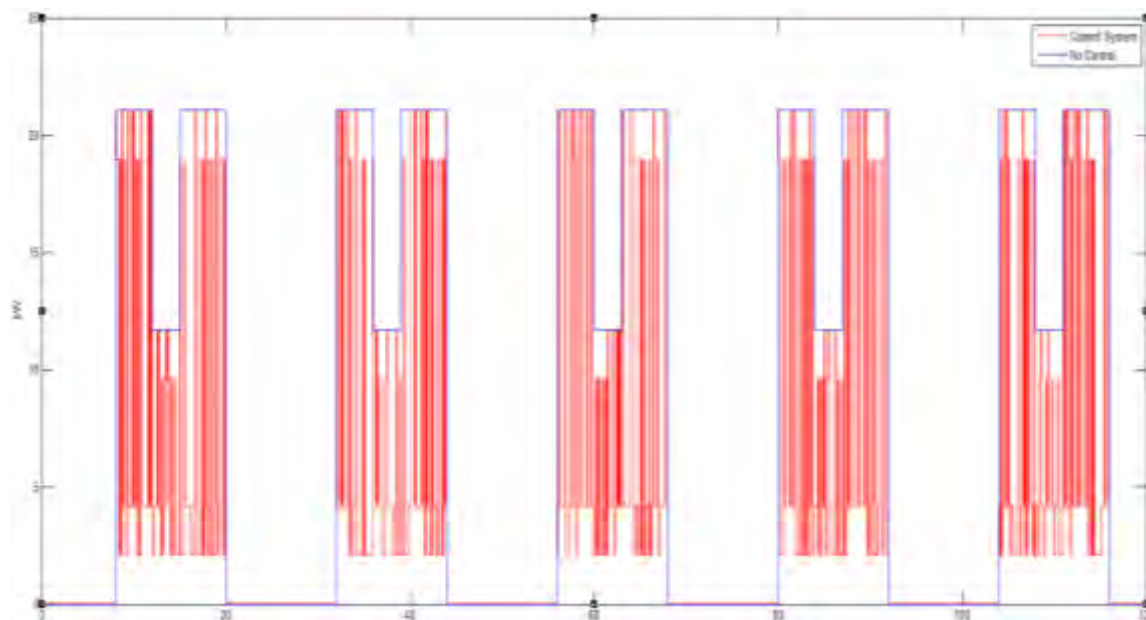


Figura 36: Andamento assorbimento elettrico illuminazione con e senza sistema di controllo

È stato variato il criterio di accensione dei corpi luminosi senza andare a modificare la potenza complessiva dell'impianto, infatti l'intervento consiste nell'installazione di sensori di presenza nei corridoi e nei servizi in modo da fornire l'illuminazione richiesta solo quando necessario. In Tabella 31 sono stati riportati i consumi dell'impianto di illuminazione con e senza il sistema di controllo e monitoraggio.

Tabella 3126: Riepilogo energetico intervento di gestione e controllo

	Consumo Elettrico Annuo per illuminazione [kWh/anno]	Energia primaria consumata [kWh/anno]
Stato Attuale	514596	1245322
Post Intervento	442615.9	1071130
RISPARMIO ENERGETICO [%]	13.99%	

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.

7.3 Scenario globale

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

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:

Tabella 32: Codici identificativi scenari

CODICE	SCENARIO
TF	Termico (FINESTRE)
EF	Elettrico (FV)
EG	Elettrico (SISTEMA DI GESTIONE)

In Tabella 33 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.

Tabella 33: Analisi Energetica – Ambientale interventi proposti

	TF	EF	EG	TF+EF	TF+EG	EF+EG	Integrato
Consumo metano [Sm ³ /anno]	28353.2	34776.9	34776.9	28353.2	28353.2	34776.9	28353.2
Riduzione consumo metano [%]	18.47	0	0	18.47	18.47	0	18.47
Energia Elettrica [MWh/anno]	2214.9	2214.9	2164.5	2193.3	2142.9	2143	2121.3
Variazione consumo elettrico [%]	0.97	0.96	3.22	1.93	4.19	4.18	5.15
Consumo Energia primaria [MWh/anno]	5645.5	5762.5	5588.3	5593.2	5471.3	5536.1	5419

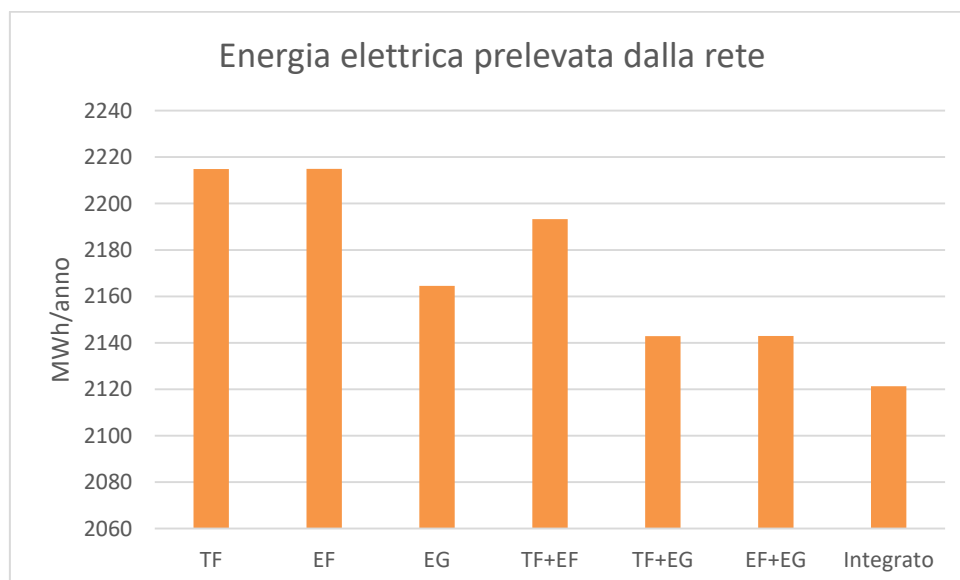


Figura 37: Energia elettrica annua assorbita dalla rete

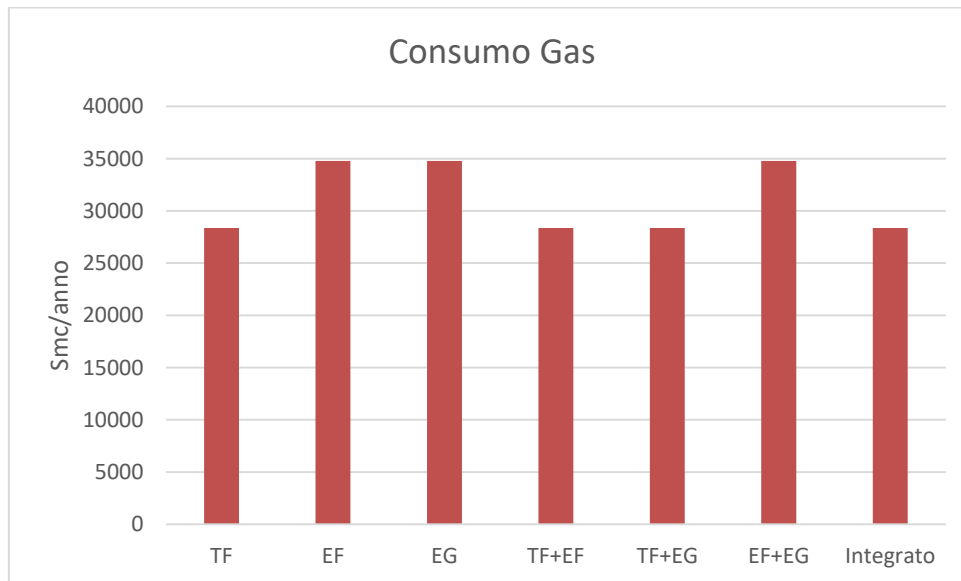


Figura 38: Consumo di metano annuo

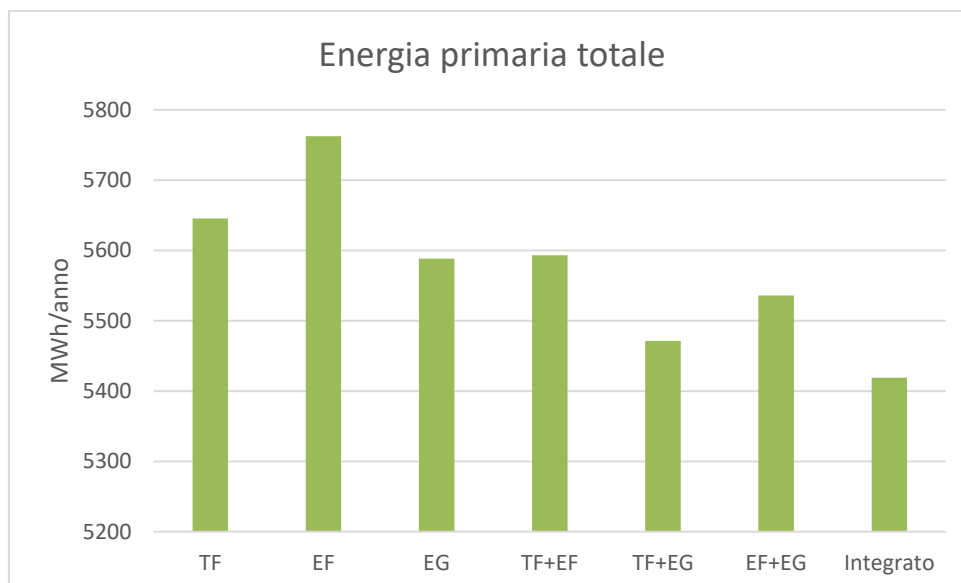


Figura 39: Consumo di energia primaria annuo

Dai grafici e dai relativi valori riportati nelle Fig. 37-39 risulta evidente come lo scenario “Integrato” comporti i maggiori vantaggi dal punto di vista ambientale ed energetico. Si può notare come il cambiamento di energia primaria utilizzata per la climatizzazione comporti un netto miglioramento ambientale ed energetico, garantendo i risultati sopra esposti. Si vuole sottolineare come in questo particolare caso studio gli interventi siano perfettamente integrati nel senso che i vantaggi energetici dei singoli interventi si sommano tra di loro. Questo è possibile perché:

1. la finestratura ha effetto esclusivamente sul consumo di raffrescamento e riscaldamento;
2. il sistema di gestione ha un effetto esclusivamente sul controllo dell’illuminazione; e
3. il FV avendo una taglia così piccola non cambia il livello di autoconsumo a cause del ridotto carico per raffrescamento né per la migliorata gestione dell’illuminazione.

8 Analisi economica

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.

Tabella 34: Costo dei diversi interventi e dei diversi scenari previsti.

Intervento/SCENARIO	Costo intervento [€]	Costo SCENARIO [€]
TF (Sostituzione infissi)	91233	
EF (Fotovoltaico)	29646	
EG (Sistema di gestione e controllo)	23650	
TF + EF (Sostituzione infissi + Fotovoltaico)		120879
TF + EG (Sostituzione infissi + Sistema di gestione e controllo)		114883
EF + EG (Fotovoltaico + Sistema di gestione e controllo)		53296
Integrato		144529

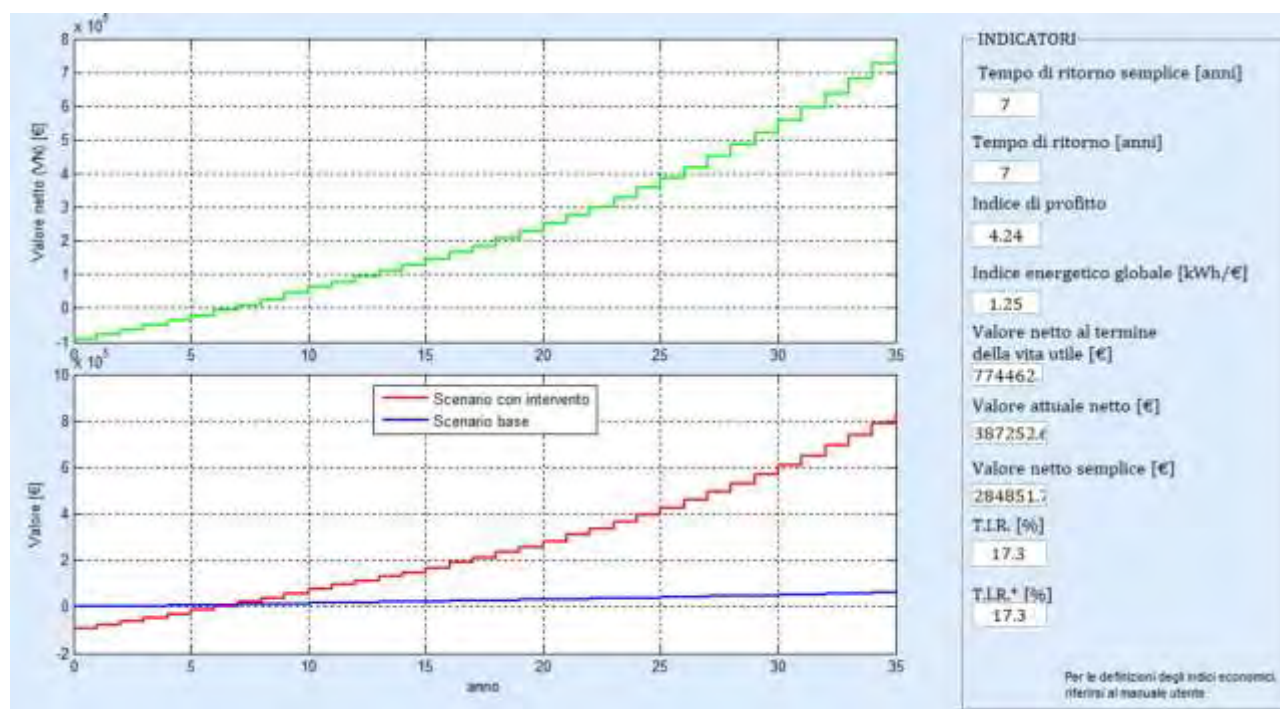


Figura 40: Scenario TF – Analisi economica

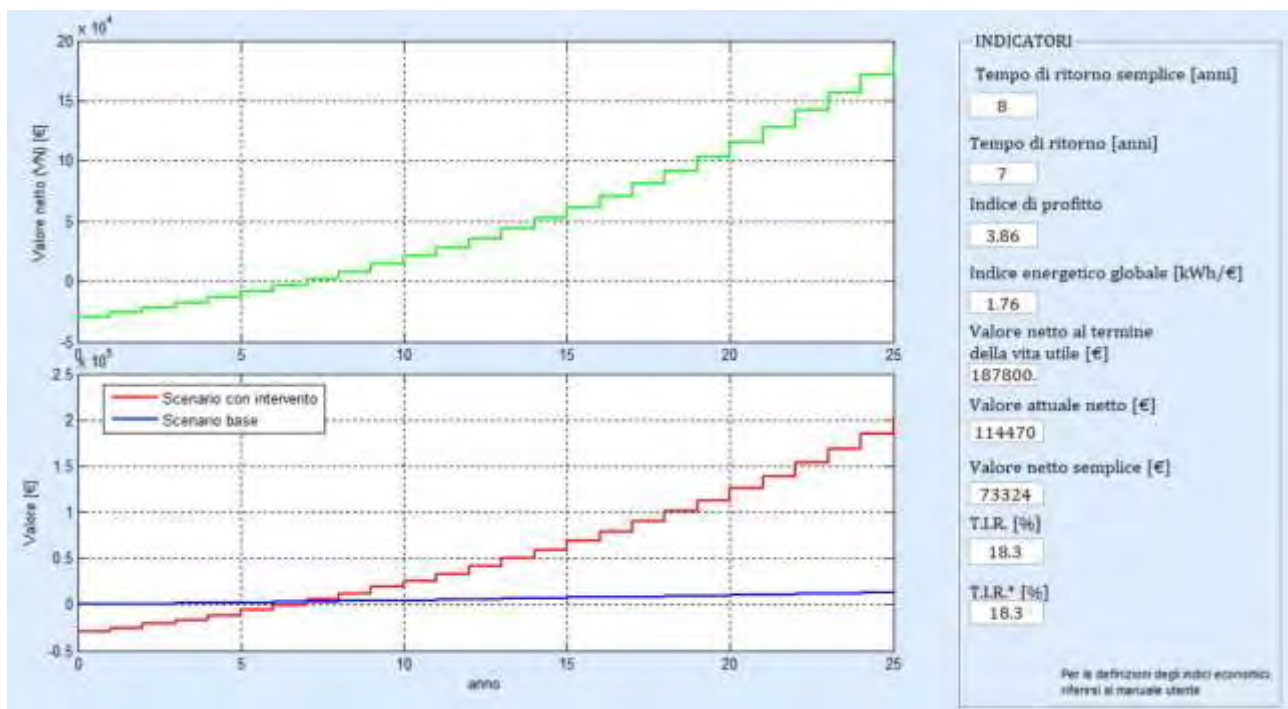


Figura 41: Scenario EF – Analisi economica

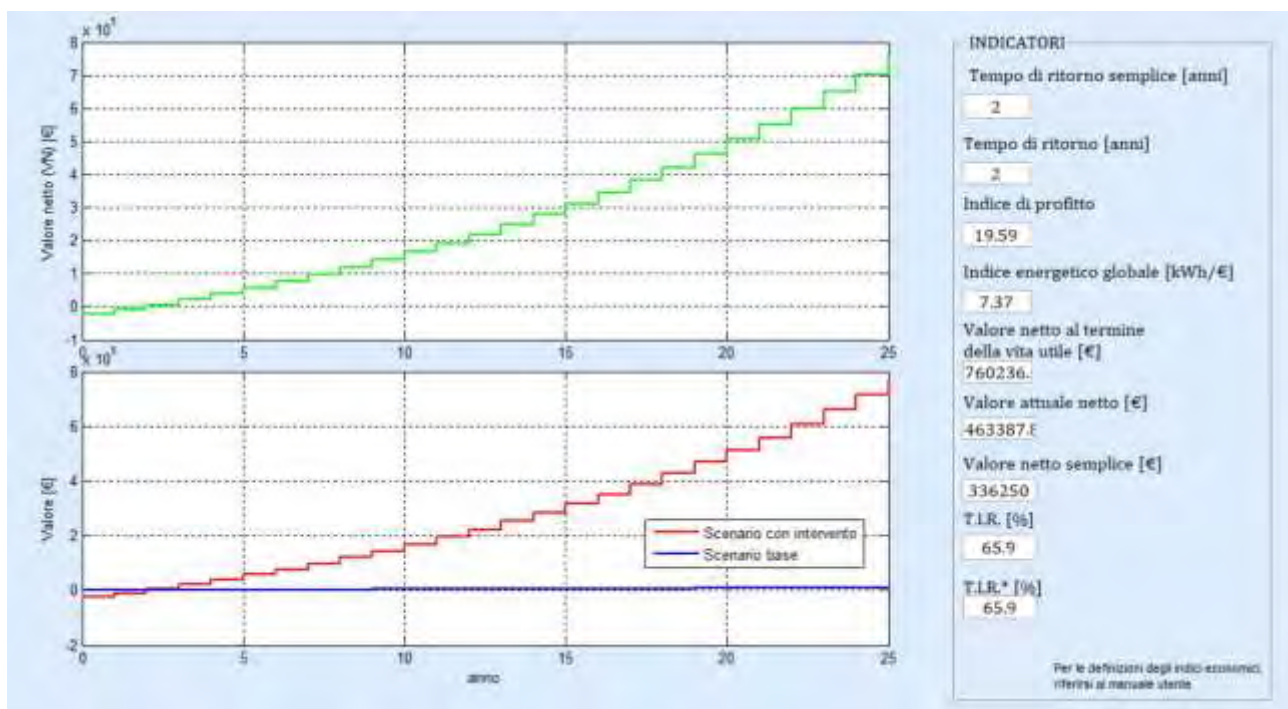


Figura 42: Scenario EG – Analisi economica

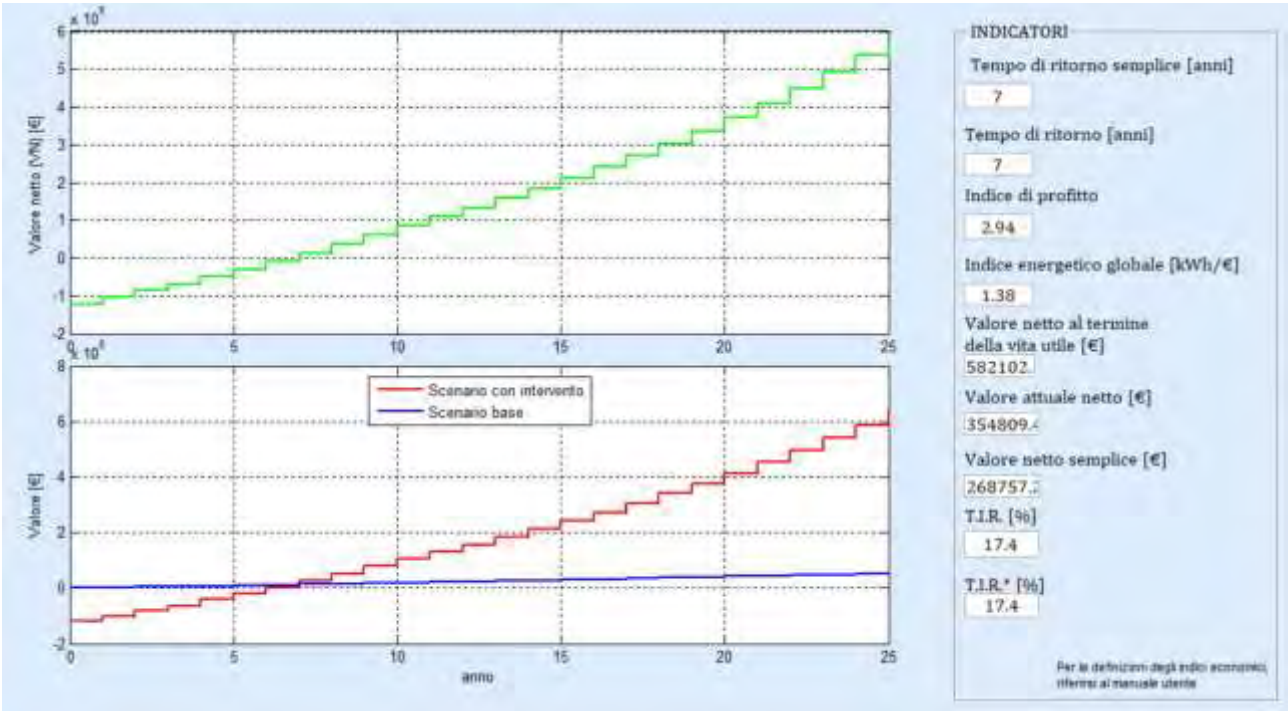


Figura 43: Scenario TF + EF – Analisi economica

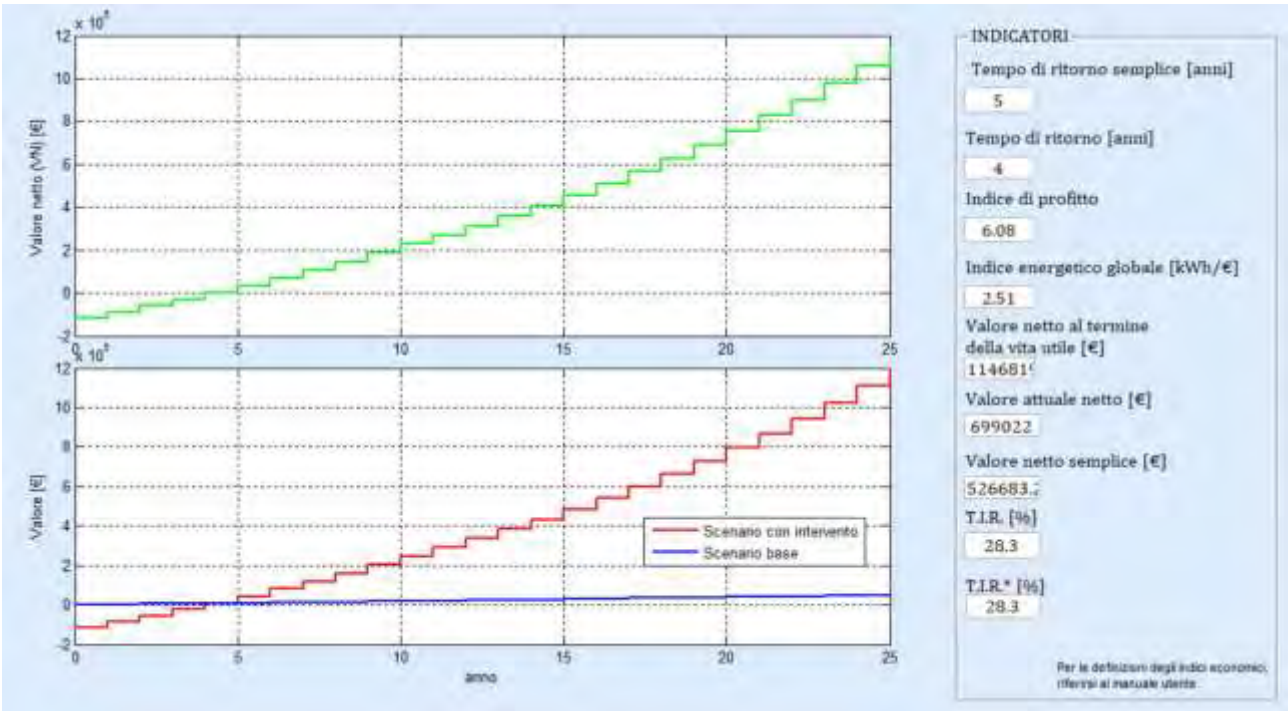


Figura 44: Scenario TF + EG – Analisi economica

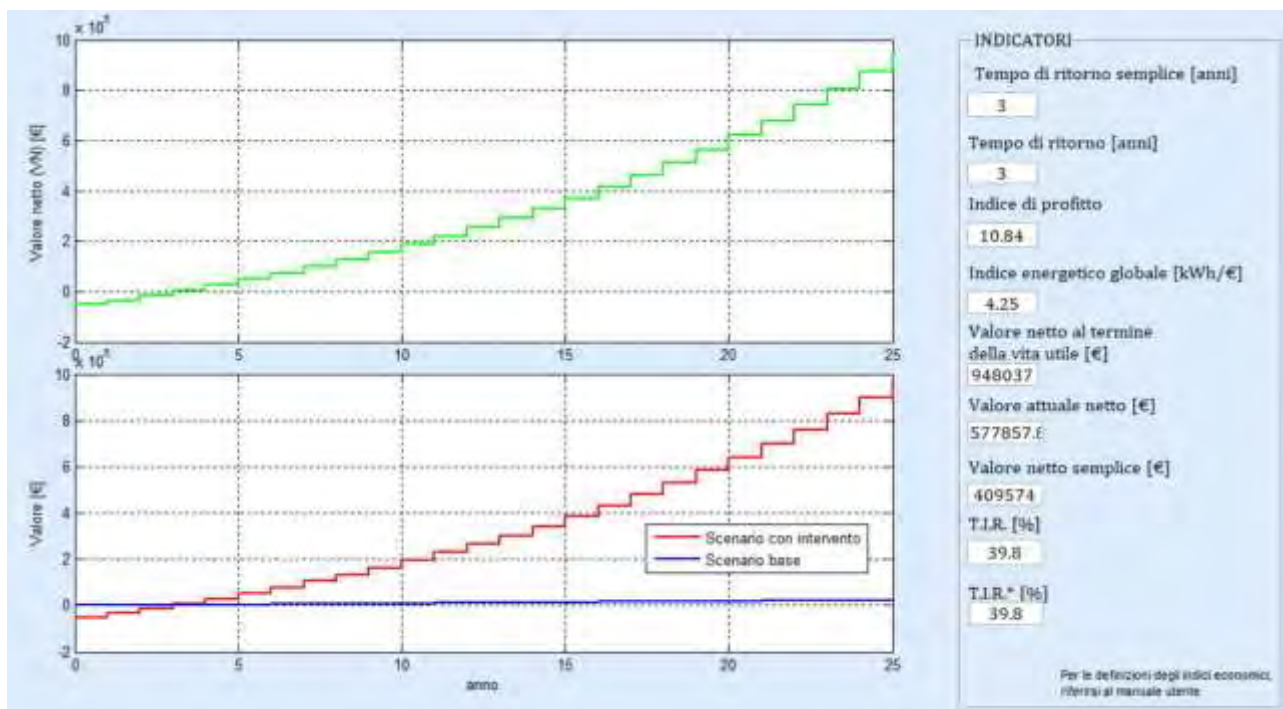


Figura 45: Scenario EF + EG – Analisi economica

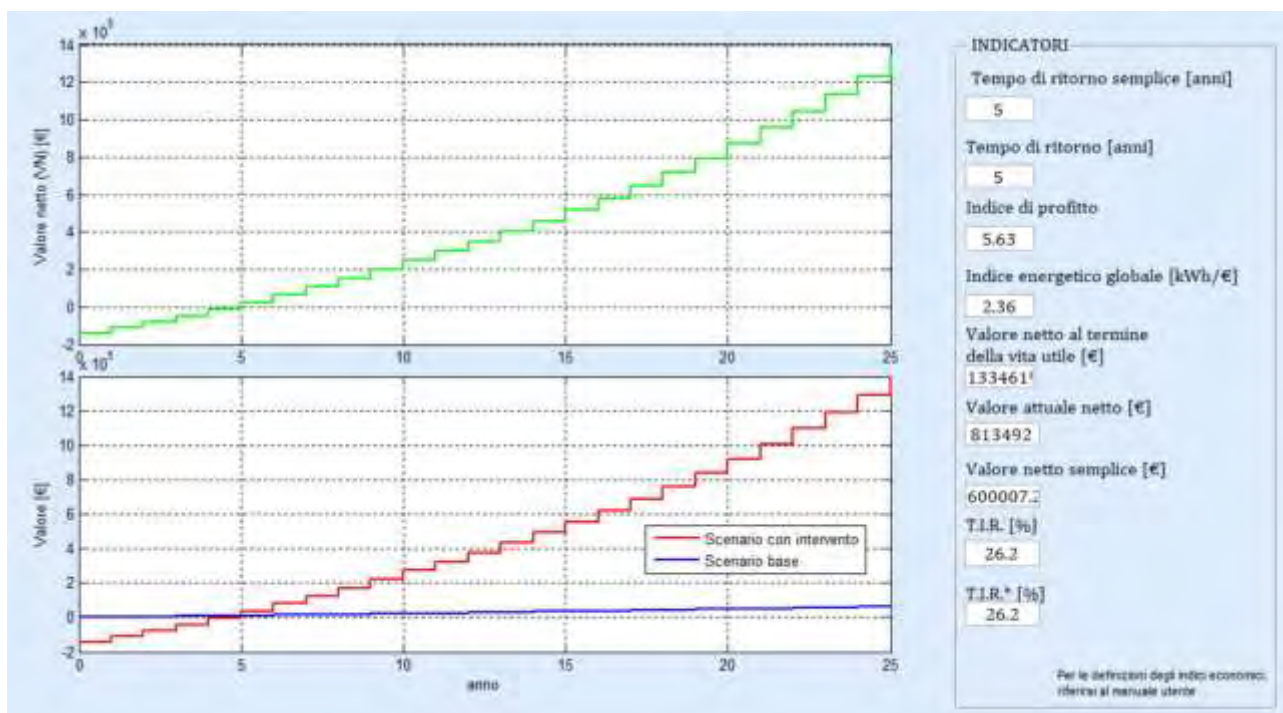


Figura 46: Scenario INTEGRATO – Analisi economica

I grafici delle figure seguenti riportano il VAN e il T.I.R. per tutti gli scenari analizzati. Tali dati sono infine riassunti nella Tabella 35.

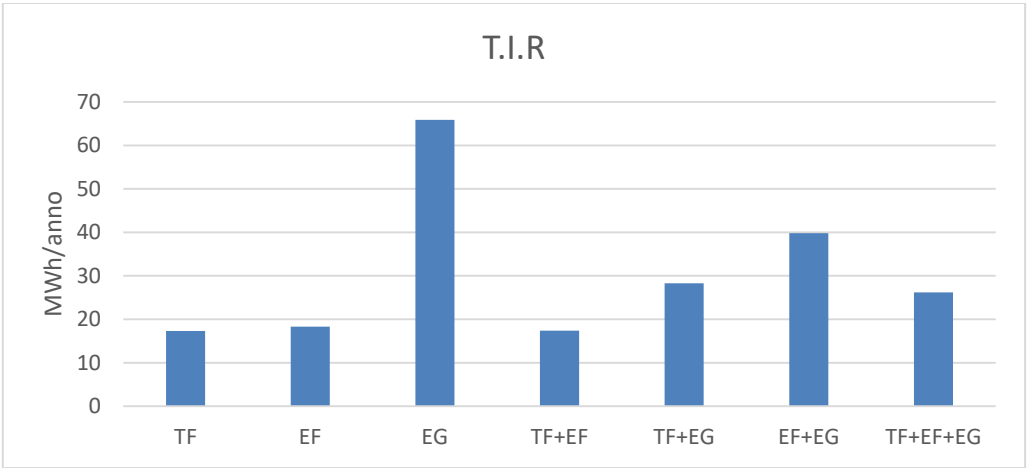


Figura 47: variazione del T.I.R. al variare degli scenari analizzati

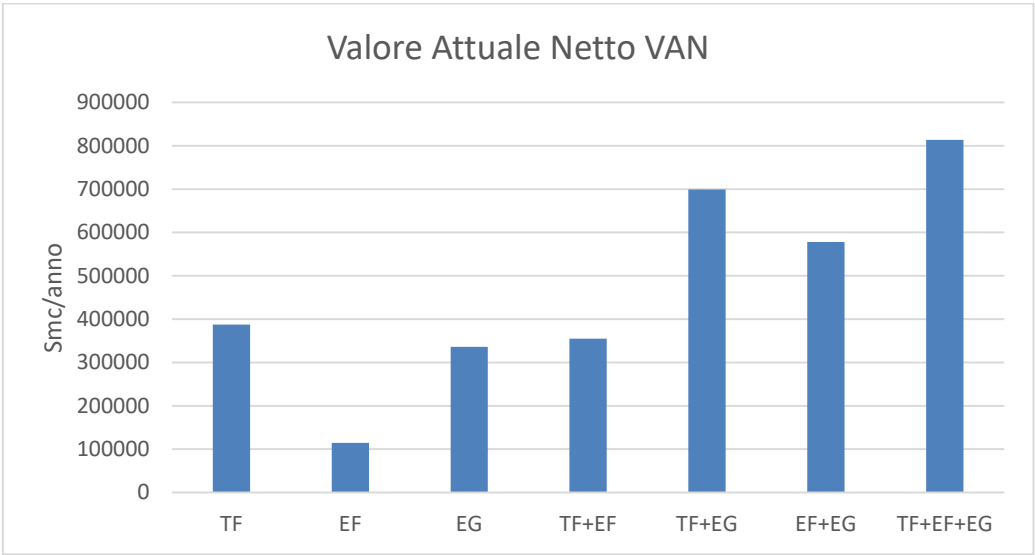


Figura 48: variare del V.A.N. al variare degli scenari analizzati

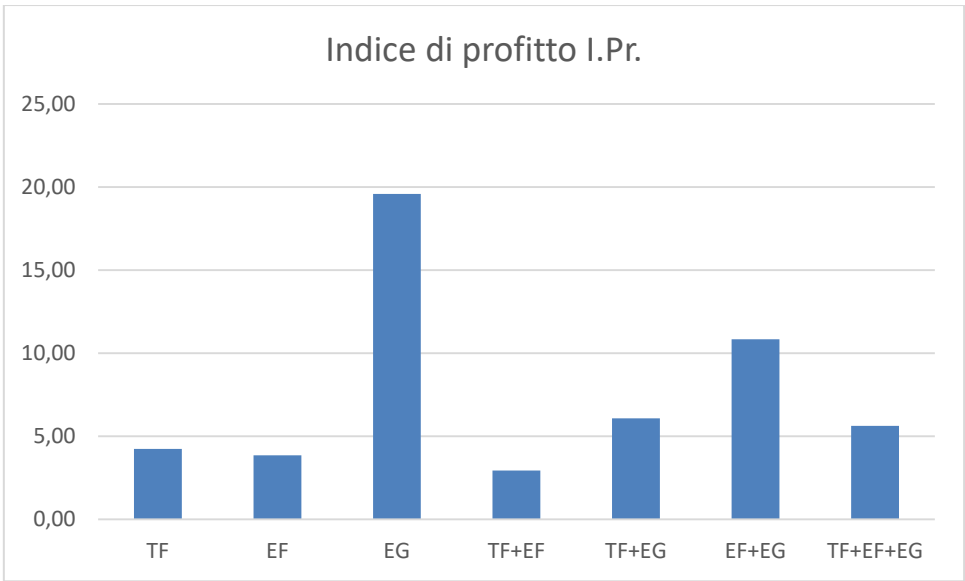


Figura 49: variare dell'Indice di profitto al variare degli scenari analizzati

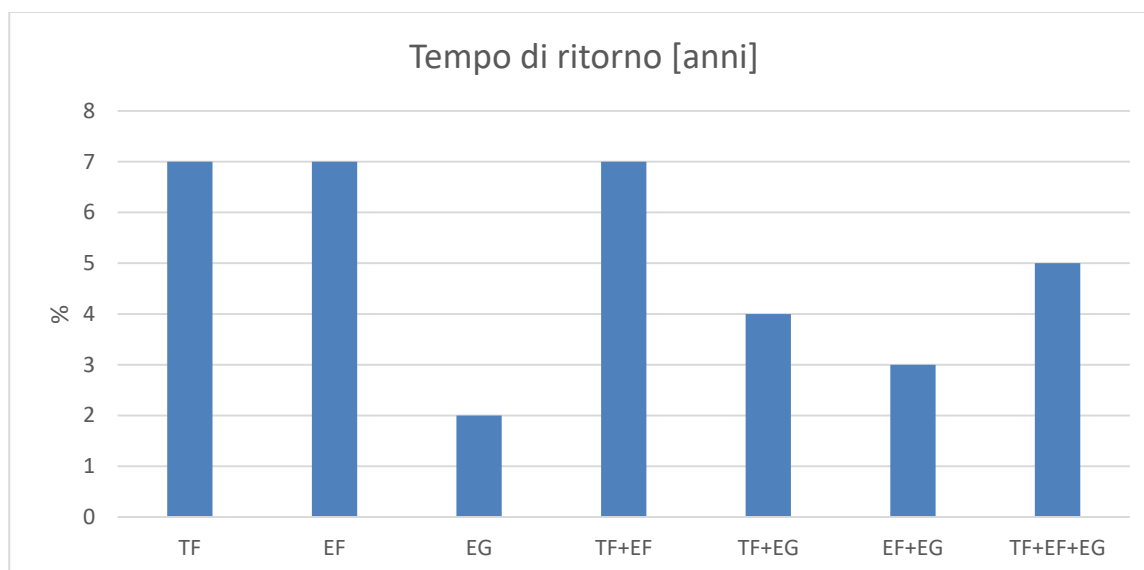


Figura 50: variare del tempo di ritorno al variare degli scenari analizzati

Tabella 35: Risultati analisi economiche per singoli scenari

SCENARI	T.I.R. [%]	Valore attuale netto VAN [€]	I.Pr.	Tempo di ritorno [anni]
TF	17.3	387252	4.24	7
EF	18.3	114470	3.86	7
EG	65.9	336250	19.59	2
TF+EF	17.4	354809	2.94	7
TF+EG	28.3	699022	6.08	4
EF+EG	39.8	577857	10.84	3
TF+EF+EG	26.2	813492	5.63	5

Si può notare che tutti gli scenari proposti presentano un tempo di ritorno accettabile, con lo scenario EG che risulta essere senz'altro il migliore, avendo un tempo di ritorno di 2 anni e un TIR del 66% circa. Anche tutti gli scenari che prevedono l'efficientamento del sistema di controllo presentano buoni risultati, a dimostrazione che questo risulta essere non solo un efficientamento efficace, ma anche molto remunerativo.

Se si ipotizza di adottare tutti gli interventi di efficientamento contemporaneamente, il tempo di ritorno risulta essere di 5 anni e il TIR è pari all'26.2%.

Considerazioni conclusive

Nell'ambito della presente ricerca si è valutata la effettiva corrispondenza tra i dati energetici stimati dalla simulazione effettuata con il software Trnsys e i dati reali di consumi elettrici e di gas provenienti da bollette di un edificio storico di riferimento nel comune di Roma e, più in generale, rappresentativo della zona climatica Centro Italia (zona D).

L'edificio Palazzo Theodoli risulta essere un edificio con un involucro edilizio non prestante dal punto di vista energetico ma dotato di un efficiente e complesso sistema di riscaldamento/raffrescamento basato su un numero molto elevato di sistemi energetici per la generazione del calore e del freddo.

Al fine di validare il modello energetico implementato sono stati confrontati i consumi di energia elettrica e termica simulati con i valori di assorbimento di energia elettrica e consumo di gas riportati nelle bollette degli anni 2015/2016/2017.

Dai risultati del confronto evince che rispetto alle bollette si ha uno scostamento dai valori reali medi mensili rispetto a quelli ottenuti dalle simulazioni di circa il 12% e scostamenti massimi intorno al 20%. Il motivo di questo scostamento potrebbe essere dovuto all'intervento di fattori di cui non è stato possibile tenere conto (es. lavori di ristrutturazione. etc.).

Quindi, valutando questi scostamenti accettabili per tale tipo di modellazione, si ritiene che il modello implementato sia valido e rappresentativo per la categoria di edificio considerato.

Tramite l'intervento proposto di installazione di un impianto FV da 16.2 kWp, integrato con l'implementazione di un sistema di gestione e controllo vengono rispettati i requisiti di consumo di energia termica da fonte rinnovabile e di consumo di energia elettrica da fonte rinnovabile.

L'analisi costi benefici condotta su gli interventi proposti evidenzia che il migliore risulta essere l'efficientamento del sistema di gestione e controllo, presentando un VAN positivo, maggiore di 400 mila euro e un I.Pr di 19.59.

Riferimenti bibliografici

1. TRNSYS Program Guide: Multizonal Building. Madison. USA: University of Wisconsin-Madison, 2018.
2. Meteotest, "Meteonorm Version 6.0, Part II:Theory", Handbook, Aprile 2010. Solar Energy Laboratory.
3. D.M. 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici".
4. D.P.R. 14 gennaio 1997, Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento alle regioni e alle province autonome di Trento e di Bolzano, in materia di requisiti strutturali, tecnologici ed organizzativi minimi per l'esercizio delle attività sanitarie da parte delle strutture pubbliche e private Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale 20 febbraio 1997, n. 42, S.O.
5. Norma UNI/TS 11300: "Prestazioni energetiche degli edifici".
6. Ente Italiano di Normazione. UNI 12464: Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni. Milano: UNI. 2013.
7. ISO 7730, "Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria", third edition, ISO, Geneva, 2005.
8. UNI 10349:2016, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata.
9. G. Guido Dell'Osso e A. Pierucci. Building automation e sostenibilità in edilizia. Milano: Maggioli Editore, 2013.

Breve curriculum scientifico dei membri del gruppo di lavoro

Fabrizio Cumo, professore di fisica tecnica ambientale presso la Facoltà di architettura di Roma Sapienza dal 2015 direttore del centro di ricerca interdipartimentale CITERA dal 2105 Presidente del corso di laurea triennale in Gestione del Processo edilizio della facoltà di Architettura dal 2015 Direttore del Master BIM (Building Integrated Modelling).

Autore di circa 150 pubblicazioni su riviste e memorie di congressi internazionali e nazionali riguardanti la sostenibilità ambientale, l'energetica e la fisica tecnica ambientale (qualità dell'aria interna, trasmissione del calore, illuminotecnica)

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). Docente del corso Technical System per il corso di Laurea di Architettura Restauro. Ha svolto supporto alla didattica per i corsi di Aerodinamica, Gasdinamica, Fisica Tecnica, Edifici Ecosostenibili e Progettazione delle Smart Cities. 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.

Daniele Groppi, nato a Roma nel 1991, è dottorando di ricerca nel corso di dottorato Energia e Ambiente presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica - DIAEE. Laureato in ingegneria energetica con specializzazione su fonti di energia rinnovabili con il voto di 110 e lode/110. Ha collaborato al progetto europeo PRISMI (Promoting RES Integration in Small Mediterranean Islands) nell'ambito del quale si è occupato della raccolta ed analisi dei dati, la creazione e analisi di scenari energetici per ottimizzare l'introduzione di generatori di energia da fonti rinnovabili nell'isola di Favignana. Svolge inoltre attività di consulenza in ambito di efficienza energetica in edifici residenziali e non.

Barbara de Lieto Vollaro, nata a Roma nel 1988, è dottoranda di ricerca presso il dipartimento di ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE). Laureata in Architettura (2015) con votazione di 110 e lode/110, Master di I livello in BIM "Building Information Modeling" (2016). Collaboratrice al progetto GISFER, analizzando dati provenienti da database su impianti ad energia solare della regione Lazio; Collaboratrice per il centro Citera; Collaboratrice ad un progetto ENEA nel BIM nella progettazione impiantistica.