



Ricerca di Sistema elettrico

Misure energetiche di un edificio a elevate prestazioni. Confronto tra dati derivanti da calcolo e dati effettivi

F. Cumo, F. Nardecchia, A. D'Angelo, B. De Lieto Vollaro, C. Romeo

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

F. Cumo, F. Nardecchia, 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 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Misure energetiche di in edificio a elevate prestazioni. Confronto tra dati derivanti da calcolo e dati effettivi

Responsabile del Progetto: ing. Luciano Terrinoni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Monitoraggio e misure energetiche di in 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	4
2	INTRODUZIONE	6
3	IL CASO STUDIO: BANCO NAPOLI	7
3.1	CARATTERIZZAZIONE DEL CASO STUDIO	9
3.1.1	<i>Involucro</i>	11
3.1.2	<i>Impianti elettrici</i>	13
3.1.3	<i>Sistemi di climatizzazione invernale/estiva</i>	13
3.1.3.1	Centrale termica	14
3.1.3.2	Centrale di condizionamento.....	15
3.1.3.3	UTA	17
3.1.3.4	Unità Multi a espansione diretta	17
3.1.3.5	Terminali di utenza	18
3.1.4	ACS	18
3.2	L'EFFICIENTAMENTO DEL SISTEMA EDIFICIO IMPIANTO DEGLI EDIFICI DELLA P.A.....	20
3.2.1	<i>Edifici a energia quasi zero (nZEB)</i>	20
3.2.2	<i>La diffusione degli nZEB in Italia</i>	26
3.2.3	<i>Requisiti da rispettare per la trasformazione del caso studio in nZEB</i>	29
4	MODELLAZIONE DELLO STATO DI FATTO PER LA VALUTAZIONE DELLE PERFORMANCE ENERGETICHE DELL'EDIFICIO	30
4.1	IL MODELLO SU TRNBUILD.....	30
4.1.1	<i>Le zone termiche</i>	30
4.1.2	<i>Definizione dei pacchetti murari e finestre</i>	35
4.1.3	<i>Definizione dei carichi termici interni</i>	36
4.1.4	<i>Occupancy</i>	36
4.1.5	<i>Illuminazione ed apparecchiature elettriche</i>	37
4.1.6	<i>Ricambi d'aria</i>	38
4.1.7	<i>Impianto di climatizzazione</i>	38
4.1.8	<i>Outputs del modello TRNBuild</i>	39
4.2	FABBISOGNO TERMICO ED ELETTRICO EDIFICIO	39
4.2.1	<i>Ventilazione</i>	41
4.2.2	<i>Impianto termico</i>	43
4.2.3	<i>Definizione degli output</i>	43
5	ANALISI ENERGETICA DELLO STATO DI FATTO	45
5.1	DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA TERMICA	45
5.2	GENERAZIONE DELL'ENERGIA TERMICA	52
5.3	CONFRONTO CON CONSUMI REALI: PARTE ELETTRICA.....	56
5.4	CONFRONTO CON CONSUMI REALI: PARTE GAS	63
6	IDENTIFICAZIONE E ANALISI ENERGETICA DEI POSSIBILI INTERVENTI DI RETROFIT E DEFINIZIONE DEI RELATIVI COSTI.....	67
6.1	FOTOVOLTAICO.....	69
6.2	CLASSIFICAZIONE NZEB INTERVENTI DI RETROFIT	75
7	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	77
8	APPENDICE	78
8.1	RIASSUNTO ZONE TERMICHE	78
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	80

1 Sommario

L'obiettivo di questo lavoro è stato 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 rappresentativo delle tipologie di edifici vincolati uso uffici della PA come edificio storico di riferimento nel comune di Roma e, più in generale, rappresentativo della zona climatica Centro Italia (zona D).

Si è partiti dalla 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, procedendo quindi alla raccolta dei dati relativi all'edificio selezionato attraverso analisi del materiale documentale disponibile, sopralluoghi, colloqui col personale e monitoraggio dei contatori.

È stata conseguentemente redatta 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 poi confrontati i risultati della simulazione con i dati dei consumi reali provenienti dall'analisi di tre anni di bollette energetiche (elettriche e gas) normalizzate con i dati climatici degli anni corrispondenti, 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 all'1,5% e scostamenti massimi intorno al 3%.

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) da porre in essere per la trasformazione in nZEB dell'edificio, valutandone non solo la fattibilità tecnica, ma anche e soprattutto quella economica.

Una volta caratterizzati gli interventi di retrofit più appropriati, è stata verificata la effettiva trasformazione in edificio a energia quasi zero (nZEB), vale a dire verificchino il contemporaneo rispetto di tutte le norme tecniche vigenti in materia di NZEB per edifici della P.A.

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

First it has been identified a case study representative of a kind of buildings in use of P.A. as offices, with historical and environmental constrain, located in the municipality of Rome and, more generally, representative of the Central Italy climate zone (zone D).

We started from the analysis of the real behaviour and energy consumption of the building, consisting of the whole external envelope and all the technological systems and devices that are located inside it, proceeding therefore to the collection of data through analysis of available documentary material, inspections, interviews with personnel and monitoring of meters.

Consequently, an energy simulation has been performed evaluating all the energy end uses of both thermal and electric energy, in summer and in winter, subdividing consumption into the most significant categories. The simulation results were compared with the real consumption data coming from the analysis of three years of energy bills (electricity and gas) normalized with the climatic data of the corresponding years, to assess 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 deviations of around 1.5% and maximum deviations of around 3%. On the basis of the positive results obtained, the model was used to complete the energy diagnosis by hypothesizing technical improvements (essentially on HVAC plants and on the increase of energy production from renewable sources) to be realized for the transformation into nZEB of the building, evaluating not only technical feasibility, but also and above all economic feasibility.

Once the most appropriate retrofit interventions have been characterized, the real transformation into an almost zero energy building (nZEB) has been verified, evaluating the simultaneous compliance with all the technical standards and regulations concerning NZEB for Public Administration buildings.

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 2016, per quanto attiene all'Area D "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", tema di ricerca "D.2 Edifici a energia quasi zero (nZEB)", progetto D.2.1 "Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)", obiettivo "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: Banco Napoli

Il palazzo, compreso tra via del giardino Theodoli, via del Parlamento e via del Corso, è attualmente sede degli uffici amministrativi della camera dei deputati e conserva ancora, nell'ampio salone centrale al piano terra, gli antichi sportelli bancari del banco di Napoli di cui era sede.

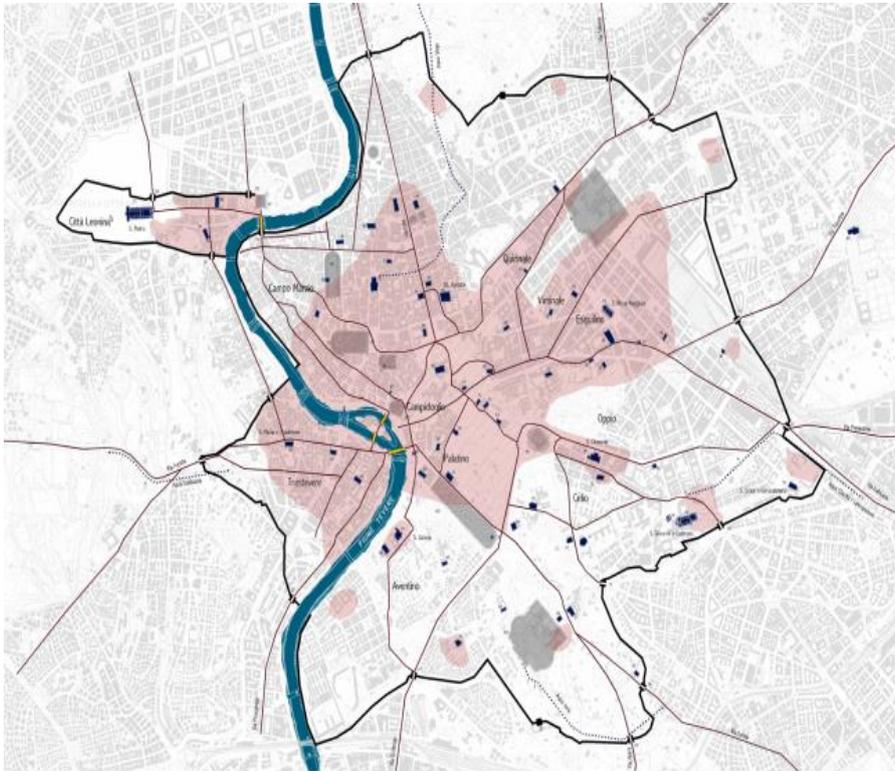


Figura 1: Ubicazione Palazzo Banco Napoli

L'edificio si colloca ad un'altitudine di 20 metri sul livello del mare, ad una latitudine nord di 41°53' e una longitudine est di 12°28'.

Il Banco di Napoli si inserisce all'interno della città storica rientrando 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 medioevale" (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.

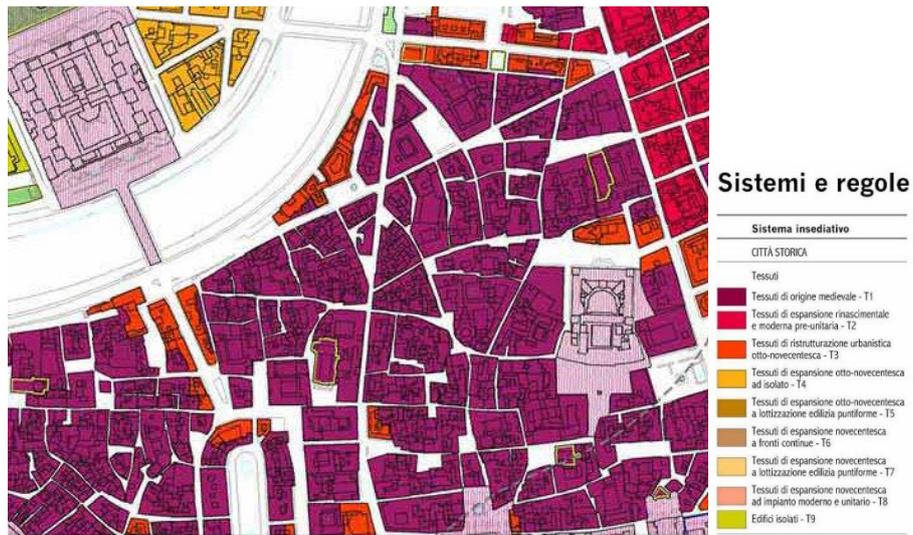


Figura 2: Tessuto urbanistico in cui ricade il Palazzo Banco Napoli

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 3: Vista dell'edificio

3.1 Caratterizzazione del caso studio

L'edificio preso in esame risulta abbastanza semplice dal punto di vista impiantistico.

Essendo però un bene di notevole interesse storico, e quindi soggetto a vincoli di vario tipo, gli interventi sull'intero sistema edificio-impianto devono essere pianificati in una visione strategica, che tenga conto dell'elevato pregio del complesso, garantendone la massima efficienza dal punto di vista dei consumi energetici.

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 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 Banco Napoli

Zona Atrio ed ingresso
Zona Banca
Zona Uffici palazzo A
Zona Polizia
Zona Uffici palazzo B – C –D

PIANTA: Piano 1° A
PIANTA: Piano 2° BCD



Figura 4: Vista in pianto Piano 1°

PIANTA: Piano 2° A
PIANTA: Piano 3° BCD



Figura 5: Vista in pianto Piano 2°

PIANTA: Piano 3° A

3° A



Figura 6: Vista in pianto Piano 3°

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

Superficie in pianta netta dei piani	4673 m ²
Superficie in pianta lorda dei piani	6676 m ²
Volume netto	17636 m ³
Volume lordo	25195 m ³

3.1.1 Involucro

La struttura portate è costituita da muratura in pietra.

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.

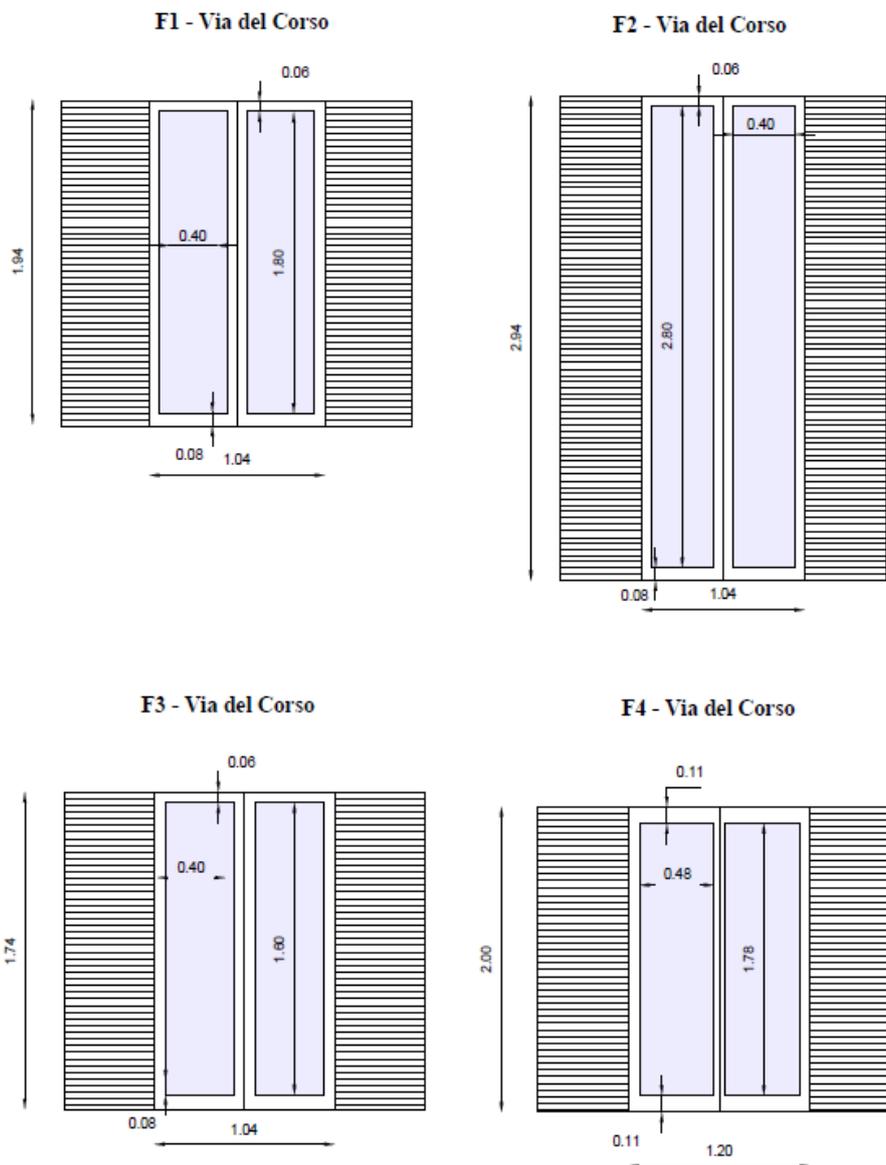


Figura 7: Abaco finestre

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 1.15 W/m²K.

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 W/m²K e si estende per una superficie totale pari a circa 1007 m².

Il solaio di copertura non isolato è costituito da pavimentazione in marmette di cemento. La trasmittanza termica è di 1.51 W/m²K

I serramenti presenti sono costituiti da doppio vetro 4 - 12 - 4 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 W/m²K.

Tutte le superfici finestrate classiche hanno schermature solari costituite da persiane.
La superficie totale degli elementi vetrati è di 450 m².

3.1.2 Impianti elettrici

Il Palazzo ex Banco Napoli è collegato alla rete elettrica locale di ACEA, con un punto di consegna in Media Tensione. La consegna avviene 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.

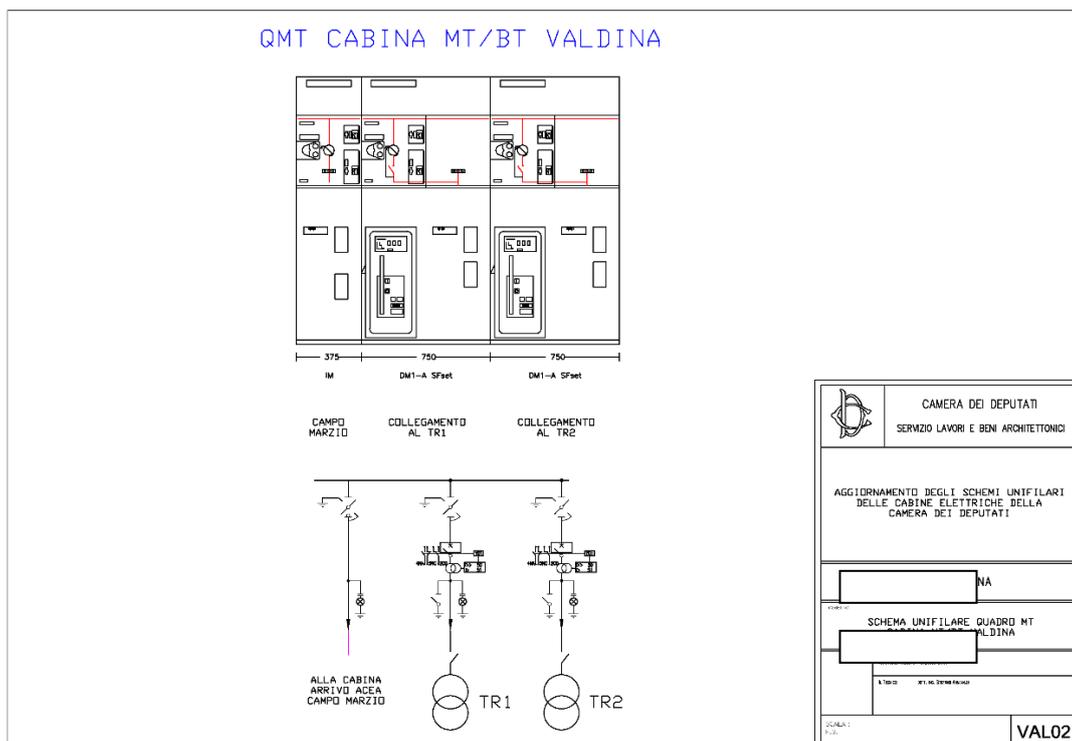


Figura 8: Schema impianto elettrico

3.1.3 Sistemi di climatizzazione invernale/estiva

Il lavoro di reperimento dati per quanto riguarda la parte impiantistica è stato condotto effettuando dei sopralluoghi con l'obiettivo di individuare gli impianti di climatizzazione e le posizioni delle UTA, la loro potenza e le zone servite dal singolo impianto.

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).

L'impianto è realizzato mediante caldaie tradizionali a gas poste sul piano di copertura dell'edificio che producono anche acqua calda sanitaria ad integrazione dei pannelli solari posizionati sul lato di via del Parlamento.

Sempre in copertura sono posizionati i gruppi frigoriferi e le 4 Unità di Trattamento Aria a servizio della Banca e degli uffici del Palazzo

3.1.3.1 Centrale termica

La centrale termica è posizionata in copertura del Palazzo corpo A in un apposito locale (Figura 9).



Figura 9: Canne fumarie

Sono presenti n.4 Caldaie tradizionali marca BONGIOVANNI tipo BONGAS 2/14 potenzialità di 263.3 kW ciascuna alimentate a Gas.

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

La modalità di termoregolazione sopraindicata presenta però alcune inefficienze e introduce diverse problematiche legate alla qualità dell'aria. Negli ambienti di lavoro serviti dai fan-coil si verifica il surriscaldamento dell'aria a causa della temperatura troppo elevata del fluido termovettore (nel caso specifico, 70 °C contro i tipici 55/50 °C).

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 3: Orari di funzionamento degli impianti di riscaldamento

Stagione invernale	Condizionamento			Riscaldamento		
	Lun-Ven	Sab.	Dom.	Lun-Ven	Sab.	Dom.
EDIFICIO A	8-19	Spento	Spento	7-13 16-19	7-13	Spento
EDIFICIO B-C-D				7-13 16-22	7-13 16-22	7-13 16-22

3.1.3.2 Centrale di condizionamento

A lato della centrale termica, sempre sul corpo di fabbrica A, lato via del Parlamento, sono posizionate le due pompe di calore che costituiscono la centrale frigorifera, modello 30RQ 0402-0129-PEE, potenza frigorifera ciascuna di 362 kW (Figura 10-11).



Figura 10: Pompe di calore



Figura 11: Pompe e le valvole di regolazione della centrale

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 nella seguente tabella.

Tabella 4: Orari di funzionamento degli impianti di raffrescamento

Stagione estiva	Condizionamento		
	Lun-Ven	Sab.	Dom.
EDIFICIO 1	8-19	Spento	Spento

3.1.3.3 UTA

Nei differenti corpi di fabbrica sono presenti in copertura 3 differenti unità di trattamento dell'aria oltre a una posizionata nei locali sotterranei.

Tabella 5: Dati caratteristici UTA

Uta Banca e Atrio A	Marca: Atisa 17.500 m ³ /h
Uta Uffici lato A	Marca: Atisa 6.000 m ³ /h
Uta Uffici lato B- C - D	Marca: Atisa 12.500 m ³ /h
Uta Sotterraneo	Marca: Atisa 6.000 m ³ /h



Figura 12: Particolare Uta Uffici B-C-D

3.1.3.4 Unità Multi a espansione diretta

Sono presenti 3 impianti VRF dislocati su due corpi dell'edificio a servizio dell'atrio, dei locali Polizia e dell'area di controllo visitatori.

Tabella 6: Dati caratteristici VRF

Pompa di calore VRF DAIKYN impianto cabine elettriche	35 kwf	35kwt	Uta 3 uffici lato A
Pompa di calore VRF PANASONIC impianto ingresso principale	22 kwf	22 kwt	Uta 4 sotterraneo
Pompa di calore VRF PANASONIC impianto uffici pubblica sicurezza	22 kwf	22 kwt	Uta Uffici Polizia

Nella figura seguente sono riportate le unità esterne a servizio dei locali Polizia.

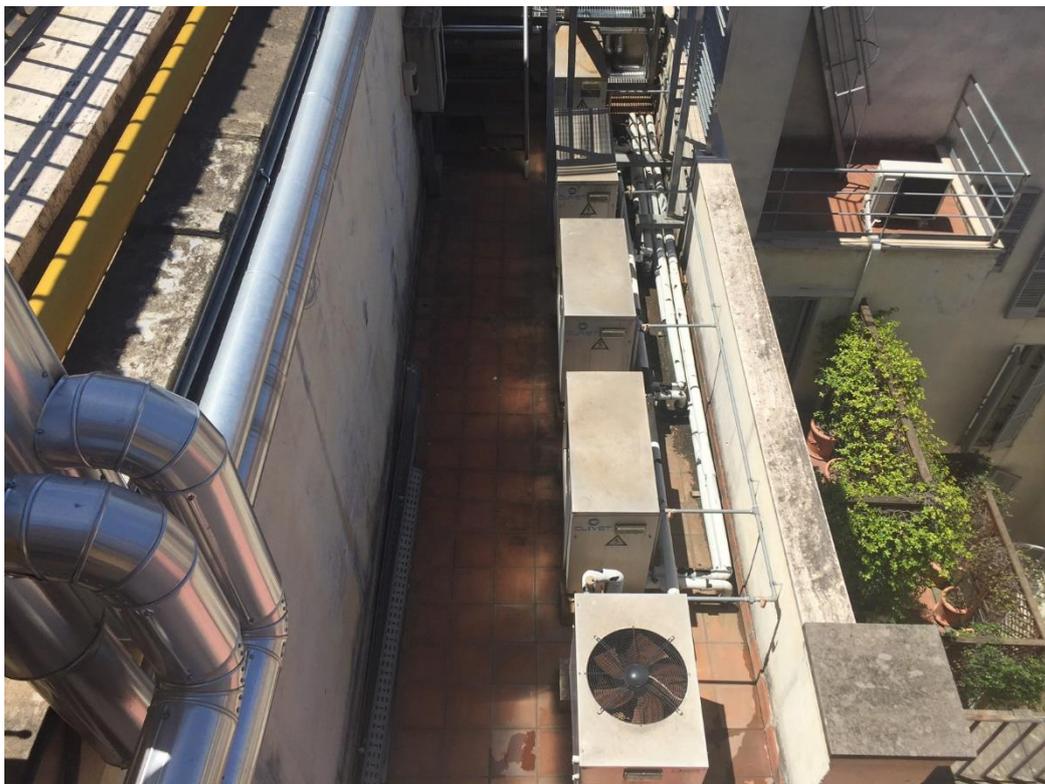


Figura 13: Unità esterne

3.1.3.5 Terminali di utenza

All'interno dello stabile 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.

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.

3.1.4 ACS

La produzione di Acqua Calda Sanitaria avviene presso la centrale termica in copertura integrata da un sistema di 13 collettori solari riportati in figura.

La superficie totale dei collettori è di 26 m² con una produzione complessiva di circa 4000 kWh annui.



Figura 14: Collettori solari

3.2 *L'efficiamento del sistema edificio impianto degli edifici della P.A.*

La prestazione energetica di un edificio è determinata considerando tutti i servizi energetici (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, acqua calda sanitaria, ed illuminazione artificiale e trasporto di persone o cose limitatamente - queste ultime - agli edifici non residenziali).

Il calcolo della prestazione energetica può essere eseguito con differenti algoritmi e metodologie, a seconda dei dati disponibili e della precisione richiesta. Appare evidente che, al crescere della complessità dell'algoritmo, l'approssimazione dei risultati migliora.

La legislazione vigente (Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015) prevede per il calcolo della prestazione energetica negli edifici, ivi incluso l'utilizzo delle fonti rinnovabili, l'utilizzo delle seguenti norme tecniche nazionali, predisposte in conformità allo sviluppo delle norme EN a supporto della direttiva 2010/31/UE:

- a. UNI/TS 11300-1 (2 ottobre 2014) - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale;
- b. UNI/TS 11300-2 (2 ottobre 2014) - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione e l'illuminazione;
- c. UNI/TS 11300-3 (2010) - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;
- d. UNI/TS 11300-4 (2012) - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria;
- e. UNI/TS 11300-5 (31 marzo 2016) - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e dalla quota di energia da fonti rinnovabili;
- f. UNI/TS 11300-6 (31 marzo 2016) - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori e scale mobili;
- g. UNI EN 15193 - Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione.

Nella maggior parte dei casi, il calcolo del fabbisogno energetico viene eseguito con l'obiettivo di arrivare ad una valutazione standardizzata dei fabbisogni e ad una classificazione certificata dell'edificio dal punto di vista energetico. È quindi importante che i procedimenti di calcolo abbiano non solo una validità scientifica riconosciuta ma anche una validità legale.

Per scopi di ricerca o per arrivare ad una valutazione dei fabbisogni energetici più precisa, in funzione delle reali modalità di occupazione dell'edificio, si può ricorrere a metodi più sofisticati di simulazione, che prevedono una modellazione dinamica.

3.2.1 *Edifici a energia quasi zero (nZEB)*

Con il termine Edifici ad Energia Quasi Zero (nearly Zero Energy Buildings, nZEB) si vuole indicare generalmente una categoria di edifici ad elevatissima prestazione energetica, caratterizzati da un fabbisogno energetico annuo molto basso o quasi nullo, coperto interamente, o in misura molto significativa, da fonte rinnovabile in loco.

La dicitura energia zero fa quindi riferimento al fatto che tali edifici non debbano ricorrere all'utilizzo di combustibili fossili o all'energia elettrica proveniente dalla rete, per far fronte ai loro bisogni energetici, caratterizzandosi, pertanto, per un consumo di energia primaria non rinnovabile pari a zero.

Poiché gli edifici sono normalmente allacciati alle reti esterne di fornitura dell'energia (gas, elettricità) e in considerazione della natura discontinua delle fonti rinnovabili, ciò che è pari a zero non è in realtà il consumo di energia primaria non rinnovabile, ma il bilancio tra l'energia prelevata e quella autoprodotta, consumata direttamente o immessa in rete.

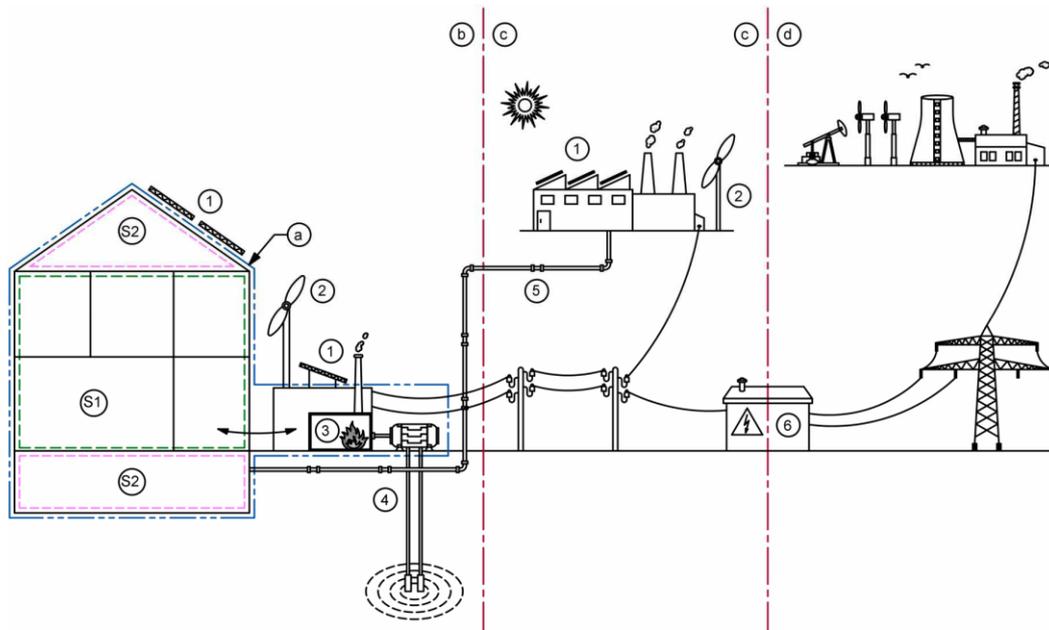


Figura 15: confini per la valutazione energetica.

Ai sensi del D.M. 26 giugno 2015, sono edifici a energia quasi zero (nZEB) tutti gli edifici, siano essi di nuova costruzione o esistenti, per cui sono contemporaneamente rispettati:

- tutti i requisiti previsti per le nuove costruzioni (con i valori vigenti dal 1/1/2019 per gli edifici pubblici e dal 1/1/2021 per tutti gli altri edifici);
- gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto del D.Lgs.28/2011.

La costruzione di nZEB è argomento di estrema attualità. La comunità Europea ha adottato il 29 luglio 2016 la Raccomandazione R-UE 2016/2018 con l'obiettivo di promuovere la realizzazione di nZEB, indicando chiaramente che entro il 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere nZEB.

La raccomandazione traccia i principi e gli elementi generali da prendere in considerazione ed evidenzia che il livello di prestazione a energia quasi zero per gli edifici di nuova costruzione deve essere superiore a quello ottimale in funzione dei costi per il 2021.

La raccomandazione, in base ai dati ricevuti dai singoli Stati membri sul livello ottimale in funzione dei costi, riporta dei valori di riferimento della prestazione energetica degli edifici a energia quasi zero, in base alle proiezioni dei prezzi e delle tecnologie al 2020, per le diverse aree climatiche dell'Unione Europea.

La Commissione, infine, raccomanda agli Stati membri di sostenere la trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero, anche fornendo agli investitori pacchetti strategici che offrano loro la necessaria garanzia di stabilità a lungo termine in materia di edifici efficienti, compresa la ristrutturazione in profondità degli edifici per trasformarli in edifici a energia quasi zero, e di raccogliere dati affidabili per controllare l'impatto delle politiche adottate.

Entro il 2021, tutti gli edifici nuovi o soggetti a una ristrutturazione importante di primo livello dovranno essere a fabbisogno di energia quasi zero. Per i nuovi edifici pubblici, comprese le scuole, la scadenza è anticipata al 2019.

La realizzazione di edifici nZEB e la trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero troveranno attuazione grazie ad un deciso miglioramento delle prestazioni passive dell’involucro edilizio, ad un deciso miglioramento dell’efficienza degli impianti e all’introduzione di fonti rinnovabili di energia nel bilancio energetico dell’edificio.

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

I Decreti attuativi, introdotti dal D.L. n. 63/2013, emanati il 26 giugno 2015 ed entrati in vigore il 1 ottobre 2015 (fatta eccezione per il terzo decreto, contenente i modelli della relazione ex. L. n. 10/91, entrato in vigore il 16 luglio 2015), hanno completato il recepimento della Direttiva Europea, definendo parametri e coefficienti di riferimento, valori limite da rispettare e modalità di calcolo.

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

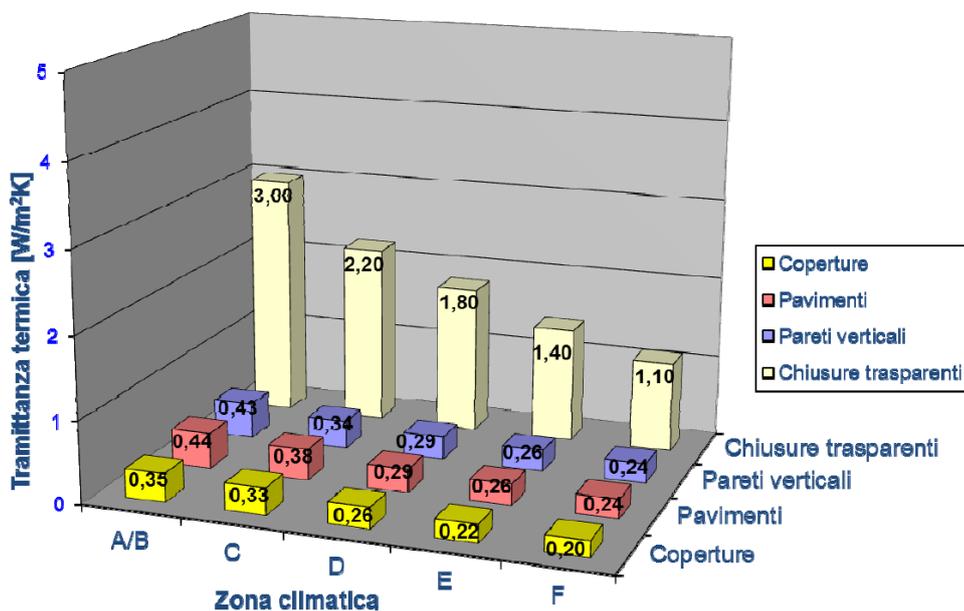


Figura 16: Trasmittanza termica dell’edificio di riferimento 2019/2021

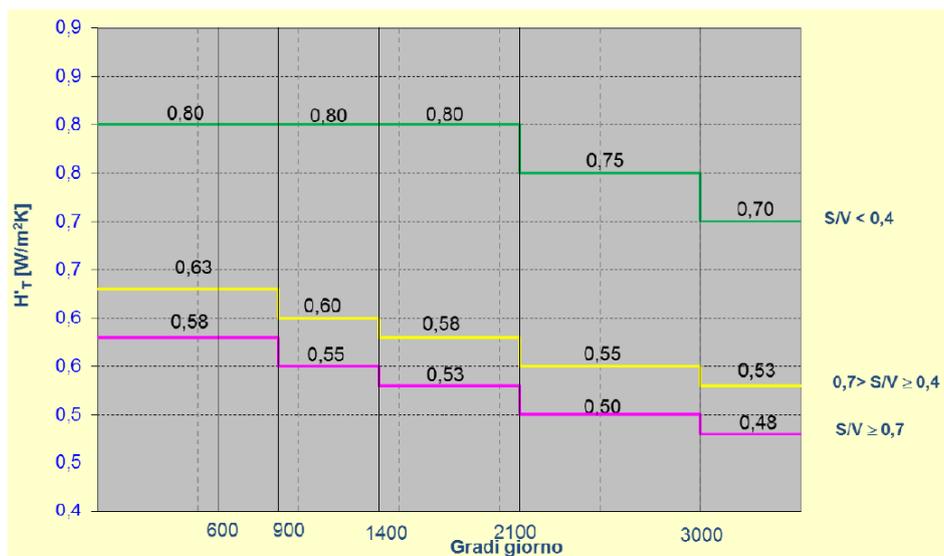


Figura 17: Valore massimo ammissibile del coefficiente globale di scambio termico

Per gli impianti da considerare per l'edificio di riferimento, in assenza di uno specifico servizio energetico nell'edificio reale il Decreto Requisiti Minimi indica di non considerare il fabbisogno di energia primaria per quel servizio.

L'edificio di riferimento si considera pertanto dotato degli stessi impianti di produzione di energia dell'edificio reale, assegnando un'efficienza media di riferimento sia per i sottosistemi di utilizzazione dell'edificio di riferimento sia per i sottosistemi di generazione. Inoltre, l'edificio di riferimento si considera dotato di sistemi di generazione per i servizi energetici di riscaldamento invernale, condizionamento estivo e produzione acqua calda sanitaria della stessa tipologia di quelli presenti nell'edificio reale.

Noto dunque l'edificio di riferimento, come indicato nell'Allegato 1, paragrafo 3.4, negli "Edifici ad energia quasi zero", devono essere rispettati tutti i requisiti riportati all'allegato 1, paragrafo 3.3, comma 2, lettera b), che prevedono due distinte modalità di verifica:

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

Tabella 7: Efficienze medie dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e la produzione di energia elettrica in situ (Tabella n. 8, Appendice A, D.I. requisiti Minimi).

SOTTOSISTEMI DI GENERAZIONE	PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA			PRODUZIONE DI ENERGIA IN SITU
	H	C	W	
Generatore a combustione liquido	0.82	-	0.80	-
Generatore a combustione gassoso	0.95	-	0.85	-
Generatore a combustione solido	0.72	-	0.70	-
Generatore a biomassa solida	0.72	-	0.65	-
Generatore a biomassa liquida	0.82	-	0.75	-
Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3.00	(*)	2.50	-
Macchina frigorifera a compressione di vapore con motore elettrico	-	2.50	-	-
Pompa di calore ad assorbimento	1.20	(*)	1.10	-
Macchina frigorifera a fiamma indiretta	-	$0.60 \cdot \eta_{gen}$ (**)	-	-
Macchina frigorifera a fiamma diretta	-	0.60	-	-
Pompa di calore a compressione di vapore a motore endotermico	1.15	1.00	1.05	-
Cogeneratore	0.55	-	0.55	0.25
Riscaldamento con resistenza elettrica	1.00	-	-	-
Teleriscaldamento	0.97	-	-	-
Teleraffrescamento	-	0.97	-	-
Solare termico	0.3	-	0.3	-
Solare fotovoltaico	-	-	-	0.1
Mini-eolico e mini-idroelettrico	-	-	-	(**)
NOTA: per i combustibili tutti i dati fanno riferimento al potere calorifico inferiore. (*) Per pompe di calore che prevedono la funzione di raffrescamento si considera lo stesso valore delle macchine frigorifere della stessa tipologia. (**) Si assume l'efficienza media del sistema installato nell'edificio reale.				

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

Tabella 8: Valori limite da rispettare.

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

Inoltre, il Decreto Requisiti Minimi impone agli edifici ad energia quasi zero la percentuale più gravosa di copertura del fabbisogno energetico con fonte rinnovabile. Si osserva però che tale copertura è relativa esclusivamente ai fabbisogni di riscaldamento, raffrescamento e produzione di ACS, mentre è completamente trascurato il contributo dovuto all'illuminazione, sebbene esso incida sul valore complessivo della prestazione energetica globale; sono trascurati anche altri servizi energetici: ventilazione, trasporto di cose o persone.

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

Tabella 9: Applicazione del D.Lgs. n. 28/2011, parametri limite da rispettare per edifici nZEB.

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

3.2.2 La diffusione degli nZEB in Italia

In Italia ci sono 12,1 milioni di edifici residenziali a cui si aggiungono 1,5 milioni di edifici non residenziali e il 74% è stato costruito prima degli anni '80 e solo il 32% risulta essere in ottimo stato di conservazione.

La maggior parte degli edifici è costituito da abitazioni mono e bifamiliari e quelli con almeno 9 abitazioni sono meno del 5% del totale. Secondo un'indagine – effettuata dall'Energy&Strategy Group della School of Management del Politecnico di Milano – gli edifici con sistemi ad alta efficienza nZEB (edifici a energia quasi zero) sono solo tra le 650 e le 850 unità (93% a uso residenziale), quasi tutti localizzati in Trentino Alto Adige, Lombardia e Veneto

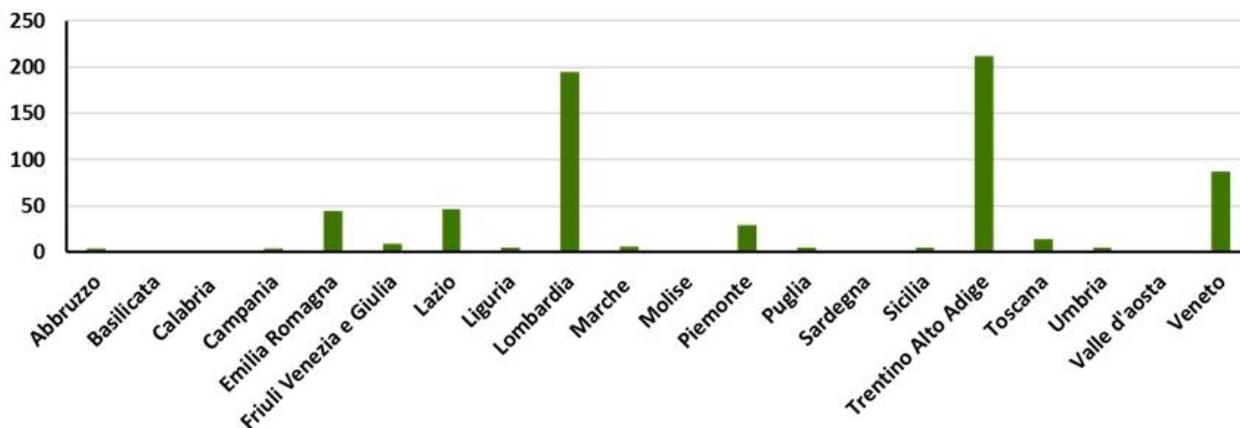


Figura 18: Diffusione degli edifici nZEB in Italia (Fonte: Energy Efficiency Report).

La motivazione della scarsa diffusione degli nZEB è innanzitutto economica, dal momento che gli alti costi per la realizzazione non vengono in generale compensati dal risparmio energetico.

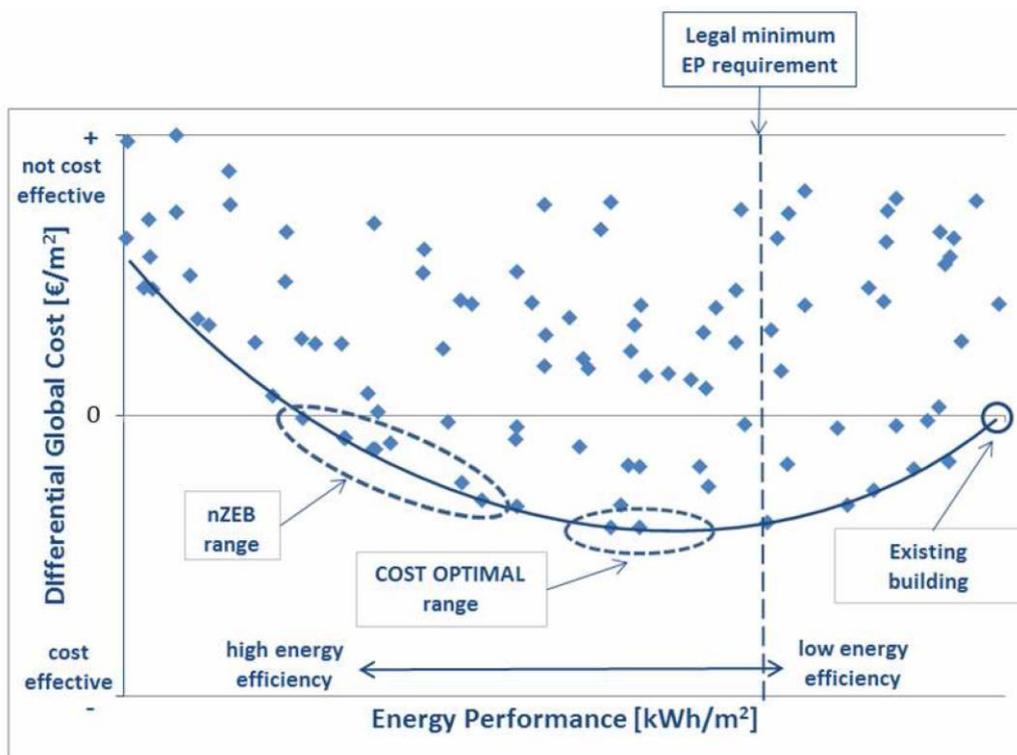


Figura 19: Confronto tra extra-costi e prestazione energetica.

Infatti, gli attuali requisiti di prestazione energetica sono stati stabiliti sulla base di un processo di ottimizzazione tra consumi energetici e costi (ai sensi del Regolamento delegato N.244/2012). Spingersi oltre, al fine di raggiungere un edificio esistente in nZEB, comporta costi maggiori che non sono interamente recuperati attraverso i risparmi energetici conseguiti. Questi aspetti, nell’attesa di un’evoluzione del mercato che porti a una riduzione dei costi, possono essere opportunamente mitigati dalla presenza di adeguati incentivi e per mezzo dell’esecuzione degli interventi in particolari occasioni (finestre d’opportunità come la concomitanza di altri lavori di ristrutturazione).

Soprattutto in assenza di incentivi i tempi di ritorno degli investimenti sono tra 30 e 40 anni per gli edifici ad uso ufficio e oltre la vita utile della costruzione per una villetta residenziale.

Inoltre deve essere ricordato che, se le soluzioni tecnologiche e innovative sono ormai decisamente collaudate, purtroppo spesso non c’è un’adeguata conoscenza poiché non c’è una ricetta unica per realizzare un edificio nZEB.

Generalmente, in un nZEB il fabbisogno di energia termica è soddisfatto dall’installazione di pompe di calore (ove possibile geotermiche) o impianti solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria, mentre il fabbisogno elettrico è soddisfatto da un impianto fotovoltaico, a volte accoppiato a un sistema di accumulo.

Il Piano d’Azione Nazionale per incrementare gli edifici a energia quasi zero (PANZEB, decreto interministeriale 19 giugno 2017), elaborato da un gruppo di lavoro composto da ENEA, RSE e CTI, con il coordinamento del Ministero dello Sviluppo Economico, riporta anche una valutazione dell’indice di prestazione energetica per alcuni edifici aventi diversa tipologia edilizia, destinazione d’uso e zona climatica e analizza i sovra costi di investimento, per gli edifici nuovi e per quelli esistenti, connessi al raggiungimento delle condizioni di nZEB.

Tabella 10: Confronto tra diverse soluzioni di edificio in termini di costi di costruzione e costi di gestione.

Tipologia di edificio	Costo di costruzione		Consumi energetici annui		PBT nZEB
	Edificio standard classe A [€/m ²]	Extra costo edificio nZEB	Edificio standard classe A [kWh/m ²]	Edificio nZEB [kWh/m ²]	
Abitazione indipendente monofamiliare	1.200 ÷ 1.600	+15% ÷ 30%	Termici: 20 ÷ 30 Elettrici: 20 ÷ 40	Totale: 15	> Vita utile
Edificio residenziale pluripiano	1.000 ÷ 1.400	+20% ÷ +25%	Termici: 20 ÷ 30 Elettrici: 20 ÷ 60	Totale: 20	> Vita utile
Edificio ad uso uffici	800 ÷ 1.200	+15% ÷ +25%	Termici: 5 ÷ 30 Elettrici: 50 ÷ 110	Totale: 45	30 – 40 anni

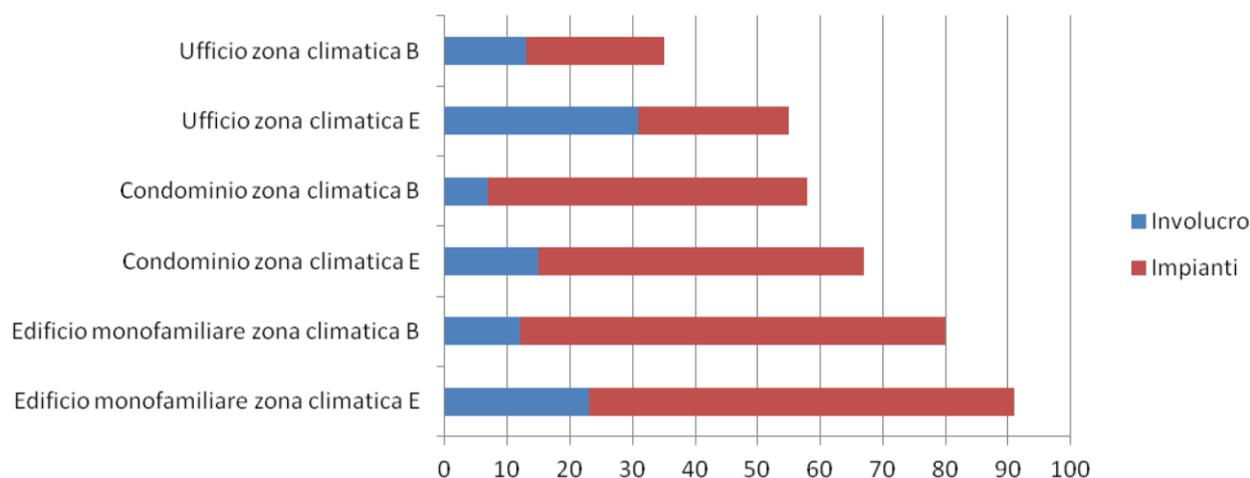


Figura 20: Costo aggiuntivo per realizzare un nuovo edificio a energia quasi zero rispetto ad un nuovo edificio che si limita alla minima osservanza della normativa vigente (€/m²). (Fonte: Allegato 1 PANZEB)

Anche per le ristrutturazioni, operando nella direzione di una trasformazione dell’edificio esistente in nZEB, si hanno dei costi aggiuntivi non inferiori a 500/600 €/m², generalmente collegati alla necessità di opere ausiliarie o indirette quali il nolo di un ponteggio, il rifacimento dei davanzali, l’adeguamento o il rifacimento delle canne fumarie, interventi sul sistema di distribuzione.

Tabella 11: Sovra costo per trasformare un edificio esistente in NZEB rispetto ad una ristrutturazione importante di primo livello. (Fonte: Allegato 1 PANZEB)

Tipologia	Edificio monofamiliare	Edificio condominiale	Edificio adibito ad ufficio
Involucro	+ 4,2%	+ 4,6%	+ 5,3%
Impianti	+ 50,2%	+ 27,4%	+ 28,1%
Totale	+ 22,0%	+ 14,6%	+ 14,0%

La definizione di interventi di riqualificazione idonei alla trasformazione di un edificio in nZEB parte quindi dalla valutazione dell’intervento ottimale di riqualificazione, ossia dell’intervento caratterizzato dal minore costo globale stimato nell’arco di un periodo di tempo, includendo sia i costi di investimento, sia di esercizio e manutenzione.

3.2.3 Requisiti da rispettare per la trasformazione del caso studio in nZEB

La tabella di seguito esposta riporta i valori da rispettare per poter qualificare l'edificio oggetto di questo studio in nZEB.

Tabella 12: Parametri nZEB

Parametri	u.m.	Requisiti
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.53
$A_{sol.est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040
η_H	[%]	≥ 81%
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 80.35
$Ep_{H.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 99.19
η_w	[%]	≥ 81%
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 18.45
$Ep_{w.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 26.35
η_c	[%]	≥ 81%
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22
$Ep_{c.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 52.77
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 15.46
Ep_v	[kWh/m ²]	≤ 22.47
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 21.15
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 165.17
$P_{el.ren}$	[kW]	≥ 35.20
$CFE_{ren.ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55
$CFE_{ren.ACS}$	[%]	≥ 55

4 Modellazione dello stato di fatto per la valutazione delle performance energetiche dell'edificio

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

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

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

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

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

4.1 Il modello su TRNBuild

Il modello è stato costruito seguendo le direttive imposte dalla norma UNI/TS 11300-1 "Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale". La normativa fornisce la definizione di edificio come "costituito da uno o più fabbricati (involucri edilizi) o da porzioni di un fabbricato, climatizzati attraverso un unico sistema di generazione". Nel caso di Banco Napoli il sistema di generazione dell'energia termica è costituito da un impianto con 4 caldaie a metano da 263 kW nominali che provvedono all'acqua calda sanitaria ed al riscaldamento del circuito dei radiatori. Gli impianti a fan coil e le batterie delle UTA sono invece alimentate da le due pompe di calore e 3 VRF precedentemente citati.

4.1.1 Le zone termiche

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

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

- a) le temperature interne di regolazione per il riscaldamento differiscono di non oltre 4K;
- b) gli ambienti non sono raffrescati o comunque le temperature interne di regolazione per il raffrescano differiscono di non oltre 4K;

- c) gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di climatizzazione;
- d) se vi è un impianto di ventilazione meccanica, almeno l'80% dell'area climatizzata è servita dallo stesso impianto di ventilazione con tassi di ventilazione nei diversi ambienti che non differiscono di un fattore maggiore di 4;
- e) se vi è il controllo dell'umidità, le umidità relative interne di regolazione differiscono non oltre 20 punti percentuali".

Seguendo tale definizione è stato possibile suddividere tutto l'edificio in 63 zone termiche, le cui caratteristiche sono riportate in Appendice (Par. 8.1).

Il dettaglio della ripartizione dell'edificio è riportato nelle planimetrie seguenti:



Figura 21: Planimetria piano interrato

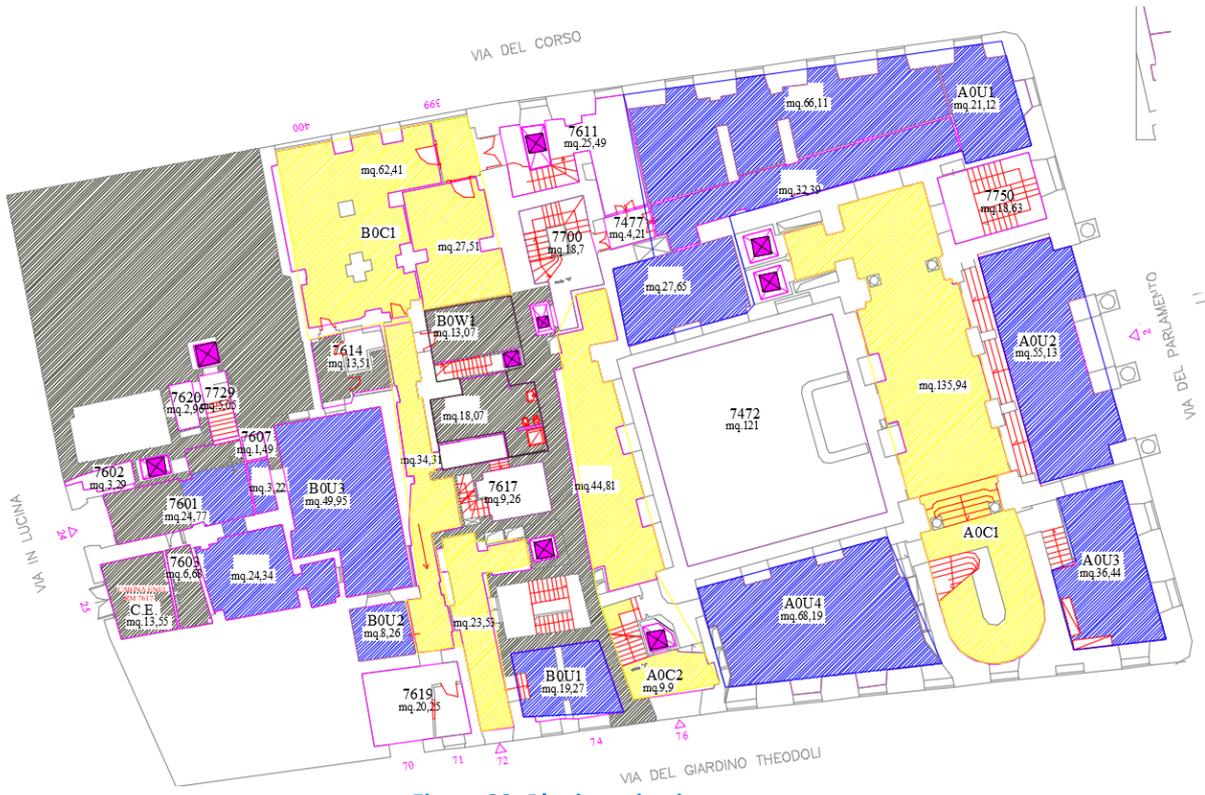


Figura 22: Planimetria piano terra

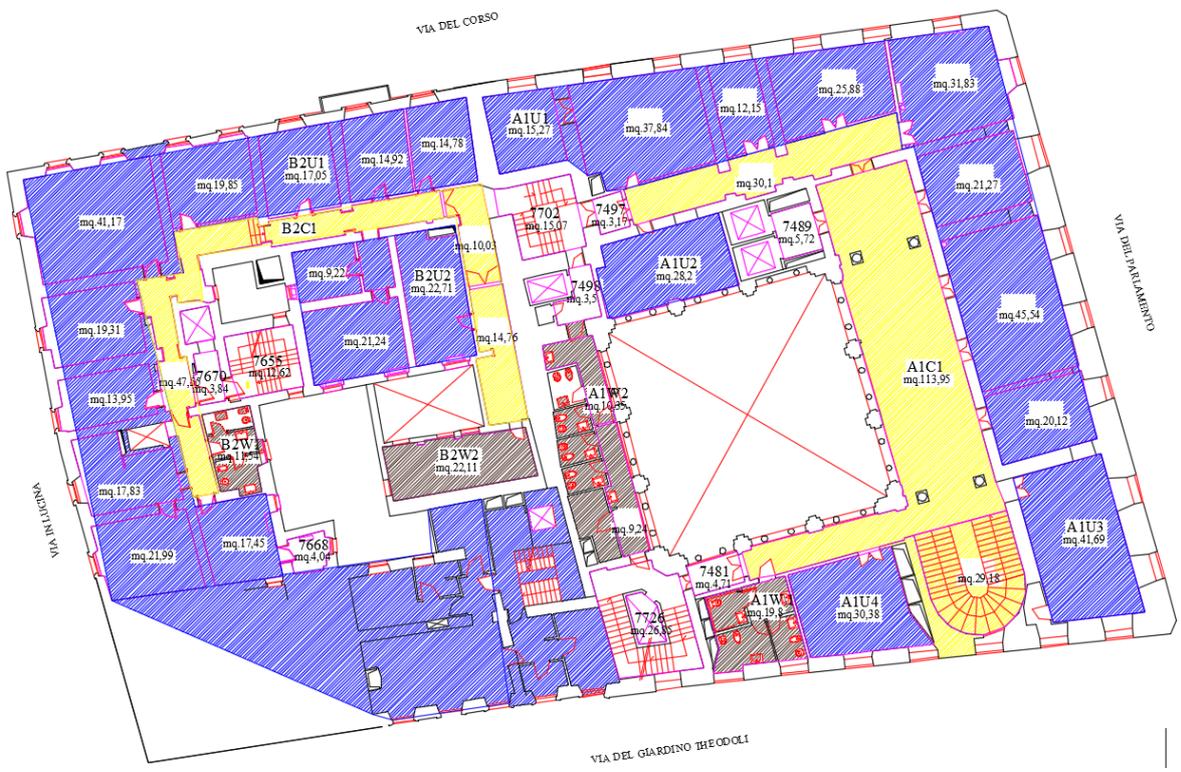


Figura 23: Planimetria piano primo

3° BCD

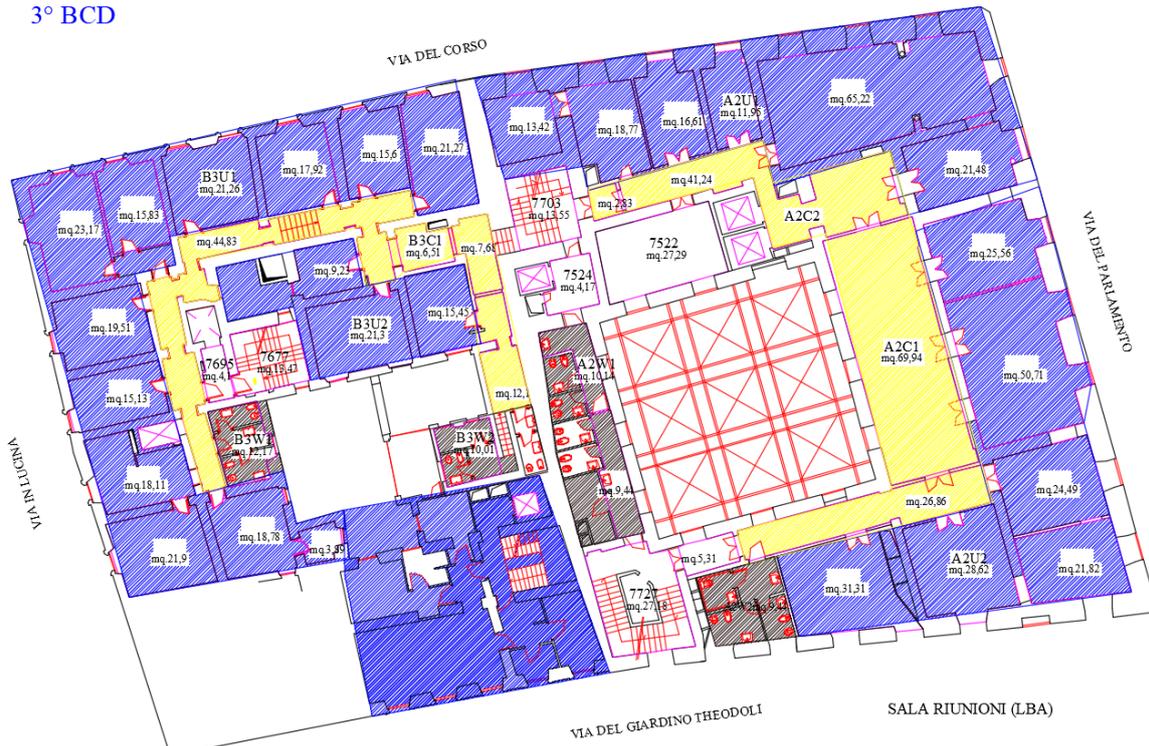


Figura 24: Planimetria piano secondo



Figura 25: Planimetria piano terzo

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

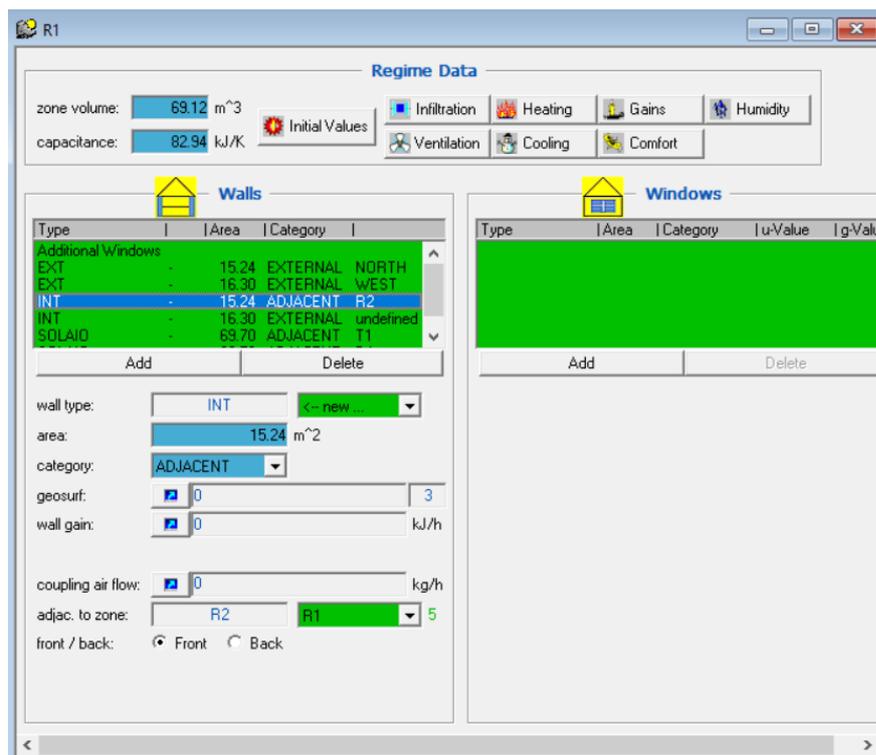


Figura 26: Interfaccia TRNSYS per la definizione dei parametri di zona

In Figura 26 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.

4.1.2 Definizione dei pacchetti murari e finestre

TRNBuild permette allo sviluppatore del modello di creare nuovi pacchetti murari che abbiano le caratteristiche desiderate, attraverso l'opzione "Wall Type Manager". Tramite il software, quindi, sono stati implementati i pacchetti murari esterni, interni, i solai interpiano, il solaio di fondazione, il tetto e le finestre che appartengono ad ogni singola zona termica.

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

Di seguito sono riportate i valori di trasmittanza dell'involucro esterno:

- Strutture opache verticali: 1.15 W/m²K;
- Solaio interpiano: 1.34 W/m²K;
- Solaio di copertura: 1.51 W/m²K;

- Pavimento verso terra: 1.08 W/m²K;
- Finestre: 3.74 W/m²K.

4.1.3 Definizione dei carichi termici interni

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

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

Il software dà la possibilità all'utente di riportare i carichi interni di una zona termica tramite l'interfaccia "Gains" riportata in Figura 27:

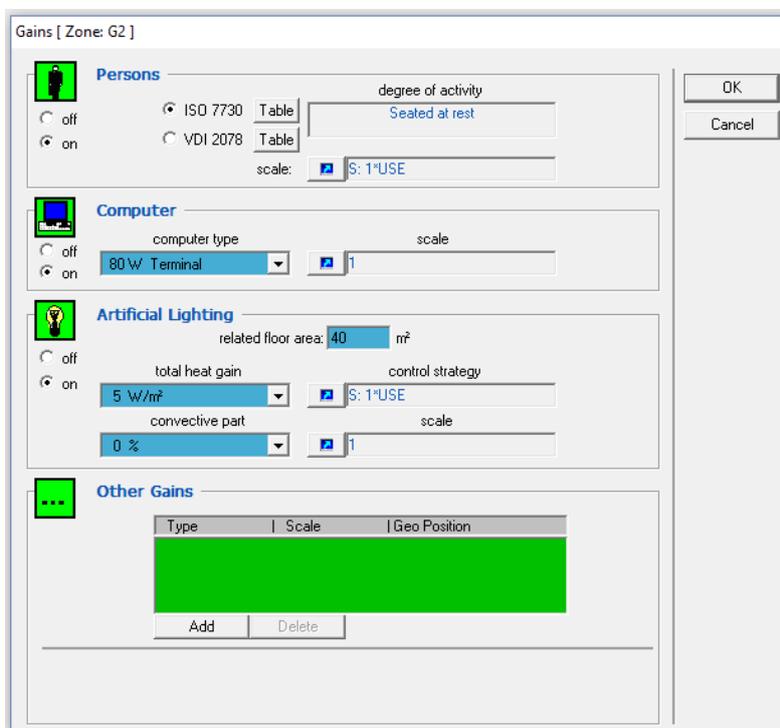


Figura 27: Interfaccia TRNBuild per la definizione dei carichi interni

Per i valori di riferimento per l'edificio dell'ex Banco di Napoli sono stati impostati mediante i seguenti valori [1]:

- Densità di potenza dovuta alle persone: 150 W/persona;
- Densità di potenza dovuta all'illuminazione: 10 W/m²;
- Densità di potenza dovuta alle apparecchiature elettroniche: 3.2 W/m².

4.1.4 Occupancy

Per definire gli apporti termici derivanti dalla presenza di persone all'interno dell'ambiente è stato necessario definire due parametri (come mostrato in Tabella 12): il tipo di attività svolta dalle persone ed il numero di persone presenti all'interno.

Tabella 12: Apporto termico derivante dall'occupancy.

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

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

Per i valori di riferimento per l'edificio dell'ex Banco di Napoli sono stati impostati mediamente i seguenti valori:

- Densità di potenza dovuta alle persone: 150 W/persona;

4.1.5 Illuminazione ed apparecchiature elettriche

Per determinare la quota parte di carichi dovuti all'illuminazione è stato moltiplicato il valore di densità di potenza installata (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 Banco Napoli 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".

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

Per i valori di riferimento per l'edificio dell'ex Banco di Napoli sono stati impostati mediamente i seguenti valori [1]:

- Densità di potenza dovuta all'illuminazione: $10 W/m^2$;
- Densità di potenza dovuta alle apparecchiature elettroniche: $3.2 W/m^2$.

4.1.6 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 m³/h.

4.1.7 Impianto di climatizzazione

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

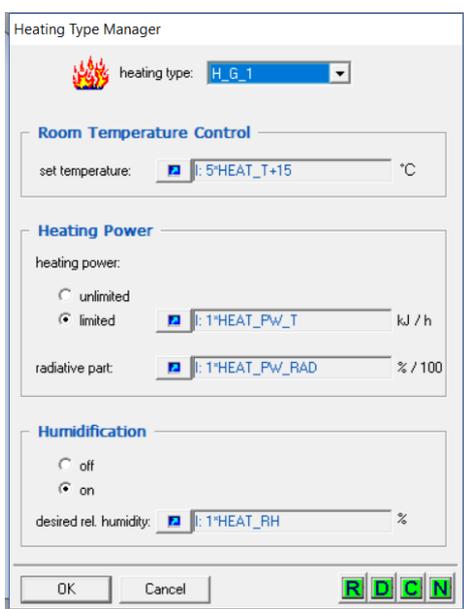


Figura 28: Interfaccia utente Heating Manager

L'interfaccia relativa al riscaldamento ed al raffrescamento è pressoché identica; tramite questa è possibile:

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

Nel modello sviluppato i valori di set point della temperatura e dell'umidità relativa, così come la potenza termica dell'impianto di riscaldamento e di raffrescamento, 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 13 sono riportati gli input al modello di Trnsys Build relativi all'impianto di climatizzazione:

Tabella 13: Input Modello TRNBuild

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

4.1.8 Outputs del modello TRNBuild

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

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

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

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

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

4.2 Fabbisogno termico ed elettrico edificio

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

È possibile suddividere il "Fabbisogno termico ed elettrico edificio" in tre macro aree (Figura 29):

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

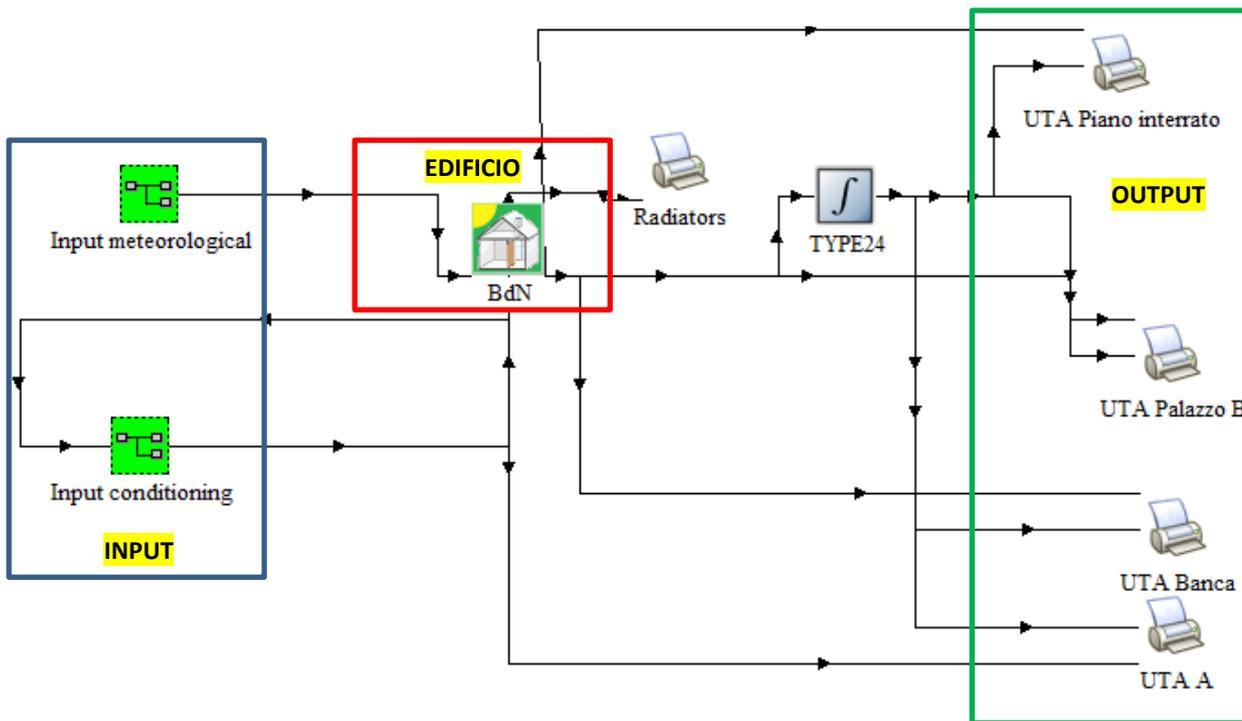


Figura 29: Fabbisogno termico ed elettrico edificio

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

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

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

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

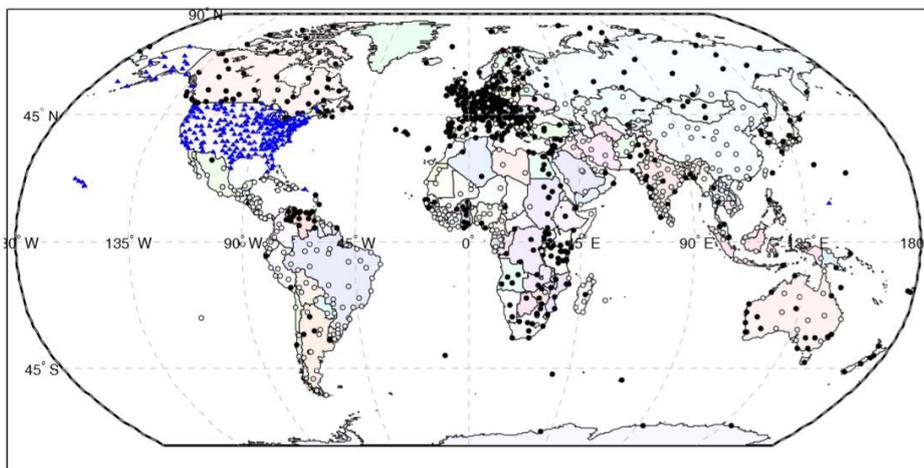


Figura 30: Dati climatici reperibili [2]

I dati climatici inseriti nel modello sono relativi a Ciampino, in quanto rappresenta la località (tra le disponibili) geograficamente più vicina alla sede di Banco Napoli. Il blocco “Input Meteorological” è mostrato in Figura 31. Tramite il “Weather Data” sono stati impostati i parametri relativi alla radiazione solare diretta e diffusa incidente sulle superfici del 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.

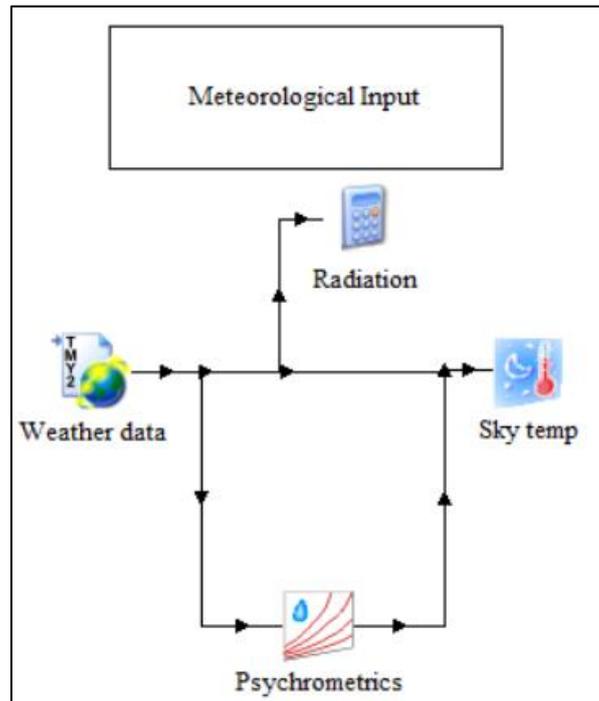


Figura 31: Modello input climatici

Come specificato precedentemente, l’impianto di climatizzazione dell’ex Banco di Napoli è di tipo “misto”, composto da 4 UTA dimensionate per garantire la qualità dell’aria all’interno dei locali condizionati e fan coils per il controllo della temperatura all’interno dell’ambiente.

4.2.1 Ventilazione

L’azione svolta dalle 4 UTA 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. I valori di aria immessa in ambiente sono ricavabili direttamente dalla tabella presente in Appendice riportante tutte le caratteristiche delle zone termiche presenti. Gli input forniti al TRNBuild impostati nel modello TRNSYS Simulation Studio sono i seguenti:

- Portata d’aria ventilante delle singole zone termiche [m³/h];
- Temperatura dell’aria immessa in ambiente [°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 [m³/h];
- Diffusori = 150 [m³/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 32 è riportato l'interfaccia di TRNBuild che permette di impostare i valori di portata immessa.

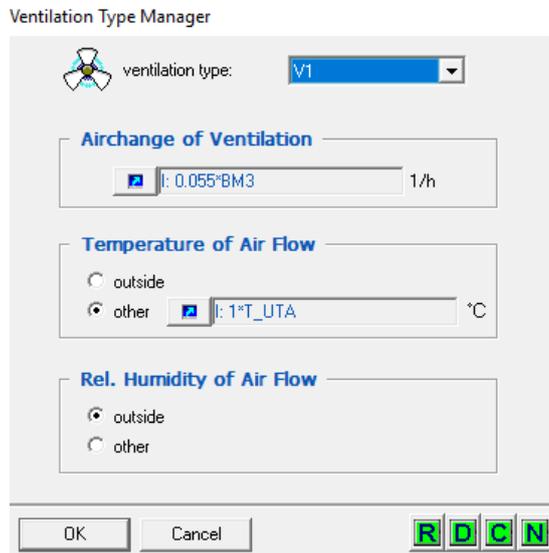


Figura 32: Interfaccia TNBuild Ventilation Type Manager

La temperatura dell'aria immessa in ambiente tramite l'UTA è stata fatta variare in funzione della stagione tramite l'input riportato in Figura 33.

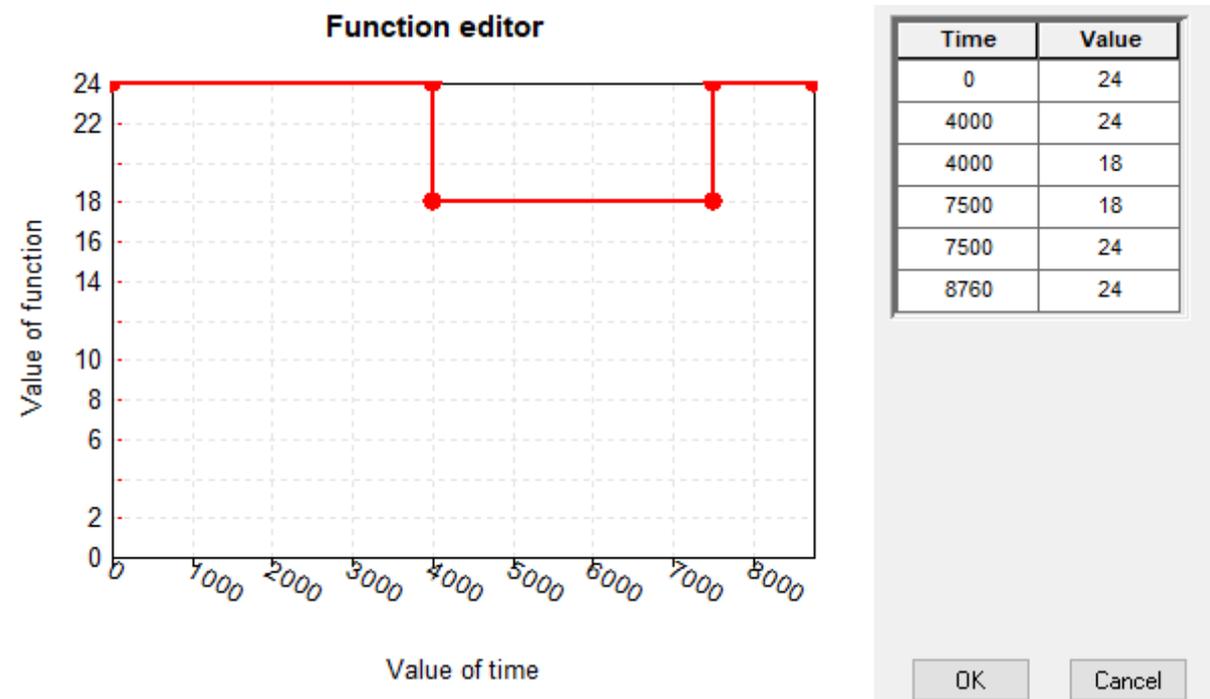


Figura 33: Input di temperatura dell'aria immessa con le UTA

4.2.2 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 nei locali sanitari. I Fan Coils sono stati simulati utilizzando il Type 91 presente nella libreria TRNSYS 16.

Essendo presenti varie tipologie di Fan Coil all'interno dell'edificio è stato necessario implementare ogni differente modello mettendolo successivamente in comunicazione con l'ambiente da climatizzare.

Le caratteristiche nominali dei diversi Fan Coils sono riportate in Tabella 14.

Tabella 14: Caratteristiche Fan Coils

FAN COIL	PORTATA D'ARIA [kg/h]	PORTATA ACQUA* [kg/h]
FCB	625	523
FCC	450	375
FCC1	450	395
FCD	550	430
FCE	560	435
FCF	780	675

In Figura 34 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.

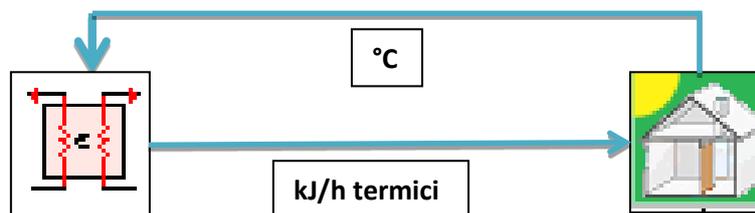


Figura 34: Schema logico di funzionamento del modello

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.

4.2.3 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;
- 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'anidrite carbonica prodotta dal riscaldamento e dal raffrescamento. La CO₂ prodotta dal riscaldamento è stata calcolata a partire dall'energia primaria (E_{primaria}), consumata in caldaia ottenuta maggiorando il consumo di energia termica per il riscaldamento (E_{risc}) tramite il rendimento della caldaia (η) attualmente presente:

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

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:



5 Analisi energetica dello stato di fatto

Nel seguente paragrafo verranno illustrati i risultati ottenuti con il modello precedentemente illustrato relativi allo stato di fatto dello stabile oggetto dello studio. L'analisi condotta analizzerà i consumi derivanti dal condizionamento degli ambienti evidenziando la ripartizione dei consumi elettrici e termici tra le varie zone termiche. I risultati ottenuti verranno successivamente confrontati con i consumi fatturati in bolletta.

5.1 Distribuzione dell'energia termica

Come precedentemente illustrato l'impianto di condizionamento dell'aria è un impianto a "Tutt'aria" misto con fan coil a quattro tubi posti in ogni locale ad esclusione dei servizi. In Figura 35 e Figura 36 è riportata l'energia termica oraria fornita all'edificio tramite i fan coils durante in modalità riscaldamento e raffrescamento. Dai grafici è possibile notare come la durata del periodo di riscaldamento sia superiore a quella del raffrescamento, ma d'altra parte il picco di potenza frigorifera (circa 280 kW) sia nettamente superiore al picco di potenza termica (circa 190 kW).

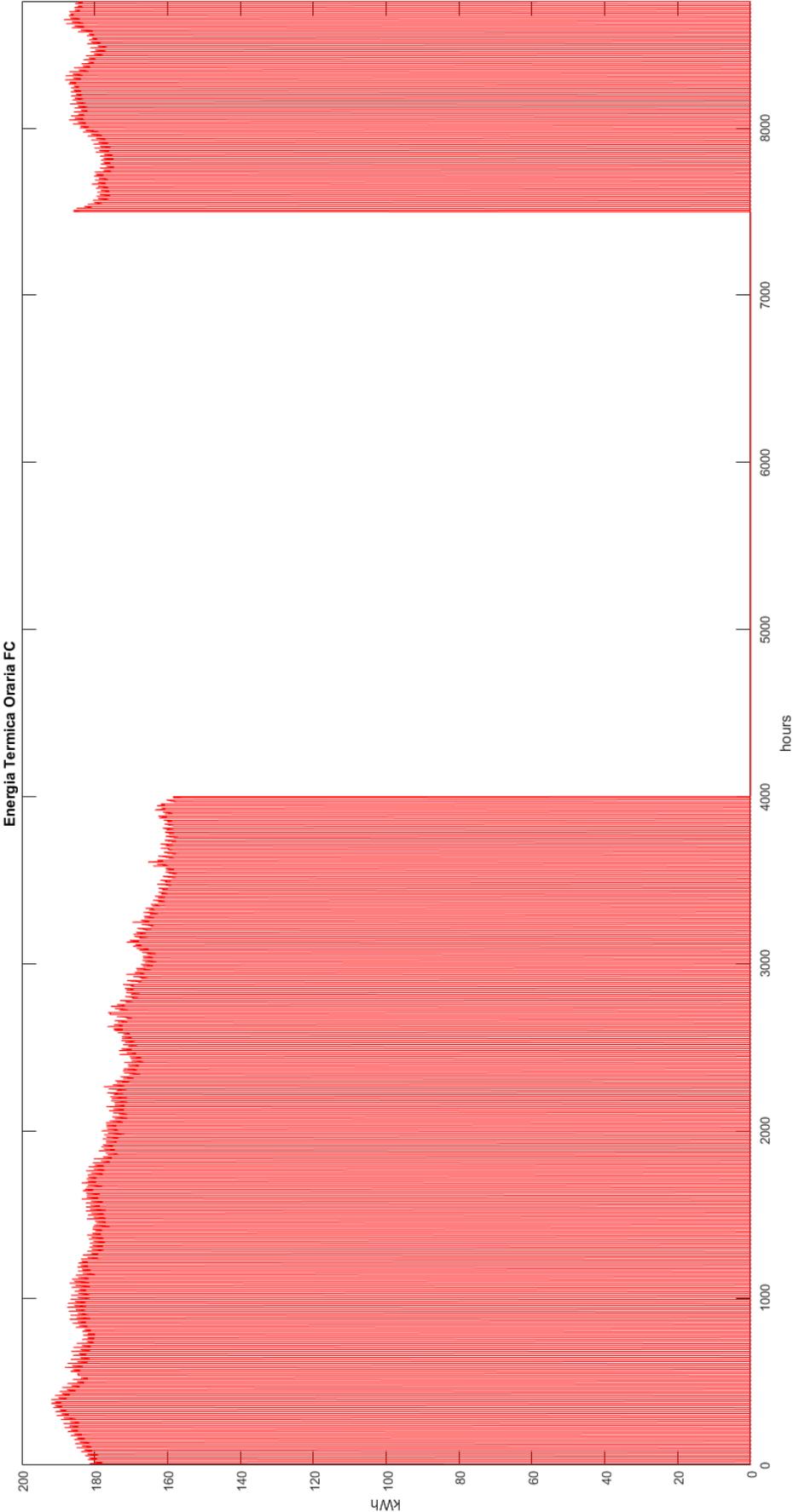


Figura 35: Andamento Energia termica oraria fornita dai Fan Coils

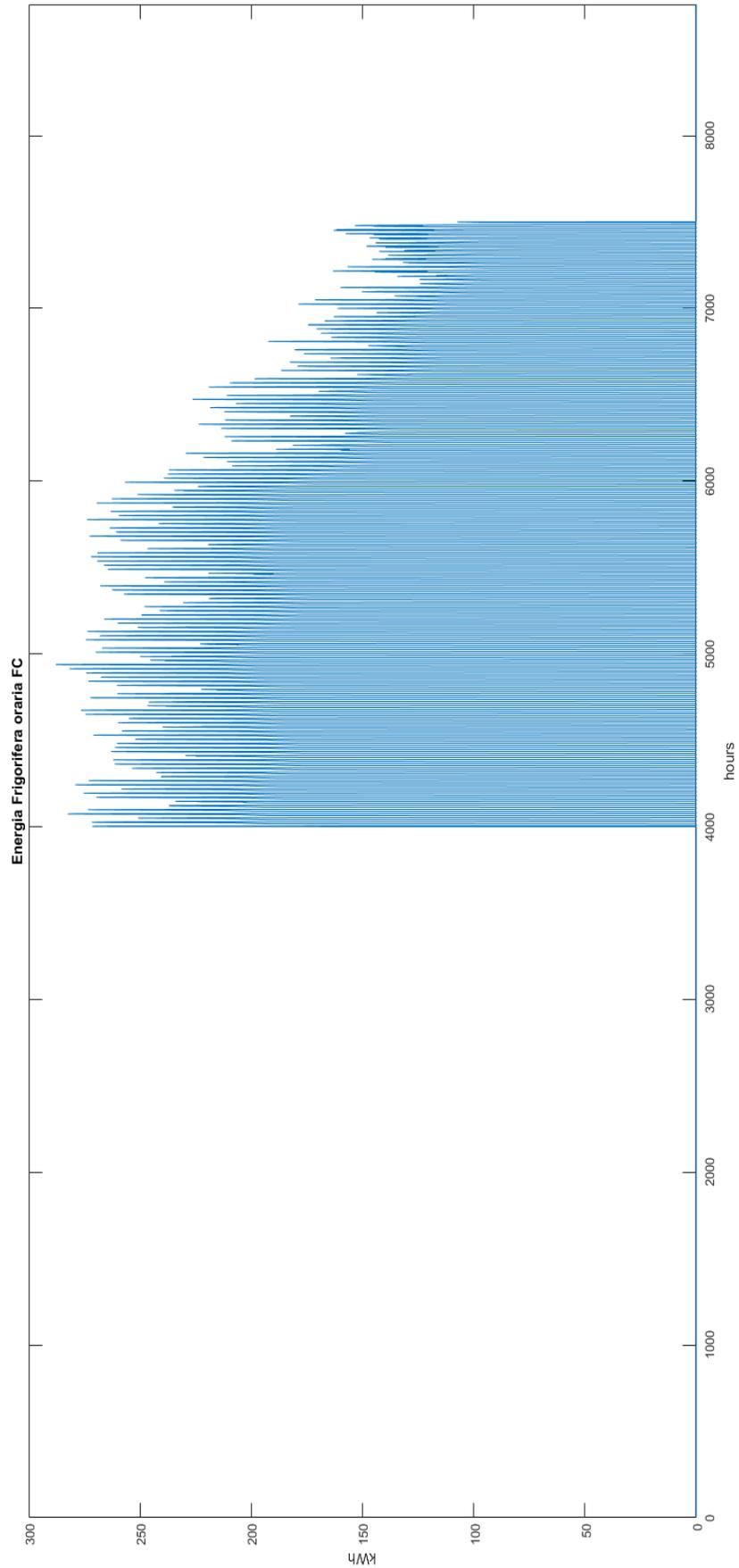


Figura 36: Andamento Energia frigorifera oraria fornita dai Fan Coils

Nelle Figure 37 e 38 sono riportati gli andamenti di energia frigorifera e termica oraria fornita dalle quattro UTA presenti nell'edificio, ipotizzando che tutte le UTA elaborino la propria portata nominale. Al fine di garantire una migliore comprensione del testo si elencano nuovamente di seguito le UTA presenti all'interno dell'edificio con le rispettive denominazioni scelte per il presente studio:

- UTA BANK: asserva la banca presente nell'edificio A e alcuni altri locali del medesimo edificio (con una portata nominale di 17500 mc/h);
- UTA B: asserva l'intero edificio B, comprensivo dei locali appratenti alla polizia e generalmente denominato "Edificio C" (con una portata nominale 12500 mc/h);
- UTA A: asserva gli uffici presenti nell'edificio A (con una portata nominale di 6000 mc/h);
- UTA INT: asserva l'intero piano interrato comprensivo dei locali tecnici (con una portata nominale di 6000 mc/h).

Si può notare come l'UTA BANK, fornisca una quantità di energia termica in riscaldamento e in raffrescamento pressoché simile all'UTA B, nonostante una portata d'aria nominale superiore.

I valori riportanti l'energia media (calcolata sull'anno) e massima oraria per le UTA e per i Fan Coils sono riportati in Tabella 15.

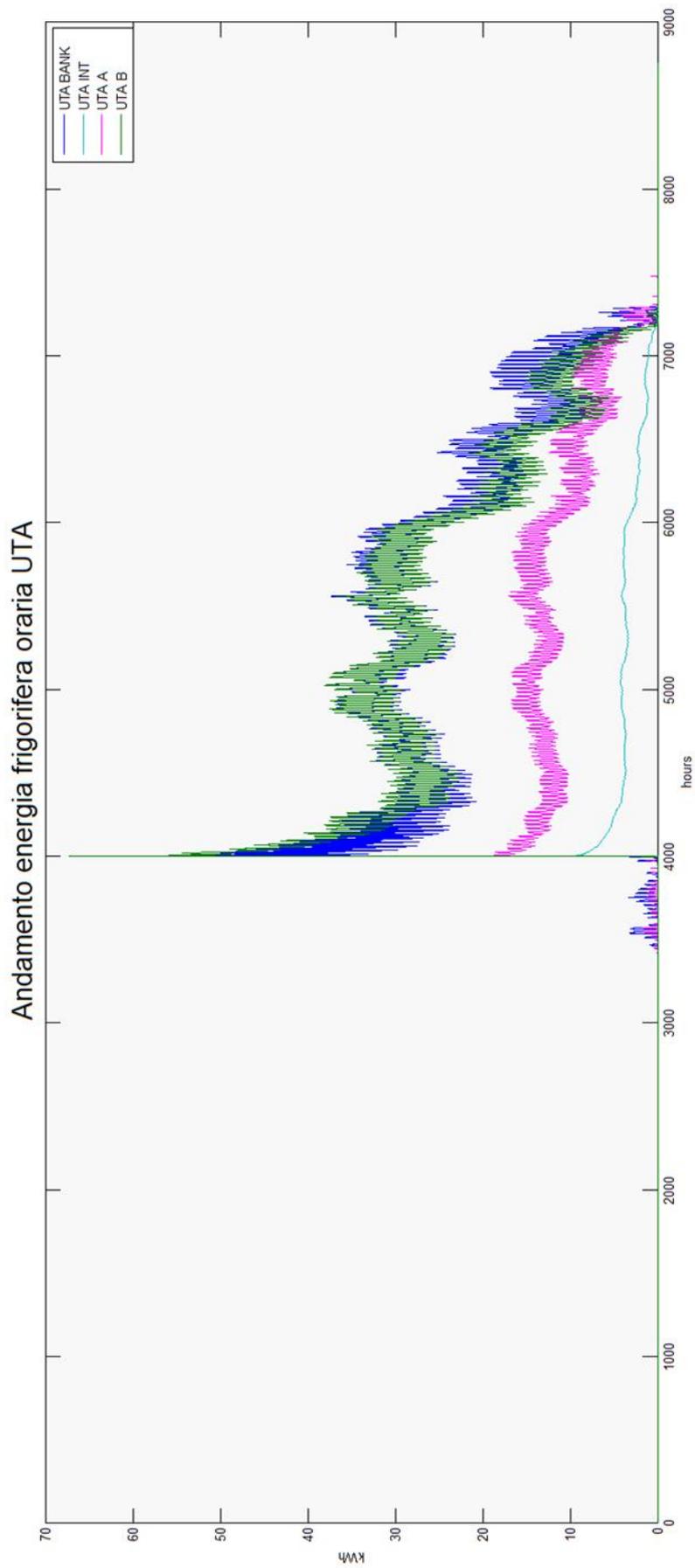


Figura 37: *Andamento energia frigorifera oraria fornita dalle 4 UTA agli ambienti climatizzati*

Andamento energia termica oraria UTA

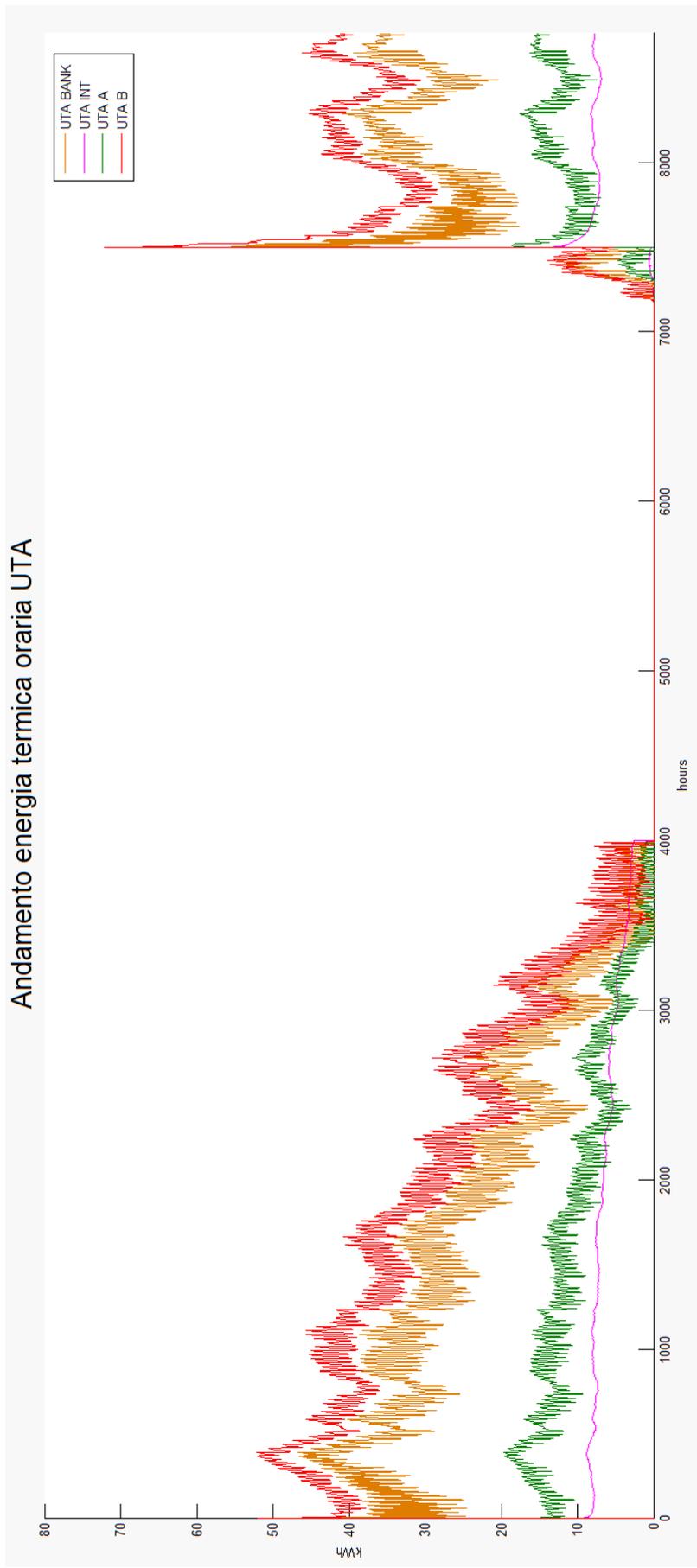


Figura 38: Andamento termica oraria fornita dalle 4 UTA agli ambienti climatizzati
Tabella 15: Valori energia termica/frigorifera oraria fornita

IMPIANTO	kWh _{medi} /ora riscaldamento	kWh _{max} /ora riscaldamento	kWh _{medi} /ora raffrescamento	kWh _{max} /ora raffrescamento
FAN COILS	52.87	191.87	37.16	287.51
UTA BANK	14.51	59.75	9.09	62.57
UTA B	18.44	72.07	8.88	67.32
UTA A	6.08	19.69	4.16	22.03
UTA INT	3.98	13.79	1.18	10.89

Una volta definito il profilo termico orario dell'impianto di condizionamento dell'edificio è stato possibile ottenere l'energia termica e frigorifera annua.

In Tabella 16 e in Figura 40 sono riportati i valori di energia termica e frigorifera annua ripartiti in funzione del apparato di distribuzione.

Tabella 16: Energia termica e frigorifera annua

RIPARTIZIONE ENERGIA ANNUA		
APPARATO DI DISTRIBUZIONE	MWh termici	MWh frigoriferi
UTA BANK	127.07	79.36
UTA B	161.53	77.77
UTA A	53.27	36.46
UTA INT	34.85	10.37
FAN COILS	463.25	325.57
RADIATORI	297.74	-
TOTALE	1137.71	529.53

Risulta immediatamente un diverso peso della stagione invernale rispetto alla stagione estiva sui consumi complessivi dell'edificio (Figura 39). In particolare, si osserva un fabbisogno di energia termica complessivo pari a circa 1140 MWh/anno, a fronte di un fabbisogno di energia frigorifera pari a circa 530 MWh.

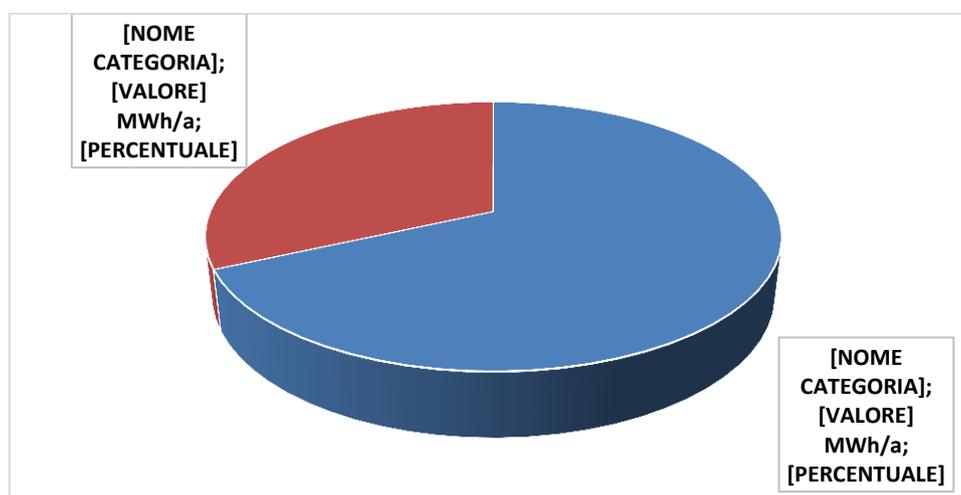


Figura 39: energia termica ed energia frigorifera distribuita

In termini relativi, considerando i diversi apparati preposti al mantenimento delle condizioni di comfort ambientale, è facile notare come i fan coils abbiano un peso maggiore (del 9% per il riscaldamento e del 22% per il raffreddamento) rispetto alla totalità delle unità di trattamento aria per garantire le condizioni di benessere termico all'interno degli ambienti climatizzati.

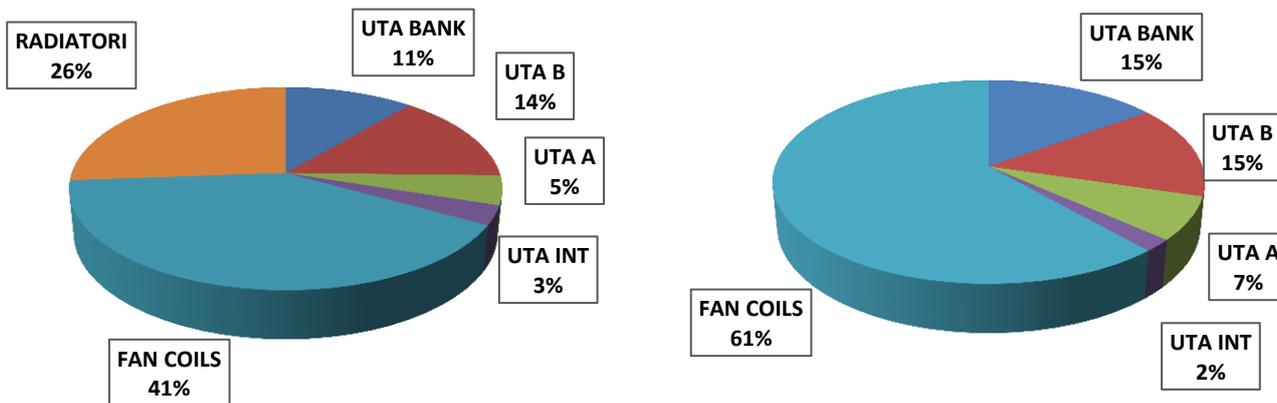


Figura 40: Ripartizione energia distribuita: termica (a sinistra), frigorifera (a destra)

5.2 Generazione dell'energia termica

Gli impianti termici di generazione sono principalmente 3:

- 2 Pompe di calore che alimentano i Fan coils, l'UTA BANK, l'UTA A e l'UTA B;
- 4 caldaie a metano per il circuito radiatori;
- 3 VRF ad espansione multipla per l'UTA al piano interrato e la climatizzazione dei locali della polizia

In Tabella 17 e in Figura 41 è riportato l'assorbimento annuale di energia elettrica dalla rete di distribuzione di Areti, con ripartizione tra i due sistemi di generazione, mentre il consumo elettrico dei VRF e delle due pompe di calore è riportato nelle Figure 42 e 43.

Tabella 17: Assorbimento elettrico annuo

RIPARTIZIONE ASSORBIMENTO ELETTRICO CLIMATIZZAZIONE	
APPARATO DI GENERAZIONE	MWh/anno
POMPE DI CALORE	406.85
VRF	84.94
TOTALE	491.79

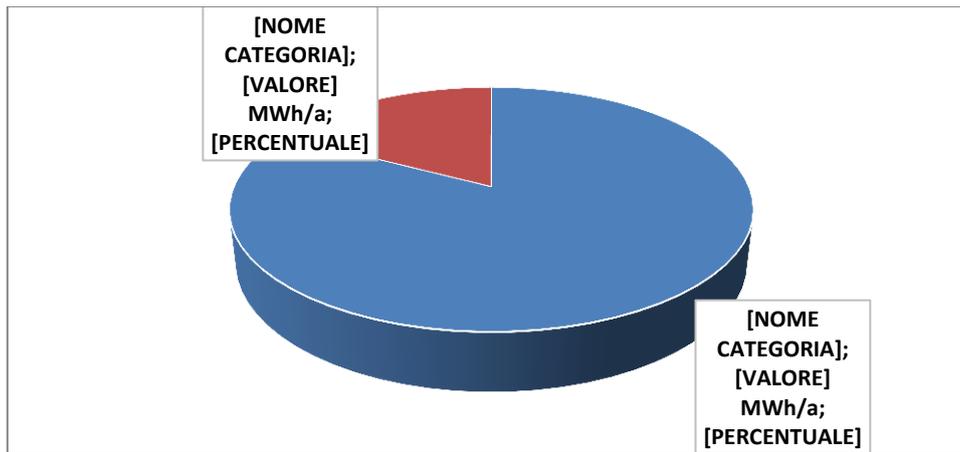


Figura 41: Ripartizione assorbimento elettrico annuo

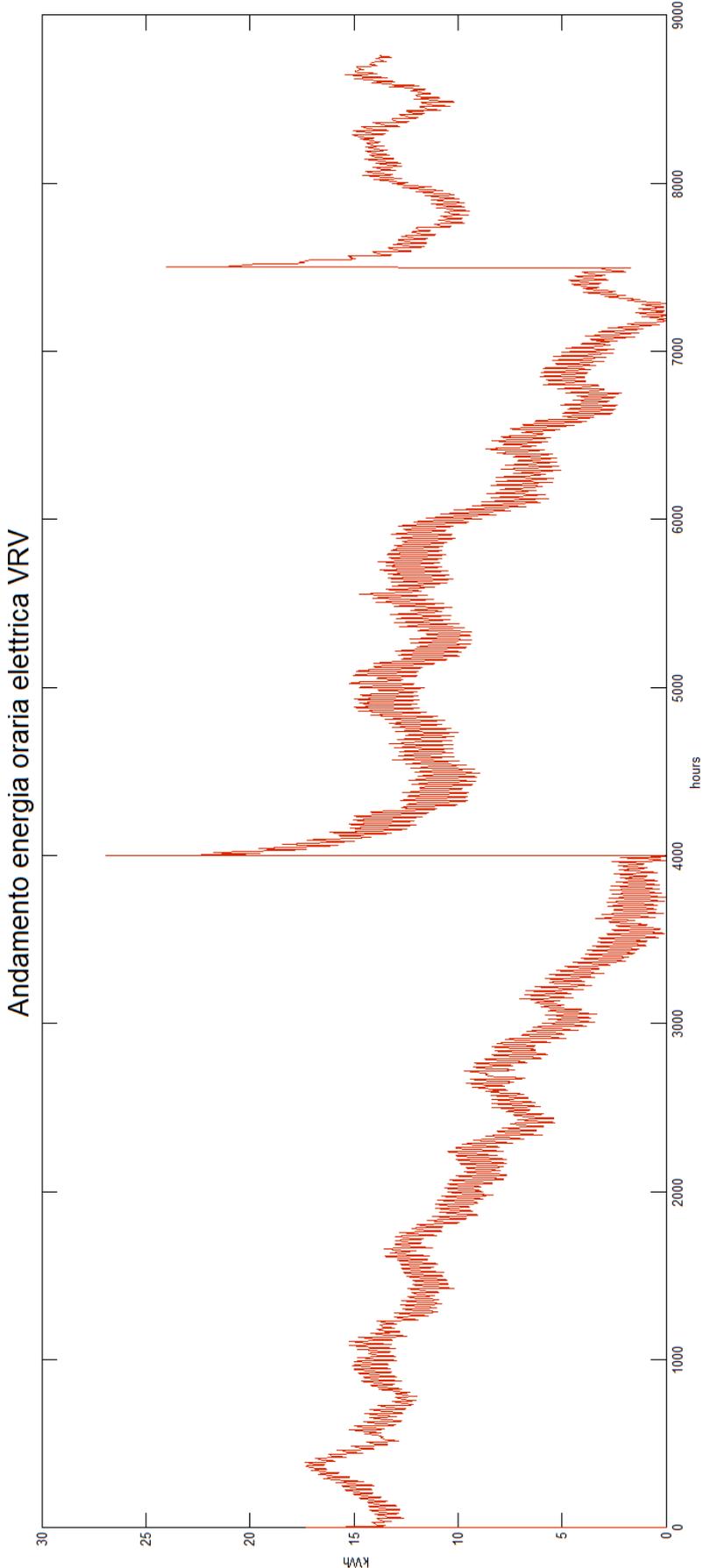


Figura 42: Andamento Energia elettrica oraria assorbita dai VRV

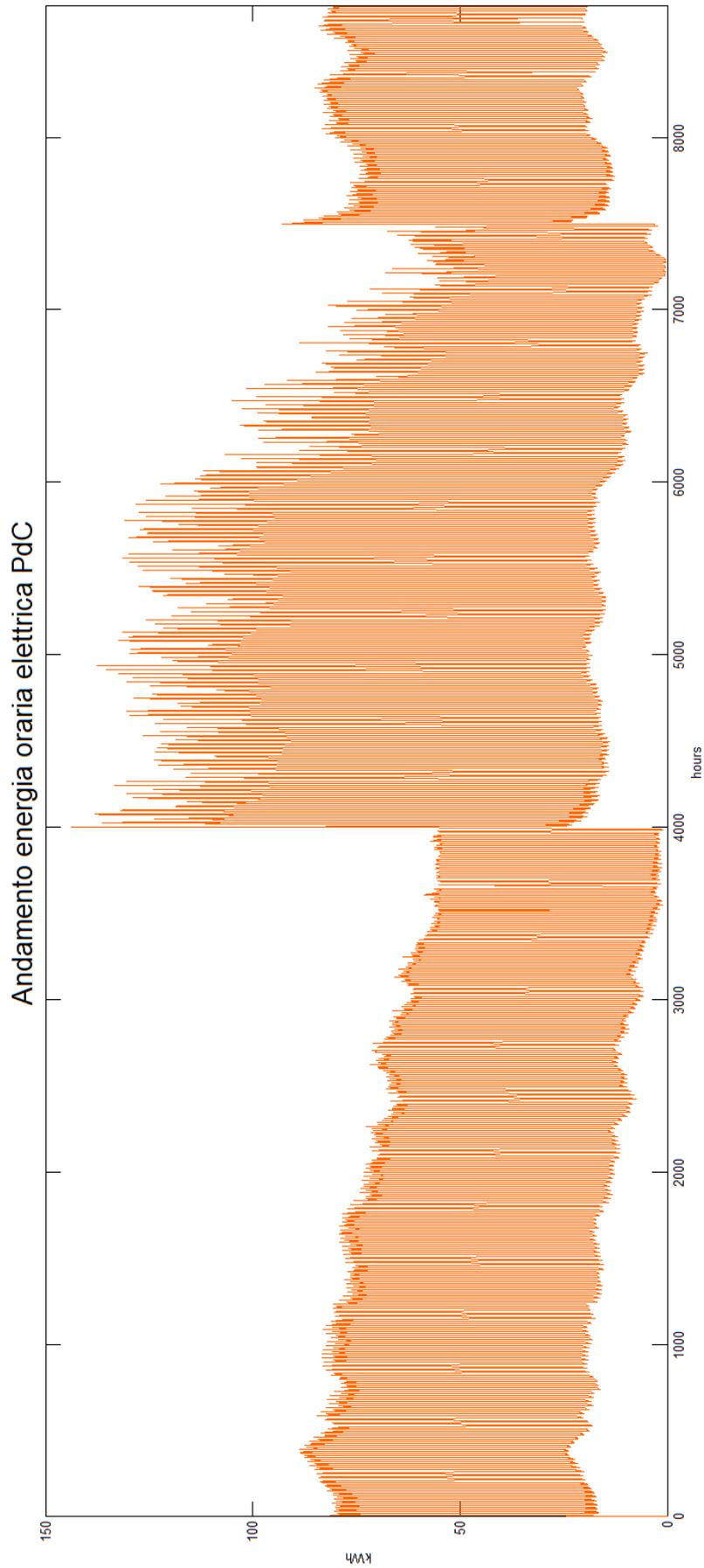


Figura 43: Andamento Energia elettrica oraria assorbita dalle Pompe di calore

5.3 Confronto con consumi reali: parte elettrica

L'assorbimento di energia elettrica all'interno dell'edificio, a seguito di quanto esposto finora, può essere riassunto nelle seguenti voci:

- Illuminazione
- Condizionamento degli ambienti
- Postazioni di lavoro e varie (apparecchiature caratterizzate da un consumo marginale, come ascensori, distributori automatici, aspirapolveri, ecc.).

Per tali consumi si hanno a disposizione le bollette del comparto elettrico per le annualità 2014, 2015 e 2016 i cui valori sono riportati con cadenza mensile in Tabella 18 e illustrati graficamente in Figura 43.

Tabella 18: Consumi elettrici mensili

Consumi elettrici [MWh]			
MESE	Anno		
	2014	2015	2016
GENNAIO	93.5	77.7	87.2
FEBBRAIO	70.4	96.1	73.4
MARZO	77.0	83.8	77.2
APRILE	71.9	71.5	69.5
MAGGIO	63.2	74.0	62.3
GIUGNO	66.5	74.6	66.3
LUGLIO	69.6	88.7	82.3
AGOSTO	73.1	92.4	80.3
SETTEMBRE	68.8	70.0	70.4
OTTOBRE	60.6	56.7	61.7
NOVEMBRE	67.2	65.3	71.5
DICEMBRE	76.6	73.8	84.0
ANNUALE	858.4	924.6	886.1

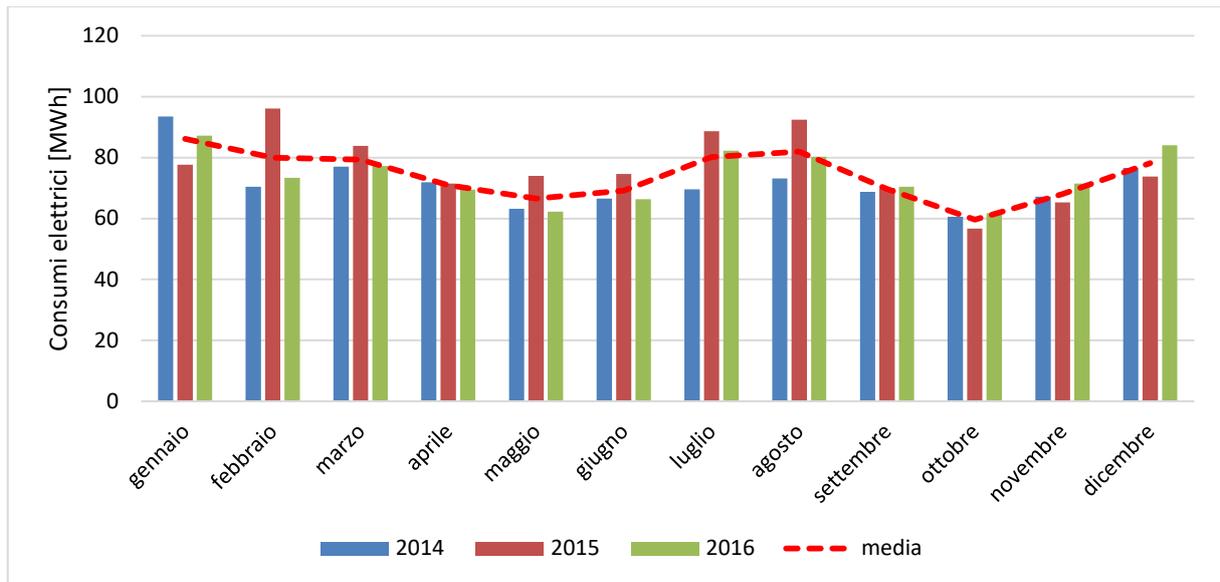


Figura 43: Valutazione d’esercizio per le tre stagioni considerate

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.

Tabella 19: Temperatura giornaliera media mensile dell’aria esterna

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

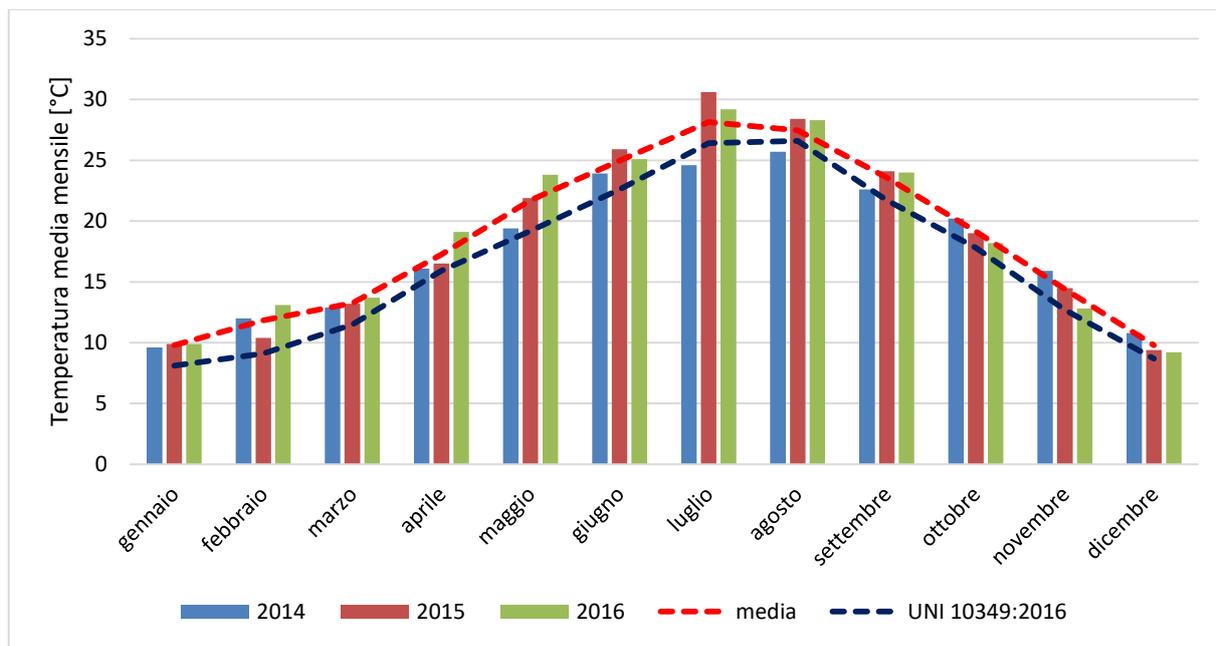


Figura 44: Temperatura giornaliera media mensile dell'aria esterna

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. 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.

La valutazione adattata all'utenza (simulazione numerica) 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.

In particolare, il carico derivante dall'illuminazione è stato simulato come un carico costante che funzioni mediamente 10 ore al giorno, dalle 08:00 alle 20:00. La potenza installata complessivamente è di circa 55 kW. Il carico derivante dalle postazioni di lavoro è stato a sua volta stimato come un carico costante pari a 400W a postazione di lavoro.

I risultati ottenuti per i tre anni sono mostrati in Tabella 20 e graficamente in Figura 45, distinti in raffrescamento, illuminazione e varie (tutti gli altri apparati elettrici).

Tabella 20: Consumi mensili elettrici

Consumi elettrici [MWh]															
MESE	Stagione														
	2014					2015					2016				
	PdC.	VRF.	Illum.	Varie	Totale	PdC.	VRF.	Illum.	Varie	Totale	PdC.	VRF.	Illum.	Varie	Totale
GENNAIO	39.1	12.2	17.1	15.5	90.8	44.3	10.1	17.1	15.5	80.0	42.6	11.2	17.1	15.5	86.4
FEBBRAIO	31.9	8.4	16.0	14.5	70.8	40.4	13.3	16.0	14.5	94.2	34.6	9.1	16.0	14.5	74.2
MARZO	35.5	9.0	17.1	15.5	79.1	40.1	9.1	17.1	15.5	81.8	35.7	8.1	17.1	15.5	76.4

APRILE	34.1	6.4	16.5	15.0	73.0	33.8	5.7	16.5	15.0	69.9	31.2	5.4	16.5	15.0	68.1
MAGGIO	28.1	2.5	17.1	15.5	63.2	36.0	3.3	17.1	15.5	71.9	28.1	2.5	17.1	15.5	63.2
GIUGNO	28.7	4.4	16.5	15.0	64.6	34.2	5.3	16.5	15.0	73.0	30.8	4.7	16.5	15.0	67.0
LUGLIO	37.3	8.6	17.1	15.5	68.5	42.6	9.8	17.1	15.5	86.0	38.3	8.8	17.1	15.5	79.7
AGOSTO	34.9	8.2	17.1	15.5	75.6	44.1	10.3	17.1	15.5	90.0	37.7	8.8	17.1	15.5	79.1
SETTEMBRE	31.4	6.1	16.5	15.0	69.0	32.0	6.2	16.5	15.0	69.7	31.6	6.2	16.5	15.0	69.3
OTTOBRE	25.1	2.9	17.1	15.5	60.6	23.5	2.7	17.1	15.5	57.7	25.1	2.9	17.1	15.5	60.5
NOVEMBRE	30.9	6.3	16.5	15.0	68.7	30.0	6.1	16.5	15.0	66.6	32.4	6.6	16.5	15.0	70.5
DICEMBRE	36.3	9.8	17.1	15.5	78.6	38.9	9.4	17.1	15.5	74.9	38.7	10.4	17.1	15.5	81.6
ANNUALE	393.3	84.7	201.3	183.0	862.3	440.1	91.3	201.3	183.0	915.7	406.8	84.9	201.3	183.0	876.0

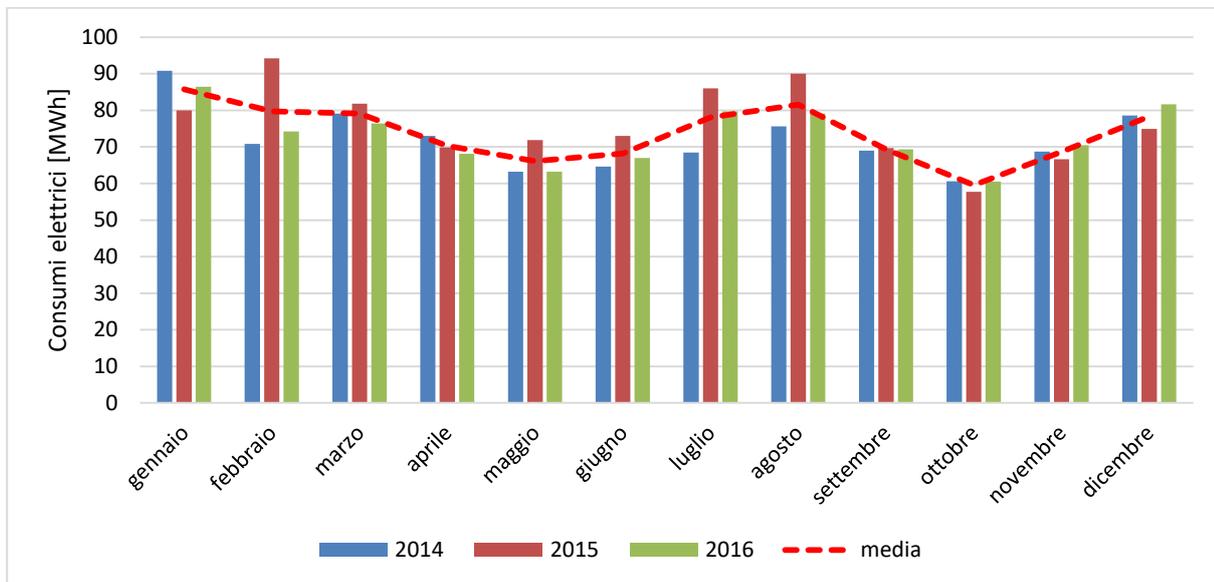


Figura 45: Valutazione adattata all'utenza per le tre stagioni considerate

Analizzando ad esempio l'annualità 2016, si può notare l'enorme impatto che il sistema di generazione di energia termica e frigorifera ha sull'edificio. L'assorbimento elettrico si attesta infatti a circa il 56% del consumo di energia energetica globale. Questo risulta ancora più evidente analizzando le Figure 46 e 47:

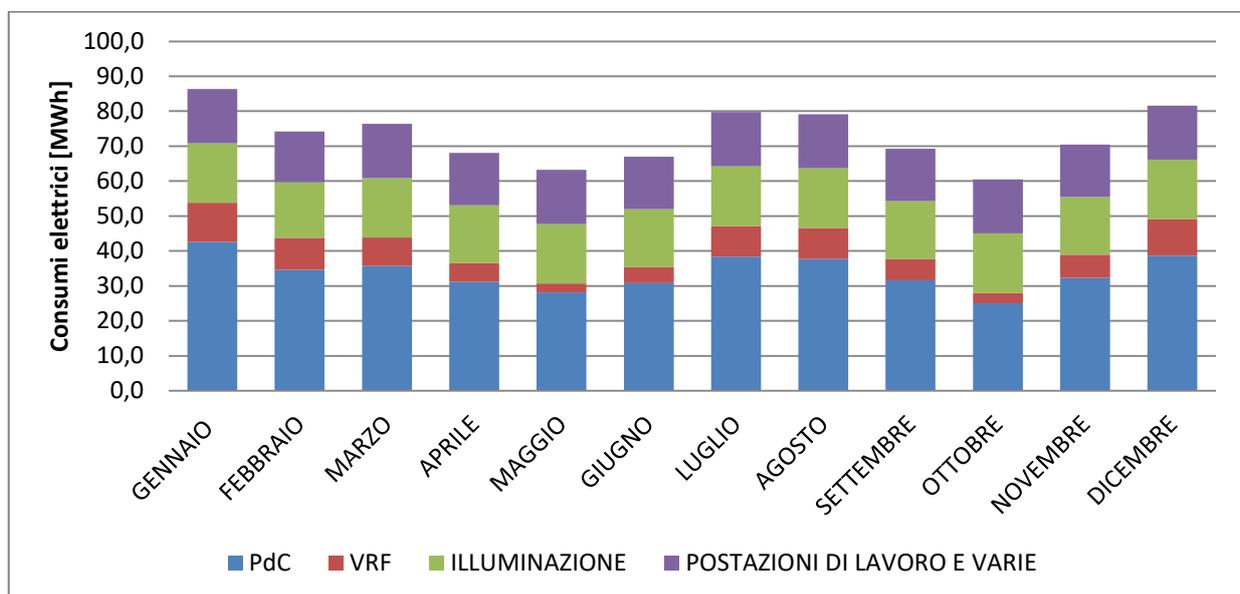


Figura 45: Andamento consumi elettrici mensili per categoria

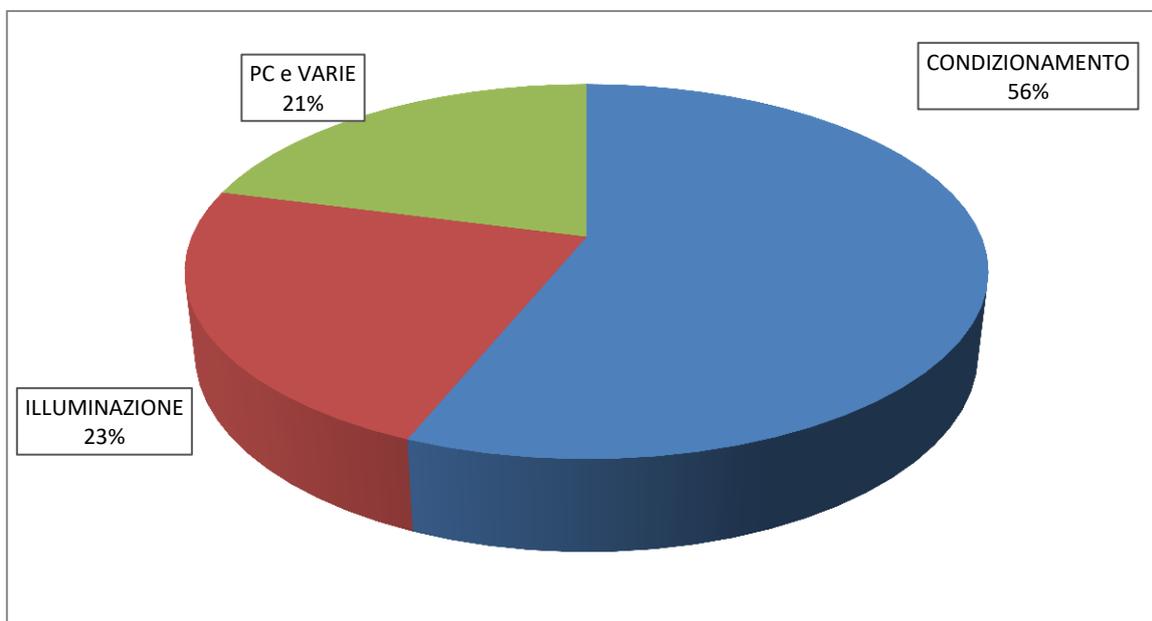


Figura 46: Ripartizione consumi elettrici annuali

La calibrazione del modello dell'edificio è stata effettuata confrontando le firme energetiche ottenute dalla valutazione d'esercizio (bollette elettriche) e dalla valutazione adattata all'utenza (risultati delle simulazioni). I risultati vengono riportati nelle Tabelle 21-23:

Tabella 21: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2014

Confronto			
MESE	Stagione 2014		
	Valutazione d'esercizio [MWh]	Valutazione Adattata all'utenza [MWh]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	93.5	90.8	2.88
FEBBRAIO	70.4	70.8	-0.53
MARZO	77.0	79.1	-2.67
APRILE	71.9	73.0	-1.49
MAGGIO	63.2	63.2	-0.04
GIUGNO	66.5	64.6	2.82
LUGLIO	69.6	68.5	1.66
AGOSTO	73.1	75.6	-3.38
SETTEMBRE	68.8	69.0	-0.32
OTTOBRE	60.6	60.6	0.11
NOVEMBRE	67.2	68.7	-2.16
DICEMBRE	76.6	78.6	-2.62

Tabella 22: 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	77.7	80.0	-2.90
FEBBRAIO	96.1	94.2	1.98
MARZO	83.8	81.8	2.41
APRILE	71.5	69.9	2.20
MAGGIO	74.0	71.9	2.94
GIUGNO	74.6	73.0	2.09
LUGLIO	88.7	86.0	2.99
AGOSTO	92.4	90.0	2.66
SETTEMBRE	70.0	69.7	0.50
OTTOBRE	56.7	57.7	-1.86
NOVEMBRE	65.3	66.6	-1.97
DICEMBRE	73.8	74.9	-1.53

Tabella 23: 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	87.2	86.4	0.99
FEBBRAIO	73.4	74.2	-1.01
MARZO	77.2	76.4	0.99
APRILE	69.5	68.1	1.96
MAGGIO	62.3	63.2	-1.52
GIUGNO	66.3	67.0	-1.01
LUGLIO	82.3	79.7	3.14
AGOSTO	80.3	79.1	1.48
SETTEMBRE	70.4	69.3	1.64
OTTOBRE	61.7	60.5	1.96
NOVEMBRE	71.5	70.5	1.48
DICEMBRE	84.0	81.6	2.79

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

Lo scarto percentuale fra i risultati ottenuti dalle due valutazioni è molto basso, con un valore medio intorno al 1.07 % per la stagione 2014, un valore medio del 0.79 % per la stagione 2015 e un valore medio del 0.48 % per la stagione 2016. Tutte le stagioni presentano inoltre un valore massimo di discostamento tra i dati simulati e le bollette di poco superiore al 3 % solo per alcuni mesi. Quindi si può affermare che per il comparto consumi energetici, il modello di edificio modellato tramite Trnsys, risulta rappresentativo del suo comportamento reale.

Infine, considerando solo i consumi connessi alla climatizzazione, è stata effettuata una parametrizzazione dei dati di consumo su base giornaliera e considerando i gradi giorno reali valutati sulla base delle medie mensili sopra riportate.

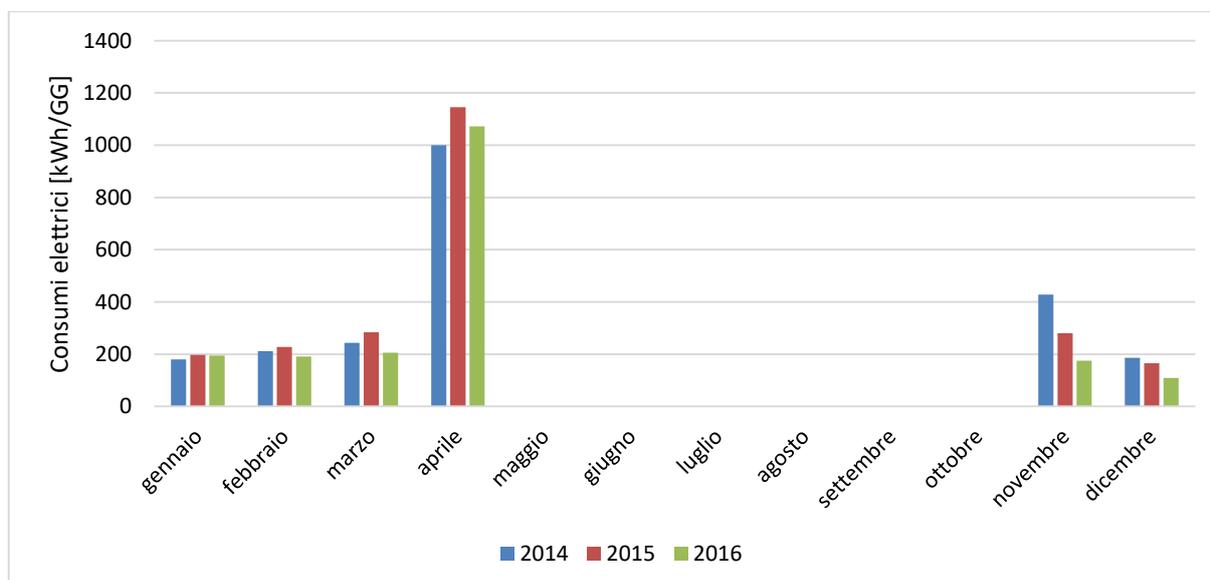


Figura 47: Valutazione parametrica dei consumi elettrici di climatizzazione invernale

Emerge una certa stabilità dei consumi nei mesi caratterizzati dalle temperature più basse, mentre nei mesi (aprile e novembre) caratterizzati da temperature più miti si hanno consumi specifici più alti. Tale circostanza discende dal minor rendimento del sistema di regolazione all'approssimarsi della condizione di equilibrio tra i carichi esterni e gli apporti gratuiti dovuti alla radiazione solare e ai carichi interni.

5.4 Confronto con consumi reali: parte gas

Il consumo di gas nell'edificio oggetto di studio è dovuto essenzialmente da:

- Produzione acqua calda sanitaria
- Produzione del fluido termovettore per gli impianti termici di riscaldamento e raffrescamento

Il fluido termovettore (acqua) prodotta in caldaia viene utilizzata sia per il riscaldamento degli ambienti, tramite il circuito idraulico dei radiatori, sia come fonte di calore delle batterie di post riscaldamento delle UTA.

Per il periodo di accensione dell'impianto di riscaldamento, ci si è riferito alla norma vigente per la zona climatica D, dove il periodo di accensione degli impianti termici va dal 1 novembre al 15 aprile (12 ore giornaliere). Per tali consumi si hanno a disposizione le bollette del comparto gas (con cadenza bimestrale) per le annualità 2014, 2015 e 2016 i cui valori sono riportati con cadenza mensile in Tabella 24 e illustrati graficamente in Figura 48.

Tabella 24: Consumi gas mensili

Consumi gas reali [m ³]			
MESE	Stagione		
	2014	2015	2016
GENNAIO	7078.8	5883.5	6602.6
FEBBRAIO	9912.0	15659.0	10643.4
MARZO	11473.6	11651.7	10474.0
APRILE	3687.5	3258.8	3165.7
MAGGIO	2311.2	2965.5	2278.6
GIUGNO	1779.0	2123.1	1888.5
LUGLIO	1906.1	2427.9	2235.8
AGOSTO	1893.6	2392.7	2079.9
SETTEMBRE	3438.0	3500.4	3469.6
OTTOBRE	2721.8	2544.5	2770.3
NOVEMBRE	6478.9	6298.6	6894.3
DICEMBRE	7515.7	7239.3	8230.9
ANNUALE	60196.1	65945.0	60733.7

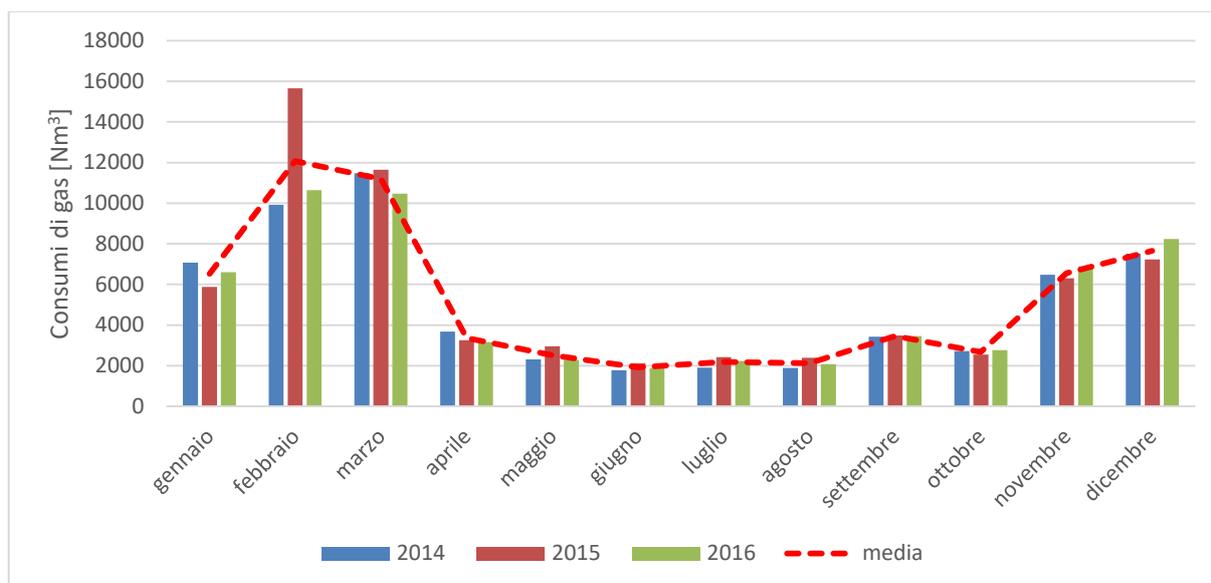


Figura 48: Valutazione d’esercizio per le tre stagioni considerate

Il confronto tra i dati dei tre anni considerati evidenzia le stesse anomalie mensili sopra evidenziate, per le quali è stata individuata la motivazione in un diverso andamento mensile delle temperature.

Come per la parte elettrica, la valutazione adattata all’utenza (simulazione numerica) è stata eseguita analizzando i risultati ottenuti con il modello Trnsys descritto precedentemente. Risultati derivanti dalla modellazione del fabbisogno di gas reale richiesto dall’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 25 e graficamente in Figura 49, distinti in acqua calda sanitaria, post riscaldamento UTA e radiatori.

Tabella 25: Consumi gas mensili

Consumi gas [m³]												
MESE	Stagione											
	2014				2015				2016			
	ACS	POST RISC. UTA	RADIATORI	Totale	ACS	POST RISC. UTA	RADIATORI	Totale	ACS	POST RISC. UTA	RADIATORI	Totale
GENNAIO	574.9	1414.1	4324.4	7228.4	477.9	1305.9	4547.6	6031.4	531.0	1340.0	4666.2	6537.2
FEBBRAIO	586.5	2306.1	8616.7	10169.3	926.6	2326.7	10756.0	15209.3	636.2	2105.0	8009.8	10751.0
MARZO	1180.3	2737.6	8707.8	11745.4	1198.6	2790.7	8774.4	11763.7	1066.8	2245.0	7058.5	10370.3
APRILE	857.6	340.7	2451.5	3629.0	757.9	286.8	2684.7	3229.3	721.8	229.9	2152.0	3103.7
MAGGIO	655.2	2071.2	0.0	2378.2	840.6	2123.0	0.0	2963.7	655.7	1657.5	0.0	2313.3
GIUGNO	595.6	1228.3	0.0	1802.6	710.8	1317.1	0.0	2127.8	638.6	1269.0	0.0	1907.6
LUGLIO	576.2	1675.6	0.0	1908.0	658.5	1721.8	0.0	2380.4	592.1	1590.9	0.0	2183.0
AGOSTO	364.0	1650.4	0.0	1900.0	460.0	1786.0	0.0	2345.9	393.9	1655.2	0.0	2049.2
SETTEMBRE	981.7	2416.5	0.0	3465.3	999.5	2483.6	0.0	3483.1	988.5	2473.4	0.0	3461.9
OTTOBRE	551.7	2037.4	0.0	2784.7	515.8	2033.0	0.0	2548.8	550.5	2165.5	0.0	2716.0
NOVEMBRE	550.8	1962.1	3131.2	6447.9	535.5	2109.5	3387.6	6232.6	577.4	2385.0	3830.0	6792.5
DICEMBRE	573.9	2132.4	3754.3	7547.8	552.8	2272.7	4001.2	7026.7	611.7	2680.0	4718.3	8010.0
ANNUALE	8048.4	21972.4	30985.9	61006.8	8634.4	22556.9	34151.5	65342.8	7964.3	21796.3	30434.9	60195.5

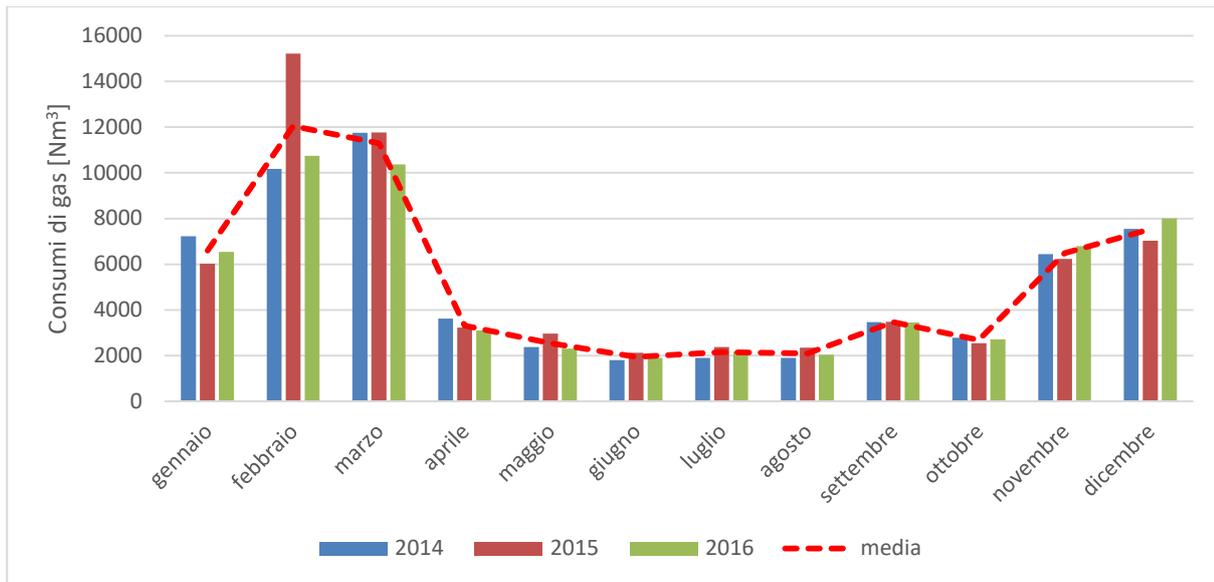


Figura 49: Valutazione adattata all'utenza per le tre stagioni considerate

Anche in questo caso, la calibrazione del modello dell'edificio è stata effettuata confrontando le firme energetiche ottenute dalla valutazione d'esercizio (bollette del gas) e dalla valutazione adattata all'utenza (risultati delle simulazioni). I risultati vengono riportati nelle Tabelle 26-28:

Tabella 26: Confronto fra la valutazione d'esercizio e la valutazione adattata all'utenza stagione 2014

Confronto			
MESE	Stagione 2014		
	Valutazione d'esercizio [m ³]	Valutazione Adattata all'utenza [m ³]	Differenza Percentuale [%]
GENNAIO	7078.8	7228.4	-2.11
FEBBRAIO	9912.0	10169.3	-2.60
MARZO	11473.6	11745.4	-2.37
APRILE	3687.5	3629.0	1.59
MAGGIO	2311.2	2378.2	-2.90
GIUGNO	1779.0	1802.6	-1.33
LUGLIO	1906.1	1908.0	-0.10
AGOSTO	1893.6	1900.0	-0.34
SETTEMBRE	3438.0	3465.3	-0.80
OTTOBRE	2721.8	2784.7	-2.31
NOVEMBRE	6478.9	6447.9	0.48
DICEMBRE	7515.7	7547.8	-0.43

Tabella 27: 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	5883.5	6031.4	-2.51
FEBBRAIO	15659.0	15209.3	2.87
MARZO	11651.7	11763.7	-0.96
APRILE	3258.8	3229.3	0.91
MAGGIO	2965.5	2963.7	0.06
GIUGNO	2123.1	2127.8	-0.23
LUGLIO	2427.9	2380.4	1.96
AGOSTO	2392.7	2345.9	1.95
SETTEMBRE	3500.4	3483.1	0.49
OTTOBRE	2544.5	2548.8	-0.17
NOVEMBRE	6298.6	6232.6	1.05
DICEMBRE	7239.3	7026.7	2.94

Tabella 28: 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	6602.6	6537.2	0.99
FEBBRAIO	10643.4	10751.0	-1.01
MARZO	10474.0	10370.3	0.99
APRILE	3165.7	3103.7	1.96
MAGGIO	2278.6	2313.3	-1.52
GIUGNO	1888.5	1907.6	-1.01
LUGLIO	2235.8	2183.0	2.36
AGOSTO	2079.9	2049.2	1.48
SETTEMBRE	3469.6	3461.9	0.22
OTTOBRE	2770.3	2716.0	1.96
NOVEMBRE	6894.3	6792.5	1.48
DICEMBRE	8230.9	8010.0	2.68

Anche in questo caso, lo scarto percentuale fra i risultati ottenuti dalle due valutazioni è molto basso, con un valore medio intorno al 1.10 % per la stagione 2014, un valore medio del 0.70 % per la stagione 2015 e un valore medio del 0.88 % per la stagione 2016. Tutte le stagioni presentano inoltre un valore massimo di discostamento tra i dati simulati e le bollette sempre inferiore al 3 %. Quindi si può affermare che per il comparto consumi energetici, il modello di edificio modellato tramite Trnsys, risulta rappresentativo del suo comportamento reale.

6 Identificazione e analisi energetica dei possibili interventi di retrofit e definizione dei relativi costi

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 Banco Napoli al fine di raggiungere i parametri minimi per rientrare nella classe nZEB.

Gli interventi proposti sono volti al raggiungimento dei requisiti minimi [4] per poter classificare l'edificio come nZEB. I calcoli sono stati eseguiti nel rispetto delle normative tecniche UNI TS 11300 1,2,3,4,5,6.

In Tabella 29 sono riportati i valori dei parametri per il calcolo dei requisiti nZEB riferiti allo stato attuale.

Tabella 29: Parametri nZEB

Parametri	u.m.	Requisiti	Stato Post intervento
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.53	0.78
$A_{sol.est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.035
η_H	[%]	≥ 81%	85%
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 80.35	79.10
$Ep_{H.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 99.19	93.06
η_w	[%]	≥ 81%	85%
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 18.45	17.65
$Ep_{w.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 26.35	24.85
η_c	[%]	≥ 81%	85%
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	43.24
$Ep_{c.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 52.77	52.34
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 5.46	3.58
Ep_v	[kWh/m ²]	≤ 22.47	17.45
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 21.15	18.65
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 171.95	168.64
$P_{el.ren}$	[kW]	≥ 35.20	0
$CFE_{ren.ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55	71%
$CFE_{ren.ACS}$	[%]	≥ 55	60%

Tabella 30: Legenda parametri nZEB

H^*_T [W/ m ² K]	coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente
$A_{sol,est}/ A_{sup\ utile}$ [-]	area solare equivalente estiva per unità di superficie utile;
$EP_{H,nd}$ [kWh/m ²]	indice di prestazione termica utile per riscaldamento;
η_H [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione invernale;
EP_H [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot") ;
$EP_{w,nd}$ [kWh/m ²]	indice di prestazione termica utile per la produzione di acqua calda sanitaria;
η_w [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria;
EP_w [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la produzione dell'acqua calda sanitaria. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
EP_V [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la ventilazione. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
$EP_{C,nd}$ [kWh/m ²]	indice di prestazione termica utile per il raffrescamento;
η_C [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione estiva (compreso l'eventuale controllo dell'umidità);
EP_C [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva (compreso l'eventuale controllo dell'umidità). Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
EP_L [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica per l'illuminazione artificiale. Questo indice non si calcola per la categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3). Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
EP_T [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica del servizio per il trasporto di persone e cose (impianti ascensori, marciapiedi e scale mobili). Questo indice non si calcola per la categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3);
$EP_{gl} = EP_H + EP_w + EP_V + EP_C + EP_L + EP_T$ [kWh/m ²]	indice di prestazione energetica globale dell'edificio. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot").

La tabella sopra esposta mostra come allo stato attuale l'edificio risulti al di fuori di alcuni dei parametri per essere classificato come nZEB. Gli indici di prestazione energetica relativi ai singoli servizi energetici presenti nell'edificio risultano essere al di sotto dei valori di soglia stabiliti in seguito allo studio dell'edificio di riferimento, come riportato nella norma UNI TS 11300 [5]. La presenza di pompe di calore e VRV consente di essere al di sopra delle soglie di produzione di energia termica (per ACS e ACS con riscaldamento e raffrescamento) da fonte rinnovabile.

Trattandosi di un edificio storico non può essere soggetto ad interventi che coinvolgano la muratura esterna, per tale motivo è di difficile raggiungimento il valore soglia di 0.53 del parametro di scambio termico globale dell'edificio.

L'intervento proposto è finalizzato quindi al raggiungimento del valore soglia di produzione di potenza elettrica da fonti rinnovabili, che nel caso oggetto di studio si attesta su di un valore di 35.20 kWp. Per tale motivo è stata prevista l'installazione di un impianto fotovoltaico da 36 kWp posizionato sulla copertura dell'edificio.

Dopo aver calcolato il valore di $EP_{gl,nren,rif,standard}$, si è proceduto con il calcolo dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio in oggetto ($EP_{gl,nren}$), e da qui si è calcolata la classe energetica complessiva dell'edificio. Poiché il valore di $EP_{gl,nren}$ è pari a 168.64 (kWh/m²a), l'edificio è in classe B (vedi Tabella 31).

Tabella 31: Classificazione energetica pre-retrofit

		Classe A4	≤	53.3 kWh/m ²
53.3 kWh/m ²	<	Classe A3	≤	80.0 kWh/m ²
80.0 kWh/m ²	<	Classe A2	≤	106.6 kWh/m ²
106.6 kWh/m ²	<	Classe A1	≤	165.1 kWh/m ²
165,17 kWh/m ²	<	Classe B	≤	190,0 kWh/m ²
190,00 kWh/m ²	<	Classe C	≤	220,0 kWh/m ²
220.0 kWh/m ²	<	Classe D	≤	266.6 kWh/m ²
266.6 kWh/m ²	<	Classe E	≤	346.6 kWh/m ²
346.6 kWh/m ²	<	Classe F	≤	466.6 kWh/m ²
		Classe G	≤	466.6 kWh/m ²

6.1 Fotovoltaico

L'intervento proposto prevede l'installazione di un impianto fotovoltaico da 36 kW_p da installare sulla superficie disponibile della copertura dell'edificio (circa 210 mq) [5]. L'intervento propone quindi l'installazione di circa 110 moduli fotovoltaici da 325 Wp. orientati a Sud-Est e angolati di 45° rispetto all'orizzontale.

In tabella sono riportate le caratteristiche dell'intervento proposto e il relativo costo di fornitura ed installazione, ipotizzando un costo del singolo modulo FV di 315.56 ed un costo di installazione pari al 20% del costo di fornitura [6], [7].

Tabella 32: Dati intervento proposto.

Potenza modulo monocristallino	[Wp]	325
Efficienza modulo	[%]	20
Numero moduli	[-]	110
Potenza totale impianto	[kWp]	35.75
Numero Inverter	[-]	1
Efficienza Ausiliari	[%]	85
Consumo elettrico pre intervento	[MWh/anno]	876
Consumo elettrico post intervento	[MWh/anno]	832
Risparmio energetico	[kWh/anno]	43900
Costo Totale FV	[€]	11281
Costo Inverter	[€]	6000
Costi aggiuntivi: Quadri di parallelo. canalizzazioni. collegamenti. ecc..	[€]	2000
Costo Fornitura Totale	[€]	19281
Costo Manodopera	[€]	3800
INVESTIMENTO	[€]	24001

È stata condotta un'analisi energetica dell'intervento proposto. La produzione energetica oraria nell'arco dell'anno è riportata in Figura 50, mentre in Figura 51 è riportata la produzione nei vari mesi dell'anno.

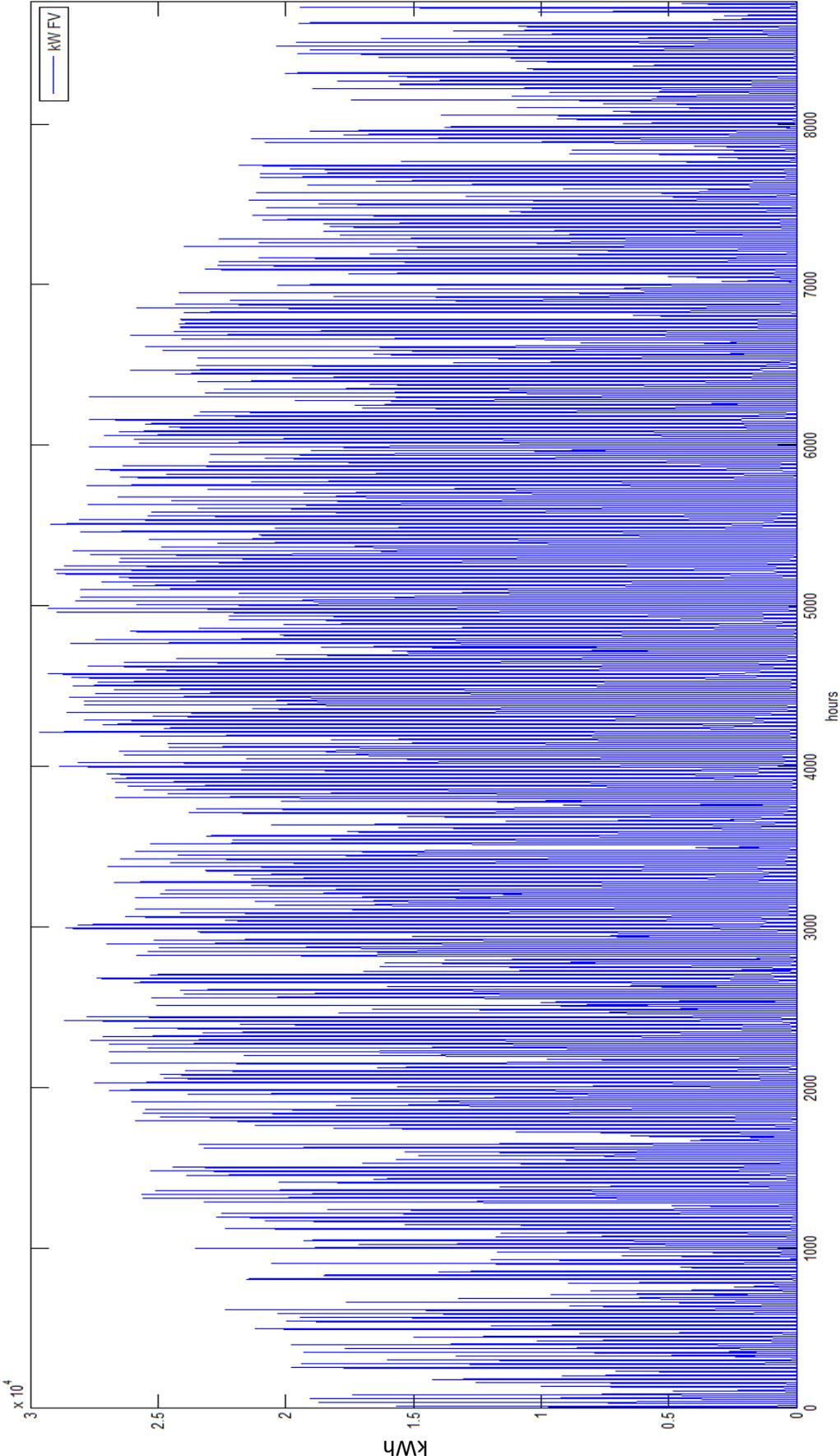


Figura 50: kWh orari produzione fotovoltaica

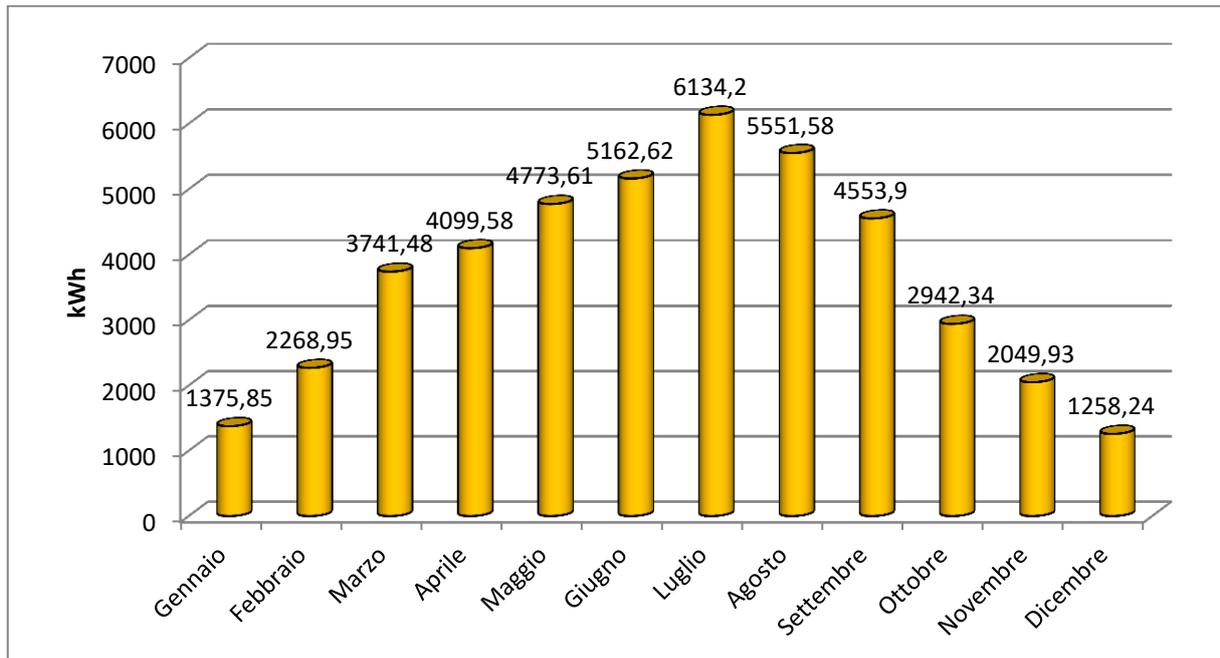


Figura 51: Produzione mensile fotovoltaica

La produzione annua è di circa **43.9 MWh**.

Determinata quindi la produzione annua dell'impianto FV proposto è stata analizzata la fattibilità economica dell'intervento ipotizzando una vita utile dell'intervento di 20 anni e un prezzo dell'energia elettrica di 0.18 €/kWh.

Nelle Tabelle seguenti è riportato il valore del VAN in funzione di diversi valori del tasso di interesse (i).

Tabella 33: Analisi economico i=0%

FV (i=0%)							
n (anni)	i	1/(1+i) ⁿ	FA	FC (€)	Somma FC (€)	Investimento (€)	Bilancio (€)
0	0%	-	-	-	-	24009.00	-24009.00
1	0%	1.00	1.00	7740.00	7740.00	-	-16269.00
2	0%	1.00	2.00	7740.00	15480.00	-	-8529.00
3	0%	1.00	3.00	7740.00	23220.00	-	-789.00
4	0%	1.00	4.00	7740.00	30960.00	-	6951.00
5	0%	1.00	5.00	7740.00	38700.00	-	14691.00
6	0%	1.00	6.00	7740.00	46440.00	-	22431.00
7	0%	1.00	7.00	7740.00	54180.00	-	30171.00
8	0%	1.00	8.00	7740.00	61920.00	-	37911.00
9	0%	1.00	9.00	7740.00	69660.00	-	45651.00
10	0%	1.00	10.00	7740.00	77400.00	-	53391.00
11	0%	1.00	11.00	7740.00	85140.00	-	61131.00
12	0%	1.00	12.00	7740.00	92880.00	-	68871.00
13	0%	1.00	13.00	7740.00	100620.00	-	76611.00
14	0%	1.00	14.00	7740.00	108360.00	-	84351.00
15	0%	1.00	15.00	7740.00	116100.00	-	92091.00
16	0%	1.00	16.00	7740.00	123840.00	-	99831.00
17	0%	1.00	17.00	7740.00	131580.00	-	107571.00
18	0%	1.00	18.00	7740.00	139320.00	-	115311.00
19	0%	1.00	19.00	7740.00	147060.00	-	123051.00
20	0%	1.00	20.00	7740.00	154800.00	-	130791.00

Tabella 34: Analisi economico i=3%

FV (i=3%)							
n (anni)	i	1/(1+i) ⁿ	FA	FC (€)	Somma FC (€)	Investimento (€)	Bilancio (€)
0	3%	-	-	-	-	24009.00	-24009.00
1	3%	0.97	0.97	7514.56	7514.56	-	-16494.44
2	3%	0.94	1.91	7295.69	14810.26	-	-9198.74
3	3%	0.92	2.83	7083.20	21893.45	-	-2115.55
4	3%	0.89	3.72	6876.89	28770.34	-	4761.34
5	3%	0.86	4.58	6676.59	35446.93	-	11437.93
6	3%	0.84	5.42	6482.13	41929.06	-	17920.06
7	3%	0.81	6.23	6293.33	48222.39	-	24213.39
8	3%	0.79	7.02	6110.03	54332.42	-	30323.42
9	3%	0.77	7.79	5932.07	60264.48	-	36255.48
10	3%	0.74	8.53	5759.29	66023.77	-	42014.77
11	3%	0.72	9.25	5591.54	71615.31	-	47606.31
12	3%	0.70	9.95	5428.68	77043.99	-	53034.99
13	3%	0.68	10.63	5270.56	82314.55	-	58305.55
14	3%	0.66	11.30	5117.05	87431.61	-	63422.61
15	3%	0.64	11.94	4968.01	92399.62	-	68390.62
16	3%	0.62	12.56	4823.31	97222.93	-	73213.93
17	3%	0.61	13.17	4682.83	101905.76	-	77896.76
18	3%	0.59	13.75	4546.43	106452.19	-	82443.19
19	3%	0.57	14.32	4414.01	110866.21	-	86857.21
20	3%	0.55	14.88	4285.45	115151.66	-	91142.66

Tabella 35: Analisi economico i=5%

FV (i=5%)							
n (anni)	i	1/(1+i) ⁿ	FA	FC (€)	Somma FC (€)	Investimento (€)	Bilancio (€)
0	5%	-	-	-	-	24009.00	-24009.00
1	5%	0.95	0.95	7371.43	7371.43	-	-16637.57
2	5%	0.91	1.86	7020.41	14391.84	-	-9617.16
3	5%	0.86	2.72	6686.10	21077.94	-	-2931.06
4	5%	0.82	3.55	6367.72	27445.66	-	3436.66
5	5%	0.78	4.33	6064.49	33510.15	-	9501.15
6	5%	0.75	5.08	5775.71	39285.86	-	15276.86
7	5%	0.71	5.79	5500.67	44786.53	-	20777.53
8	5%	0.68	6.46	5238.74	50025.27	-	26016.27
9	5%	0.64	7.11	4989.27	55014.54	-	31005.54
10	5%	0.61	7.72	4751.69	59766.23	-	35757.23
11	5%	0.58	8.31	4525.42	64291.65	-	40282.65
12	5%	0.56	8.86	4309.92	68601.57	-	44592.57
13	5%	0.53	9.39	4104.69	72706.25	-	48697.25
14	5%	0.51	9.90	3909.23	76615.48	-	52606.48
15	5%	0.48	10.38	3723.07	80338.55	-	56329.55
16	5%	0.46	10.84	3545.78	83884.34	-	59875.34
17	5%	0.44	11.27	3376.94	87261.27	-	63252.27
18	5%	0.42	11.69	3216.13	90477.40	-	66468.40
19	5%	0.40	12.09	3062.98	93540.38	-	69531.38
20	5%	0.38	12.46	2917.12	96457.51	-	72448.51

Tabella 36: Analisi economico i=7%

FV (i=7%)							
n (anni)	i	1/(1+i) ⁿ	FA	FC (€)	Somma FC (€)	Investimento (€)	Bilancio (€)
0	7%	-	-	-	-	24009.00	-24009.00
1	7%	0.93	0.93	7233.64	7233.64	-	-16775.36
2	7%	0.87	1.81	6760.42	13994.06	-	-10014.94
3	7%	0.82	2.62	6318.15	20312.21	-	-3696.79
4	7%	0.76	3.39	5904.81	26217.02	-	2208.02
5	7%	0.71	4.10	5518.51	31735.53	-	7726.53
6	7%	0.67	4.77	5157.49	36893.02	-	12884.02
7	7%	0.62	5.39	4820.08	41713.10	-	17704.10
8	7%	0.58	5.97	4504.75	46217.85	-	22208.85
9	7%	0.54	6.52	4210.05	50427.90	-	26418.90
10	7%	0.51	7.02	3934.62	54362.52	-	30353.52
11	7%	0.48	7.50	3677.22	58039.74	-	34030.74
12	7%	0.44	7.94	3436.65	61476.39	-	37467.39
13	7%	0.41	8.36	3211.82	64688.22	-	40679.22
14	7%	0.39	8.75	3001.71	67689.92	-	43680.92
15	7%	0.36	9.11	2805.33	70495.25	-	46486.25
16	7%	0.34	9.45	2621.81	73117.06	-	49108.06
17	7%	0.32	9.76	2450.29	75567.35	-	51558.35
18	7%	0.30	10.06	2289.99	77857.33	-	53848.33
19	7%	0.28	10.34	2140.17	79997.51	-	55988.51
20	7%	0.26	10.59	2000.16	81997.67	-	57988.67

Tabella 37: Analisi economico i=10%

FV (i=10%)							
n (anni)	i	1/(1+i) ⁿ	FA	FC (€)	Somma FC (€)	Investimento (€)	Bilancio (€)
0	10%	-	-	-	-	24009.00	-24009.00
1	10%	0.91	0.91	7036.36	7036.36	-	-16972.64
2	10%	0.83	1.74	6396.69	13433.06	-	-10575.94
3	10%	0.75	2.49	5815.18	19248.23	-	-4760.77
4	10%	0.68	3.17	5286.52	24534.76	-	525.76
5	10%	0.62	3.79	4805.93	29340.69	-	5331.69
6	10%	0.56	4.36	4369.03	33709.72	-	9700.72
7	10%	0.51	4.87	3971.84	37681.56	-	13672.56
8	10%	0.47	5.33	3610.77	41292.33	-	17283.33
9	10%	0.42	5.76	3282.52	44574.84	-	20565.84
10	10%	0.39	6.14	2984.11	47558.95	-	23549.95
11	10%	0.35	6.50	2712.82	50271.77	-	26262.77
12	10%	0.32	6.81	2466.20	52737.97	-	28728.97
13	10%	0.29	7.10	2242.00	54979.98	-	30970.98
14	10%	0.26	7.37	2038.18	57018.16	-	33009.16
15	10%	0.24	7.61	1852.89	58871.06	-	34862.06
16	10%	0.22	7.82	1684.45	60555.50	-	36546.50
17	10%	0.20	8.02	1531.32	62086.82	-	38077.82
18	10%	0.18	8.20	1392.11	63478.93	-	39469.93
19	10%	0.16	8.36	1265.55	64744.48	-	40735.48
20	10%	0.15	8.51	1150.50	65894.98	-	41885.98

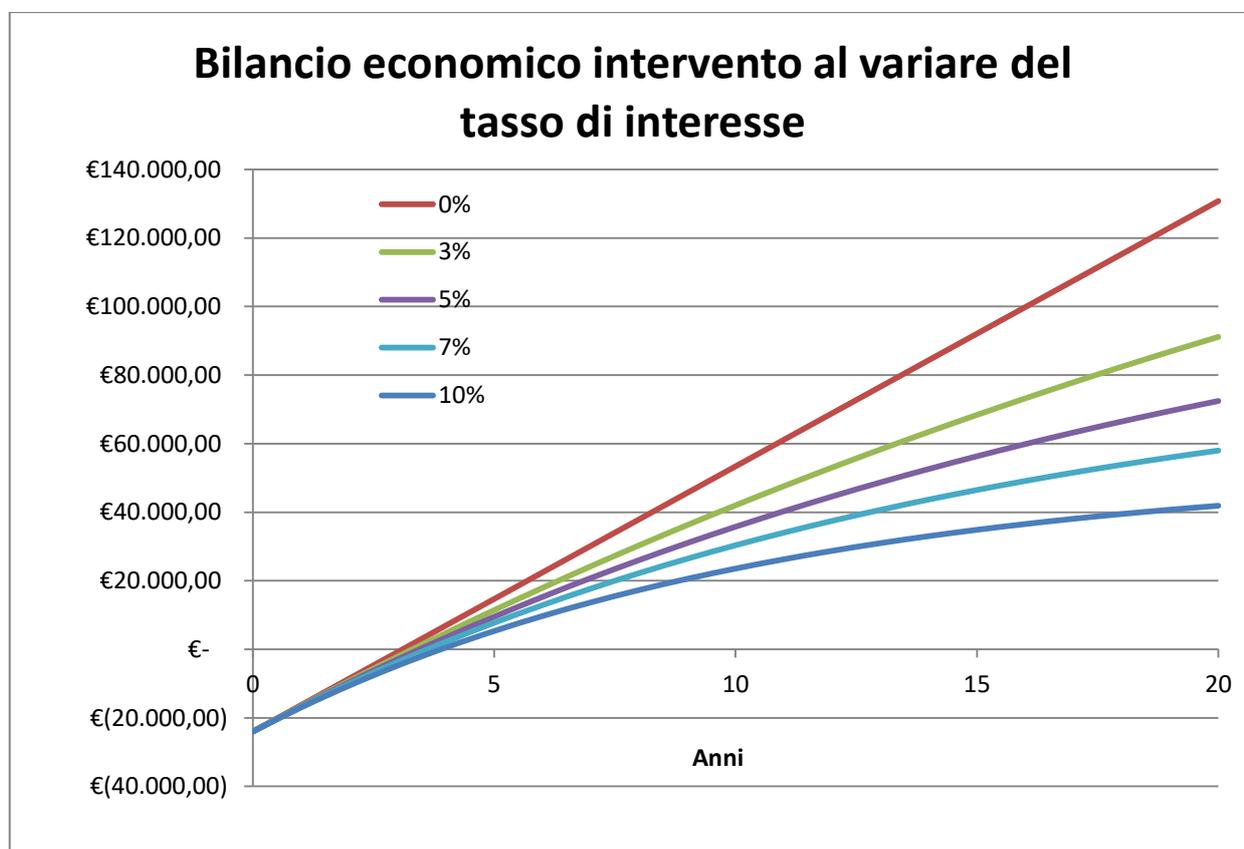


Figura 52: VAN al variare del tasso di interesse

Il tempo di ritorno dell'investimento, il VAN e l'indice di profitto in funzione del tasso di interesse sono riportati in Tabella 38.

Tabella 38: Indicatori economici intervento

i [%]	TRA [anni]	VAN [€]	IP [€/€]
0	3	130791.00	5.44
3	3	91142.66	3.79
5	3	72448.51	3.02
7	3	57988.67	2.42
10	4	41885.98	1.74

Dall'analisi economica risulta evidente come l'intervento proposto sia economicamente vantaggioso generando un VAN positivo. Indice di profitto sempre sopra all'unità e tempi di ritorno che oscillano tra i 3 ed i 4 anni in funzione del tasso di interesse.

In conclusione tramite questo intervento verrà ridotto il consumo di energia elettrica assorbita dalla rete di quasi il 10%. L'intervento proposto permette di superare la soglia di autoproduzione da fonte rinnovabile ma non permette, da solo, di raggiungere tutti i parametri per la classificazione dell'edificio come nZEB.

6.2 Classificazione nZEB interventi di retrofit

Sono stati calcolati, quindi, i valori dei parametri NZEB della soluzione con fotovoltaico, per verificare il raggiungimento dei requisiti previsti. Tali risultati sono mostrati in Tabella 38:

Tabella 39: Classificazione ZEB per efficientamento con fotovoltaico

Parametri	u.m.	Requisiti	Stato Post intervento
H'_T	[W/m ² K]	≤ 0.53	0.78
$A_{sol.est}/A_{sup\ utile}$	[-]	≤ 0.040	0.035
η_H	[%]	≥ 81%	85%
Ep_H	[kWh/m ²]	≤ 80.35	79.10
$Ep_{H.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 99.19	93.06
η_w	[%]	≥ 81%	85%
Ep_w	[kWh/m ²]	≤ 18.45	17.65
$Ep_{w.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 26.35	24.85
η_c	[%]	≥ 81%	85%
Ep_c	[kWh/m ²]	≤ 45.22	43.24
$Ep_{c.nd}$	[kWh/m ²]	≤ 52.77	52.34
Ep_t	[kWh/m ²]	≤ 5.46	3.58
Ep_v	[kWh/m ²]	≤ 22.47	17.45
Ep_L	[kWh/m ²]	≤ 21.15	18.65
Ep_{gl}	[kWh/m ²]	≤ 171.95	168.64
$P_{el.ren}$	[kW]	≥ 35.20	36
$CFE_{ren.ACS+CLIM}$	[%]	≥ 55	71%
$CFE_{ren.ACS}$	[%]	≥ 55	60%

L'installazione di un impianto fotovoltaico con potenza nominale superiore al valore minimo richiesto, installato sopra la copertura dell'edificio permetterebbe di raggiungere il valor minimo di potenza elettrica autoprodotta dall'edificio rispettando i criteri stabili dal D.M. Requisiti Minimi [4].

Nonostante questo intervento non è possibile raggiungere lo stato di NZEB a causa dell'impossibilità di agire sulla struttura opaca verticale esterna e quindi sul parametro H'_T che risulta comunque valore soddisfatto rispetto al valore limite stabilito per l'edificio di riferimento.

I risultati evidenziano come per un edificio vincolato, se non si considerasse il parametro H'_T , tutti i parametri per il raggiungimento dello stato di nZEB possono essere raggiunti applicando interventi di efficientamento adeguati. Se non si riesce ad agire sull'involucro, la definizione di nZEB viene meno a causa delle restrizioni che si hanno proprio su H'_T .

7 Considerazioni conclusive

Nell'ambito della presente ricerca si è valutata la effettiva corrispondenza tra i dati energetici stimati dalla simulazione effettuata con software Trnsys e i dati reali 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 ex-Banco di Napoli risulta essere un edificio con un involucro edilizio non prestante dal punto di vista energetico ma dotato di un efficiente sistema HVAC basato su un sistema a pompa di calore con un sistema di regolazione e controllo avanzato.

Al fine di validare il modello energetico implementato sono stati quindi confrontati i consumi di energia elettrica simulati con i valori di assorbimento di energia elettrica riportati nelle bollette dell'anno 2016.

Dai risultati del confronto evince che rispetto alle bollette si ha uno scostamento dai valori reali mensili rispetto a quelli ottenuti dalle simulazioni di circa il 5%, con unico caso, ottobre, dove si ha uno scostamento del 27%. 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.).

Se si calcola lo scostamento del consumo annuale simulato rispetto al consumo annuale reale, questo si attesta a circa al 0.2%.

Quindi, valutando questi scostamenti accettabili per tale tipo di modellazione, si ritiene che il modello implementato sia valido.

In seguito alla validazione dei risultati del modello di simulazione dinamico sono state successivamente realizzate altre simulazioni finalizzate a valutare costi e benefici di interventi di efficientamento finalizzati a rendere l'edificio un nZEB.

A causa del valore architettonico e culturale delle murature esterne e dei conseguenti vincoli in essere, alcuni necessari interventi di efficientamento dell'involucro edilizio esterno non possono essere realizzati e non è quindi stato possibile raggiungere la classe nZEB nonostante siano stati rispettati la totalità dei parametri riportati in Tabella 21 del presente rapporto.

Tramite l'intervento proposto di installazione di un impianto FV da 36 kWp (superiore al valore limite richiesto), integrato con la generazione di energia termica tramite le pompe di calore ed i sistemi VRV esistenti vengono rispettati i requisiti di consumo di energia termica da fonte rinnovabile e di consumo di energia elettrica da fonte rinnovabile.

L'analisi costi benefici condotta sull'intervento proposto evidenzia la bontà dell'intervento, presentando un VAN positivo di circa 84 mila euro ($i=5\%$), un TRA di 3 anni e un IP di 2.91

8 APPENDICE

8.1 Riassunto zone termiche

	Heating		Cooling		Ventilation	
	Codice	Numero	Codice	Numero	Codice	Numero
AIU1					BM3	3
AIU2						
AIU3					D	7
AIC1					BM1	2
					D	8
AIC2					D	1
AIW1	R	3			D	3
AIW2	R	5			D	6
AIW3	R	4			D	1
BIU1	R	3				
AOU1	FCE	4	FCE	4	BM1	1
	FCD	3	FCD	3	BM5	1
					BM3	1
AOU2						
AOU3	FCD	3	FCD	3	BM8	1
AOU4	FCE	4	FCE	4		
AOC1	FCF	3	FCF	3	BM8	3
AOC2	FCD	2	FCD	2	BM6	2
BOU1	FCD	1	FCD	1		
BOU2	FCB	1	FCB	1		
BOU3	FCC	1	FCC	1		
BOC1					BM6	2
BOW1					D	4
A1U1	FCE	10	FCE	10	BM5	3
	FCD	2	FCD	2	BM7	3
	FCC	2	FCC	2	BM6	2
A1U2	FCC	2	FCC	2	BM5	1
A1U3	FCD	3	FCD	3	BM5	1
A1U4	FCE	2	FCE	2	BM6	1
A1C1					BM9	2
A1W1	R	3				
A1W2	R	5				
B1U1	FCC1	9	FCC1	9	BM5	4
	FCD	1	FCD	1	BM2	6
	FCE	1	FCE	1	BM3	4
B1U2					BM3	3
B1C1						
B1W1	R	3				

B1W2	R	4				
A2U1	FCE	10	FCE	10	BM4	6
A2U2	FCD	8	FCD	8	BM5	5
A2C1	FCC	5	FCC	5	BM4	1
A2C2						
A2W1	R	5				
A2W2	R	3				
B2U1	FCB	1	FCB	1	BM4	4
	FCC1	8	FCC1	8	BM3	3
	FCD	3	FCD	3	BM2	2
B2U2	FCC	3	FCC	3	BM5	3
B2C1						
B2W1	R	3				
B2W2	R	3				
B3U1	FCC	11	FCC	11	BM4	11
B3U2	FCE	3	FCE	3	BM3	3
B3C1						
B3W1	R	3				
B3W2	R	3				
A3U1	FCC	8	FCC	8	BM6	7
A3U2	FCC	6	FCC	6	BM6	7
A3U3	FCD	3	FCD	3	BM6	3
A3C1	FCC	3	FCC	3		
A3W1	R	8				
A3W2	R	3				
B4U1	FCC	4	FCC	4	BM3	2
B4U2	FCD	10	FCD	10	BM4	10
B4C1						
B4W1	R	3				
B4W2	R	3				
B5U1	FCC	8	FCC	8	BM2	9
B5C1						
B5C2						
B5W1	R	2				
B5W2	R	2				

Dove:

- R=Radiatori
- FCX= Fan Coil di tipo X
- BM= bocchetta di mandata UTA (250 mc/h)
- D= Diffusore (150 mc/h)

Riferimenti bibliografici

- [1] Ente Italiano di Normazione . UNI 12464: Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni. Milano: UNI. 2013.
- [2] C. Pizzetti. Condizionamento dell'aria e refrigerazione. Teoria e calcolo degli impianti. Milano: CEA. 1985.
- [3] Solar Energy Laboratory. TRNSYS Program Guide: Multizonal Building. Madison. USA: University of Wisconsin-Madison, 2016.
- [4] D.M. 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”.
- [5] Norma UNI/TS 11300: “Prestazioni energetiche degli edifici”.
- [6] Sun Power. «Scheda Tecnica: Inverter Trifase.» 20 Maggio 2015, [Online], Available: <http://www.energeticasolareroma.com/energiasolare/wp-content/uploads/2015/01/scheda-tecnica-sun-power-327.pdf>. [Consultato il giorno 15 Giugno 2017].
- [7] Regione Lazio. «Prezzario Regione Lazio.» 05 Maggio 2016, [Online], Available: www.regione.lazio.it/binary/rl_main/tbl:documenti/INF_DGR_412_06_08_2012_Allegato3.pdf. [Consultato il giorno 10 Luglio 2017].

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). 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.

Alessia D'Angelo nata a L'Aquila nel 1988, dottoranda presso il dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE). Laureata in architettura (2010), facoltà "Architettura e Scienza della città" (SAC), laurea magistrale (2014), facoltà "Architettura e Restauro" (AR). Attività di pratica e collaborazione con funzioni tecniche presso studi architettura ed imprese (2009/2013). Ha collaborato con il progetto GISFER finalizzato all'analisi critica dei dati provenienti dal database su impianti ed energia rinnovabile della Regione Lazio per impianti ad energia solare

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.