

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Edile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Diagnosi energetica con metodo orario relativa ad un edificio
di tipo scolastico e pianificazione tecnico-economica degli interventi di
efficienza energetica**



Relatore

prof. Vincenzo Corrado

Candidato

Eugenio Stanca

Correlatore

prof. Ilaria Ballarini

Anno Accademico 2022-2023

Sommario

La scelta del presente lavoro di tesi nasce da un interesse maturato durante la formazione nei confronti del tema legato all'energetica dell'edificio, con lo scopo di applicare ed approfondire le nozioni apprese durante i corsi di "Energetica dell'Edificio" ed "Energy Audit and Certification of Buildings". Il suddetto lavoro prevede la redazione di una diagnosi energetica su base oraria riferita ad un reale caso studio costituito da un edificio pubblico di tipo scolastico situato nel Comune di Trepuzzi (LE).

In accordo con la definizione stessa di "Diagnosi Energetica" riportata dal D.Lgs 18/07/2016 n. 141 c.2 lett. «b-bis» gli obiettivi dello studio sono di ottenere un modello energetico dell'edificio allo stato di fatto di tipo adattato all'utenza, coerente con i consumi energetici reali rilevati e di valutare delle misure di intervento sull'esistente, volte alla riduzione del consumo energetico e della dipendenza da fonti non rinnovabili del sistema edificio-impianto e corredate da un'adeguata analisi costi-benefici.

Il lavoro si basa su un accurato rilievo del fabbricato e dei sistemi impiantistici, nonché dei dati relativi all'utenza in termini di gestione dell'impianto, profili di occupazione e consumi relativi ai vettori di energia elettrica e metano, riferiti alle ultime tre annualità consecutive documentate (2018-2020).

Per l'applicazione del metodo dinamico orario relativo al calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio introdotto dalla norma UNI EN 52016 è stato utilizzato il Software di calcolo "Ec 700" fornito in licenza da Edilclima. Dopo aver modellato il comportamento energetico del sistema edificio-impianto, è stata effettuata la calibrazione dello stesso attraverso un confronto tra i consumi calcolati per mezzo del modello energetico e i consumi reali dell'edificio desunti dalle bollette. Una volta ottenuto un modello adattato all'utenza e calibrato al fine di avere risultati che non fossero funzione delle particolari condizioni meteorologiche relative alle tre annualità considerate, si è proceduto con una valutazione della prestazione energetica di tipo adattato all'utenza ma caratterizzata da dati climatici orari di tipo standard.

Coerentemente con lo scopo di valutare il reale impatto energetico ed economico dei vari interventi di efficienza energetica, è stata condotta un'analisi dei costi-benefici prendendo in considerazione ogni intervento singolarmente. Sulla base dei risultati ottenuti, sono stati selezionati alcuni scenari collettivi comprendenti più misure di intervento. Questi risultati sono stati utilizzati per esprimere la convenienza o meno di un determinato scenario sia da un punto di vista prettamente economico in funzione del relativo costo globale e tempo di ritorno dell'investimento, sia in termini di dipendenza da fonti non rinnovabili per mezzo dell'indice di prestazione energetica non rinnovabile ($EP_{gl,nren}$).

I risultati ottenuti hanno messo in risalto l'importanza e le potenzialità di intervenire sul patrimonio edilizio mediante soluzioni atte a ridurre i consumi energetici e a minimizzare l'impatto ambientale degli edifici, aumentandone allo stesso tempo il benessere degli occupanti e il valore economico.

Abstract

The choice of the present thesis work stems from an interest developed during the training towards the topic related to building energy, with the aim of applying and deepening the notions learned during the courses of "Building Energetics" and "Energy Audit and Certification of Buildings". The aforementioned work involves the preparation of an energy diagnosis on an hourly basis referring to a real case study consisting of a public school-type building located in the Municipality of Trepuzzi (LE).

In accordance with the very definition of "Energy Diagnosis" reported by the D.Lgs 18/07/2016 n. 141 c.2 lett. "b-bis" the objectives of the study are to obtain an energy model of the state of the art adapted to the user, consistent with the actual energy consumption detected and to evaluate intervention measures on the existing, aimed at reducing energy consumption and dependence on non-renewable sources of the building-plant system with the related cost-benefit impact.

The work is based on an accurate survey of the building and plant systems, as well as utility data in terms of facility management, occupancy profiles, and consumption related to electricity and natural gas carriers, referring to the last three consecutive documented years (2018-2020).

For the application of the hourly dynamic method related to the calculation of the building energy demand introduced by the UNI EN 52016 standard, the "Ec 700" Calculation Software was used. After modeling the energy behavior of the building-plant system, its calibration was carried out through a comparison between the consumption calculated by means of the energy model and the actual building consumption deduced from utility bills. Once a user-adapted model was obtained and calibrated in order to have results that were not a function of the particular weather conditions of the three years under consideration, an evaluation of energy performance of a user-adapted type but characterized by standard hourly climatic data was carried out.

Consistent with the purpose of assessing the real energy and economic impact of various energy efficiency interventions, a cost-benefit analysis was conducted by considering each intervention individually. Based on the results obtained, a number of collective scenarios comprising multiple intervention measures were selected. These results were used to express the convenience or otherwise of a given scenario both from a purely economic point of view according to the relative overall cost and payback time of the investment, and in terms of dependence on nonrenewable sources by means of the non renewable energy performance index ($EP_{gl,ren}$).

The results obtained highlighted the importance and potential of intervening on the building stock through solutions to reduce energy consumption and minimize the environmental impact of buildings, while at the same time increasing their occupants' well-being and economic value.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	La crisi energetica e la dipendenza da fonti non rinnovabili.....	1
1.2	Lavoro di tesi: obiettivi e struttura	4
2	Quadro legislativo in tema di efficienza energetica degli edifici	6
2.1	L'evoluzione delle direttive europee in tema di efficienza energetica degli edifici	6
3	Quadro della normativa tecnica sul calcolo della prestazione energetica degli edifici	8
3.1	UNI EN ISO 52016-1	9
4	Approccio metodologico per la diagnosi energetica dell'edificio.....	21
5	Caso studio	24
5.1	Fabbricato	29
5.1.1	Involucro opaco	29
5.1.2	Involucro trasparente.....	35
5.1.3	Ponti termici	37
5.2	Sistema impiantistico.....	43
5.2.1	Servizio di riscaldamento	43
5.2.2	Servizio di produzione di acqua calda sanitaria.....	45
5.2.3	Servizio di illuminazione.....	46
5.2.4	Servizio di trasporto di persone e cose	47
5.3	Inventario energetico (<i>operational energy performance assessment</i>)	48
5.3.1	Rilievo dei consumi	48
5.3.2	Gas metano	49
5.3.3	Elettricit�	50
6	Valutazione energetica adattata all'utenza (<i>tailored energy performance assessment</i>).....	51
6.1	Dati climatici orari	51
6.2	Dati relativi all'utenza	52
6.2.1	Gestione dell'impianto.....	52
6.2.2	Profili di occupazione e sorgenti di calore interne	52
6.2.3	Zonizzazione	54
7	Calibrazione del modello	56
7.1	Procedura di calibrazione.....	56
7.2	Risultati calibrazione.....	62
8	Analisi tecnico economica di misure di efficienza energetica	63
8.1	Modello calibrato con dati climatici standard (<i>calibrated tailored energy performance assessment with standard climate</i>)	63
8.2	Analisi dei costi.....	65

8.3	Pianificazione degli interventi	67
8.4	Intervento_1_isolamento copertura	71
8.5	Intervento_2_sostituzione infissi	72
8.6	Intervento_3_isolamento pareti perimetrali esterne	73
8.7	Intervento_4_sostituzione generatore	74
8.7.1	Intervento_4a_sostituzione generatore	74
8.7.2	Intervento_4b_sostituzione generatore	75
8.8	Intervento_5_Installazione impianto fotovoltaico	77
8.9	Intervento_6_Installazione impianto solare termico	78
8.10	Scenari collettivi	79
8.11	Risultati analisi dei costi	81
9	Risultati valutazione energetica standard (<i>standard energy performance assessment</i>)	87
9.1	Attestato di prestazione energetica stato di fatto	87
9.2	Attestato di prestazione energetica post-intervento	88
10	Conclusioni.....	89
	Appendici.....	90
	Appendice A_ Rilievo fotografico.....	90
	Appendice B_ Rilievo corpi scaldanti	93
	Appendice C_ Rilievo corpi illuminanti e dispositivi elettronici.....	94
	Appendice E_ Schede tecniche	95
	Appendice E_ Computi metrici	99
	Indice figure.....	102
	Indice tabelle	104
	Bibliografia	106
	Ringraziamenti.....	107

"L'energia è sempre in movimento verso l'esterno o verso l'interno. Non può mai restare ferma: se fosse ferma non sarebbe energia, ma non esiste nulla che non sia energia. Quindi, tutto si sta muovendo in qualche modo."

[OSHO RAJNEESH]

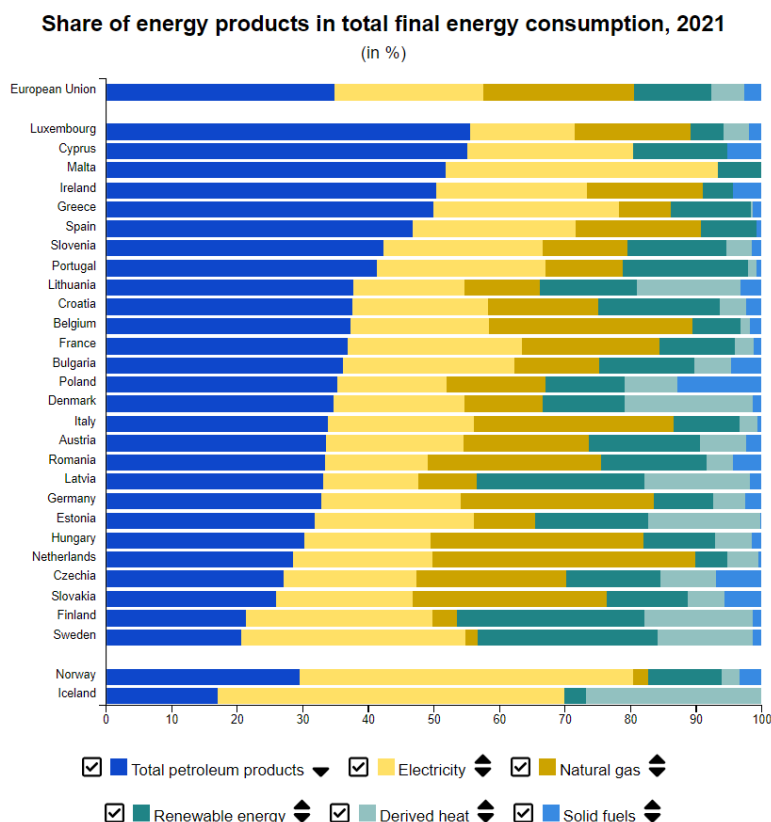
1 Introduzione

1.1 La crisi energetica e la dipendenza da fonti non rinnovabili

I recenti avvenimenti intercontinentali hanno minato il sistema economico mondiale, portando ad una delle più grandi crisi economiche della storia. Allo stesso tempo, questo particolare contesto ha rappresentato un'ottima occasione per mettere in luce alcune criticità, tra cui l'eccessiva dipendenza energetica, in particolare da fonti non rinnovabili, che contraddistingue molti Stati tra cui anche l'Italia.

Per avere un'idea della dipendenza energetica che caratterizza i paesi dell'Unione Europea è necessario analizzare e mettere in relazione tra loro il fabbisogno energetico con l'energia prodotta, esportata ed importata nel Continente Europeo. Infatti il livello di dipendenza energetica di uno Stato costituisce un parametro per quantificare il contributo fornito dalle importazioni al fabbisogno energetico e viene perciò calcolato rapportando le importazioni nette al consumo energetico interno.

All'interno dell'Unione Europea nel 2021 il consumo finale di energia si è attestato attorno ai 1.309 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep) ed è composto da prodotti petroliferi per il 34,8%, da gas naturale per il 23%, da energia elettrica (inclusa energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili) per il 22,8%, da energia rinnovabili (escluse l'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili) per il 12%, seguite da teleriscaldamento (5%) e combustibili fossili per il restante 2,6% [1]. Ciononostante, come è possibile notare dal grafico in figura 1, all'interno dell'Unione Europea, la ripartizione dell'energia finale nei vari prodotti energetici è caratterizzata da una importante variabilità tra gli Stati membri.



Source: Eurostat - [access to dataset](#)

Figura 1- Ripartizione del consumo energetico finale per vettore energetico 2021 (fonte Eurostat [1])

Secondo fonti Eurostat [1] nell'anno 2021 l'Unione Europea ha coperto il 44% del proprio fabbisogno energetico utilizzando energia prodotta all'interno dei propri confini, affidandosi quindi per il restante 56% alle importazioni.

Per quanto concerne la produzione di energia possiamo affermare che nel 2021 in media in Europa, come riportato nel diagramma in figura 2, seppur con le dovute distinzioni tra i vari Stati membri, il maggior contributo è costituito da energia rinnovabile (40,9%) seguito da energia nucleare (31,3%), combustibili solidi (18,1%), gas naturale (6,4%) e petrolio (3%). Questi dati forniscono un'analisi media, spesso poco rappresentativa della reale situazione dei singoli Stati membri, per tastare tale variabilità basti pensare che in Italia la produzione di energia primaria è associata ad energie rinnovabili (75,5%), greggio (14,3%), gas naturale (7,1%) e combustibili solidi (3%).

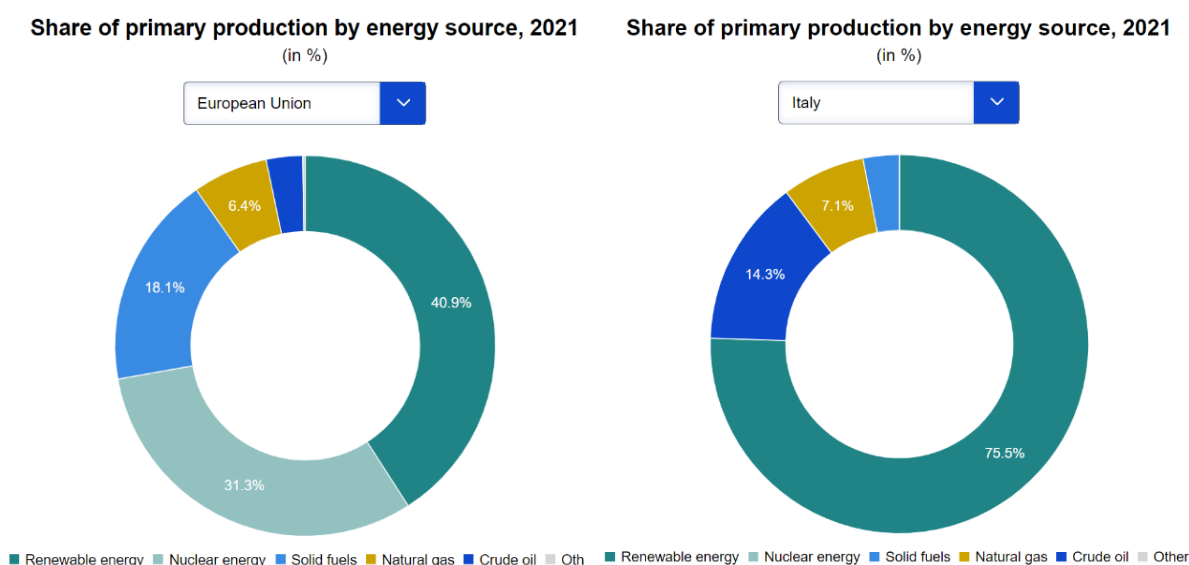


Figura 2 - Ripartizione dell'energia primaria prodotta per vettore energetico in Europa e in Italia nel 2021 (fonte Eurostat [1])

Analizzando le importazioni, riferite sempre al 2021, possiamo affermare che il restante 56% del fabbisogno energetico in Europa risulta essere coperto da importazioni provenienti da paesi esterni all'Unione Europea. Tali importazioni sono costituite in primo luogo da vettori energetici petroliferi (circa 64%), gas naturale (circa 25%) e combustibili fossili solidi (circa 6%). Tra i vari paesi da cui l'Europa importa tali prodotti energetici il primo posto è ricoperto dalla Russia, dalla quale riceviamo, rispetto alle importazioni totali, il 28% di petrolio e derivati, il 44% del gas naturale e il 52% dei combustibili fossili solidi [1].

Tali dati aggiornati al 2021, seppur soggetti a costanti cambiamenti a causa della delicata questione Russo-Ucraina, forniscono un quadro generale sui grandi passi compiuti dall'Europa in tema di utilizzo di fonti rinnovabili ma anche sull'ancora non trascurabile fabbisogno e dipendenza energetica soprattutto da fonti energetiche non rinnovabili. Alla luce di questo quadro le politiche europee hanno fissato degli obiettivi europei per il 2030 riguardanti il fabbisogno di energia primaria e finale ponendo limiti pari rispettivamente a 1128 e 846 Mtep, sempre per il 2030 vi è anche l'obiettivo europeo di una riduzione delle emissioni di gas serra del 55% rispetto al 1990. Questo obiettivo al 2030 presenta un passo intermedio verso il raggiungimento del ben più ambizioso obiettivo fissato per il 2050 di raggiungimento della completa neutralità climatica del continente europeo.

Non sarebbe la prima volta nella storia in cui crisi economiche ed instabilità geopolitiche creano scenari economico-energetici simili a quello attuale. Un esempio lampante è rappresentato dalla crisi del 1973 in cui l'instabilità dei governi orientali arabo e israeliano, tra i primi esportatori al mondo di combustibili fossili, ha prodotto una chiusura delle esportazioni di petrolio causando un innalzamento drastico dei relativi prezzi e una situazione di austerità anche in Italia come è possibile notare dal titolo riportato in figura 3 tratta dalla prima pagina dal Corriere Della Sera del 1973.



Figura 3- Prima pagina Corriere della Sera del 1973

Il maggior parallelismo con lo scenario attuale, oltre all' incremento dei costi relativi all'energia, è rappresentato dal fatto che sia allora che oggi questi contesti hanno provocato una decisa risposta da parte delle organizzazioni a livello mondiale, europeo e nazionale.

Infatti, così come oggi, anche nel 1976 la crisi energetica mise in luce l'eccessiva dipendenza da fonti non rinnovabili che portò ad esempio in Italia la prima normativa energetica ossia la legge 373/76 (G.U. 7 giugno 1976, n. 148: "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici") che prescriveva l'obbligo del calcolo delle dispersioni l'isolamento termico degli edifici e norme sulla progettazione degli impianti termici, quindi seppur con le dovute distinzioni possiamo parlare di cicli e ricicli storici.

1.2 Lavoro di tesi: obiettivi e struttura

Come brevemente accennato nell'Abstract/Sommario il presente lavoro di tesi ha come argomento la redazione di una diagnosi energetica rivolta ad un edificio di tipo scolastico, mirata alla pianificazione degli interventi di efficienza energetica.

Nello specifico il lavoro mira alla redazione di una diagnosi energetica mediante applicazione del metodo orario semplificato introdotto dallo Standard Europeo EN ISO 52016-1 ad un reale caso studio costituito da un edificio pubblico di tipo scolastico situato nel Comune di Trepuzzi in Provincia di Lecce.

Di seguito si riportano i principali argomenti trattati nei diversi capitoli:

Il primo capitolo introduttivo è dedicato ad una generale descrizione dell'attuale panorama energetico caratterizzante l'Unione Europea in termini di fabbisogni, produzione ed importazioni ripartita per vettore energetico.

Nel secondo capitolo vengono analizzate le Direttive Europee legate al tema dell'efficienza energetica degli edifici e la loro evoluzione nell'arco dell'ultimo trentennio.

Il terzo capitolo risulta essere dedicato alla presentazione della norma UNI EN ISO 52016.

Nel quarto capitolo viene approfondito il concetto di diagnosi energetica e la relativa metodologia in accordo con Linee Guida Enea relative alla diagnosi energetica degli edifici pubblici pubblicate nel 2019.

Nel quinto capitolo viene introdotto il caso studio in termini di descrizione generale del sito e del fabbricato, caratterizzazione geometrica e termofisica dei componenti di involucro opaco e trasparente, descrizione dei sistemi impiantistici relativi ai servizi presenti e raccolta dei consumi relativi alle ultime tre annualità documentate.

Il sesto capitolo è dedicato alla caratterizzazione dei dati di input alla valutazione energetica di tipo adattata all'utenza (Tailored Energy Assessment) in termini di dati climatici, gestione dell'impianto, profili di occupazione e zonizzazione dell'edificio.

Dopo aver modellato opportunamente il comportamento energetico dell'edificio utilizzando un Software certificato per l'analisi con metodo orario semplificato introdotto dalla norma UNI EN 52016 come "EC700", fornito da Edilclima, nel settimo capitolo viene affrontata la procedura di calibrazione del modello energetico in accordo con le Linee guida ASHRAE14-2014. Il modello è stato calibrato per mezzo del metodo della firma energetica e, una volta calibrato, la procedura di calibrazione viene validata per mezzo di indici statistici quali il MBE (Mean Bias Error) e il CV(RMSE) (Coefficient of Variation of the Roots Mean Square Error).

Validato il processo di calibrazione, al fine di ottenere risultati indipendenti dalle particolari condizioni meteorologiche delle tre annualità considerate, nell'ottavo capitolo si procede effettuando una valutazione della prestazione energetica dell'edificio di tipo adattato all'utenza ma caratterizzata da dati climatici orari in input alla modellazione di tipo standard (Tailored Energy Assessment with Standard Climate). Tale modello energetico costituirà il punto di partenza rispetto al quale valutare la convenienza o meno dei vari interventi considerati. Infatti sempre nel Capitolo 8, dopo aver analizzato lo stato di fatto e le relative principali criticità, al fine di valutare il reale l'impatto energetico ed economico dei vari interventi di efficienza energetica viene condotta un'analisi economica relativa ad ogni intervento preso singolarmente e successivamente, sulla base dei risultati ottenuti vengono selezionate alcune combinazioni comprendenti più misure di intervento assieme. Questi risultati vengono utilizzati per caratterizzare la convenienza di un determinato scenario energetico in termini

economici, energetici e ambientali, fornendo un ottimo strumento attraverso il quale, parallelamente al rispetto delle esigenze e gli obiettivi relativi alla committenza, viene selezionato uno scenario di intervento finale.

Il Nono Capitolo è dedicato alla redazione degli attestati di prestazione energetica relativi allo stato di fatto e allo scenario post intervento selezionato a valle dell'analisi dei costi.

Nel Decimo e ultimo Capitolo vengono riportate le conclusioni e le considerazioni finali in merito al lavoro svolto e ai risultati ottenuti.

2 Quadro legislativo in tema di efficienza energetica degli edifici

2.1 L'evoluzione delle direttive europee in tema di efficienza energetica degli edifici

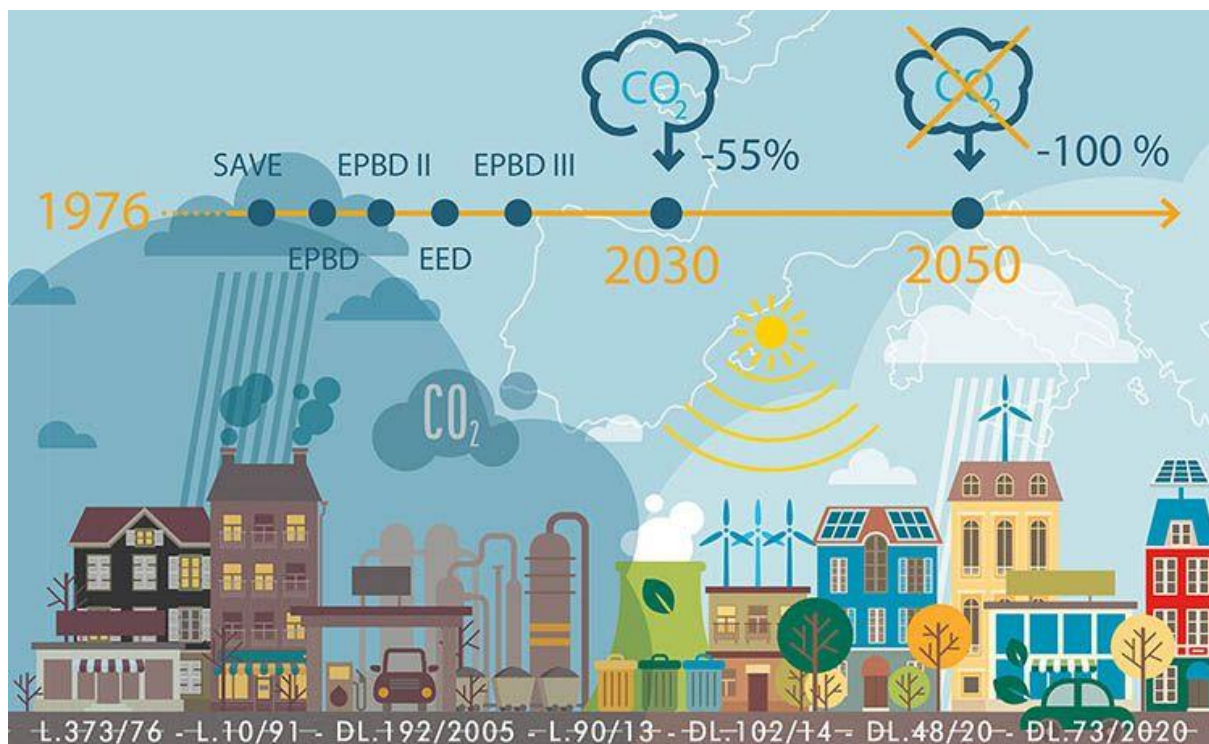


Figura 4 – Evoluzione delle Direttive Europee legate al tema dell'efficienza degli edifici [2]

A livello europeo il primo passo dal punto di vista normativo in tema di efficienza energetica degli edifici risale al 1993, anno in cui venne emanata la Direttiva 1993/76/CE.

Tale direttiva aveva l'obiettivo di ridurre le emissioni di CO₂ legate agli edifici, mediante un incremento dell'efficienza energetica degli stessi. È infatti in questa direttiva, nota anche come "Direttiva SAVE", che vengono introdotte a livello normativo una serie di misure come ad esempio la certificazione energetica degli edifici, il controllo periodico delle caldaie, l'isolamento per edifici nuovi e la diagnosi energetica per le imprese energivore [2].

Tuttavia l'evidenza e le gravi ripercussioni dei cambiamenti climatici portarono nel 1997 i paesi industrializzati a coalizzarsi nel contrastare il sempre più evidente fenomeno legato al surriscaldamento globale attraverso il Protocollo di Kyoto, accordo inteso a limitare le emissioni di gas serra in atmosfera.

Dinanzi a questo scenario di sempre maggior sensibilità e consapevolezza nei confronti dello scenario attuale l'Europa reagisce a partire dal 2002 varando la prima di una serie di direttive europee legate all'efficienza energetica degli edifici note con l'acronimo EPBD (Energy Performance of Building Directive).

È infatti con la prima di questo pacchetto di direttive comunitarie ossia la Direttiva 2002/92/UE che vengono introdotti obblighi e requisiti prestazionali a livello energetico per gli edifici. Tale direttiva propone una metodologia per il calcolo del rendimento energetico degli edifici considerando all'interno del calcolo i servizi energetici di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, acqua calda sanitaria e illuminazione. In particolare è a questa direttiva, nota come Ecbd (I), che si deve l'introduzione dell'applicazione dei requisiti minimi per edifici di nuova costruzione e sottoposti a ristrutturazione

importante. Inoltre al suo interno contiene una serie di indicazioni riguardanti la certificazione energetica degli edifici e l'obbligo di un attestato di certificazione energetica (ACE) dalla validità decennale da redigere in caso di compravendita, locazione o nuova costruzione di un immobile. In Italia la Direttiva è stata recepita dal Dlgs 192/2005 attraverso il quale si è cercato di promuovere la diversificazione energetica e l'utilizzo di energia proveniente da fonti rinnovabili mediante la definizione dei principi e delle procedure per incrementare l'efficienza energetica del patrimonio immobiliare italiano.

Nel 2010 viene emanata la Direttiva Europea 2010/31/UE nota come "Epbid Recast" che rappresenta appunto una revisione della precedente Direttiva 2002/92/UE. Questa direttiva, conferma il principale obiettivo della Epbid (I) di migliorare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente e degli edifici di nuova costruzione e, al fine di rendere efficaci e incisivi gli interventi di miglioramento della prestazione energetica, la Epbid Recast integra le precedenti disposizioni introducendo una diversificazione in funzione delle caratteristiche meteo-climatiche esterne nonché della zona climatica. Un ulteriore passo in avanti introdotto in questa Direttiva è costituito dal grande processo di affinamento della metodologia riguardante il calcolo della prestazione energetica degli edifici. Infatti la metodologia proposta considera non solo le proprietà dell'edificio in termini di caratteristiche del fabbricato e dei sistemi impiantistici ma anche l'orientamento dell'edificio e i relativi sistemi passivi di protezione solare. Si deve inoltre a questa Direttiva l'obbligo del livello "Nzeb" (Nearly Zero Energy Building) per tutte le nuove costruzioni da inizio 2021.

Il 2012 vede la pubblicazione della Direttiva Europea 2012/27/UE nota come (EED Energy Efficiency Directive) intesa appunto ad incrementare l'efficienza energetica in Europa del 20% entro il 2020. In vista di questo ambizioso obiettivo una serie di raccomandazioni e obblighi sono stati rivolti agli Stati membri. Tra i principali troviamo l'obbligo da inizio 2014 per gli Stati membri di garantire che almeno il 3% della superficie utile dell'intero patrimonio della pubblica amministrazione sia soggetto ad interventi di efficienza energetica volti a garantire il rispetto dei requisiti minimi, come riportato nella Epbid Recast. Inoltre anche in questa direttiva come nella precedente direttiva 2010/31/UE continua l'invito per gli Stati membri ad adottare una programmazione strategica degli interventi di efficienza energetica sul patrimonio edilizio esistente, accompagnati anche da incentivi di natura statale. In Italia la Direttiva Epbid 2012/27/UE è stata recepita dal Decreto Legislativo 4 luglio 2014 n. 102 con il quale viene fissato per il 2020 l'obiettivo a livello nazionale di riduzione rispetto all'anno 2010 dei consumi di energia primaria ed energia finale rispettivamente di 20 e 15,5 milioni di tonnellate equivalenti di olio (Mtoe). Il decreto sofferma l'attenzione sul settore della Pubblica Amministrazione fissando l'obiettivo al 2020 di sottoporre a riqualificazione energetica almeno il 3% all'anno della superficie utile climatizzata oppure di risparmiare fino al 2020 non meno di 0.04 Mtep. Un altro settore interessato dal decreto risulta essere quello industriale con l'obbligo da dicembre 2015 per le aziende energivore di effettuare diagnosi energetiche atte a ridurre i consumi.

Un ulteriore passo in avanti all'interno del panorama europeo legato all'energetica dell'edificio è stato compiuto con l'entrata in vigore il 24/12/2018 della Direttiva Europea 2018/844/UE, nota con l'acronimo di Epbid (III). Tale direttiva, integra e razionalizza le precedenti direttive europee 2010/31/UE e 2012/27/UE, spingendo verso un'ulteriore accelerazione del processo di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente finalizzata al raggiungimento dell'obiettivo fissato al 2050 di raggiungimento della neutralità climatica del continente europeo. Un'importante aggiornamento rispetto alla precedente direttiva 2010/31/UE riguarda la promozione dei sistemi di automazione e controllo dell'edificio, noti con l'acronimo di BACS "Building Automation and Control System". Tali sistemi consentono di automatizzare una pluralità di azioni atte ad ottimizzare e razionalizzare la gestione dei sistemi impiantistici e i consumi di un edificio, per tale motivazione la direttiva in esame propone l'adozione di un parametro per quantificare il livello di automazione degli edifici, così come già avviene per la classificazione energetica.

3 Quadro della normativa tecnica sul calcolo della prestazione energetica degli edifici

Il complesso quadro normativo europeo legato al tema dell'efficienza energetica degli edifici sviluppato nell'ultimo decennio da parte dell'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) e anche dal Comitato Europeo per la Standardizzazione (CEN) può essere in prima approssimazione suddiviso in tre macro-categorie di Standard riguardanti rispettivamente il fabbricato inteso come componente passiva dell'edificio, gli impianti tecnici e un'ultima categoria rappresentata dallo Standard EN ISO 52000 noto anche con l'appellativo di "Overarching Standard".

Lo Standard EN ISO 52000 costituisce il principale Standard all'interno del pacchetto di Standard introdotto all'interno del DM 480 sull'efficienza energetica degli edifici. Infatti, sebbene sia supportato da una molteplicità di altri standard riguardanti specifiche parti del calcolo della prestazione energetica degli edifici, questo Standard è basato su un approccio di tipo olistico poiché consente di compiere il bilancio energetico finale, di calcolare l'energia consegnata ed esportata e di applicare correttamente i fattori di conversione per convertire l'energia finale in energia primaria.

Per quanto concerne la famiglia di standard riguardanti il fabbricato inteso come elemento passivo, la norma di riferimento generale è rappresentata dalla ISO 52017-1:2017 la quale fornisce le procedure, le ipotesi e le equazioni generali finalizzate al calcolo, in condizioni transitorie orarie o sub-orarie, delle temperature interne (dell'aria e operative) e/o dei carichi di riscaldamento, raffreddamento, umidificazione e deumidificazione per mantenere uno specifico set point (temperatura, umidità) in una singola zona dell'edificio. Data la sua generalità la norma può essere applicata anche a metodi dinamici dettagliati. L'adozione di un metodo dinamico dettagliato permette, all'interno di una procedura di modellazione energetica di un edificio, di prendere in considerazione le proprietà non lineari del fabbricato e dei relativi impianti tecnici, aumentando l'accuratezza del calcolo, tale incremento di accuratezza risulta però essere inequivocabilmente accompagnato da un maggiore complessità relativa al calcolo e ai parametri di input.

Tale esigenza ha condotto alla pubblicazione dello standard ISO 52016:2017 "Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads" il quale presenta due metodi di calcolo semplificati dei carichi e dei fabbisogni energetici sensibili e latenti, rispettivamente su base oraria e mensile.

In particolare il metodo di calcolo orario semplificato risulta essere caratterizzato da una minore accuratezza rispetto ai metodi dinamici dettagliati ma da una sostanziale maggiore trasparenza e riproducibilità. In questo modo il metodo consente di considerare le variazioni giornaliere ed orarie delle condizioni meteo-climatiche esterne, dell'utilizzo della struttura e dei relativi sistemi impiantistici, considerando su base oraria gli effetti derivanti dalla loro mutua interazione, mantenendo al tempo stesso pressoché lo stesso numero di parametri di input che caratterizzano il metodo mensile. In questo modo, il metodo orario semplificato risulta essere un metodo caratterizzato da un ottimo compromesso tra accuratezza, riproducibilità e trasparenza.

Le generali procedure e di equazioni introdotte dalla ISO 52017-1 2017 vengono riprese e dettagliate all'interno dello standard ISO 52016-1:2017, introducendo specifiche ipotesi, condizioni al contorno e semplificazioni.

Lo Standard, come riportato in figura 5, richiama una serie di altri Standard e presenta un ampio campo di applicazione che va dagli edifici di tipo residenziale ai non residenziali, siano essi di nuova costruzione, esistenti o in fase di progetto.

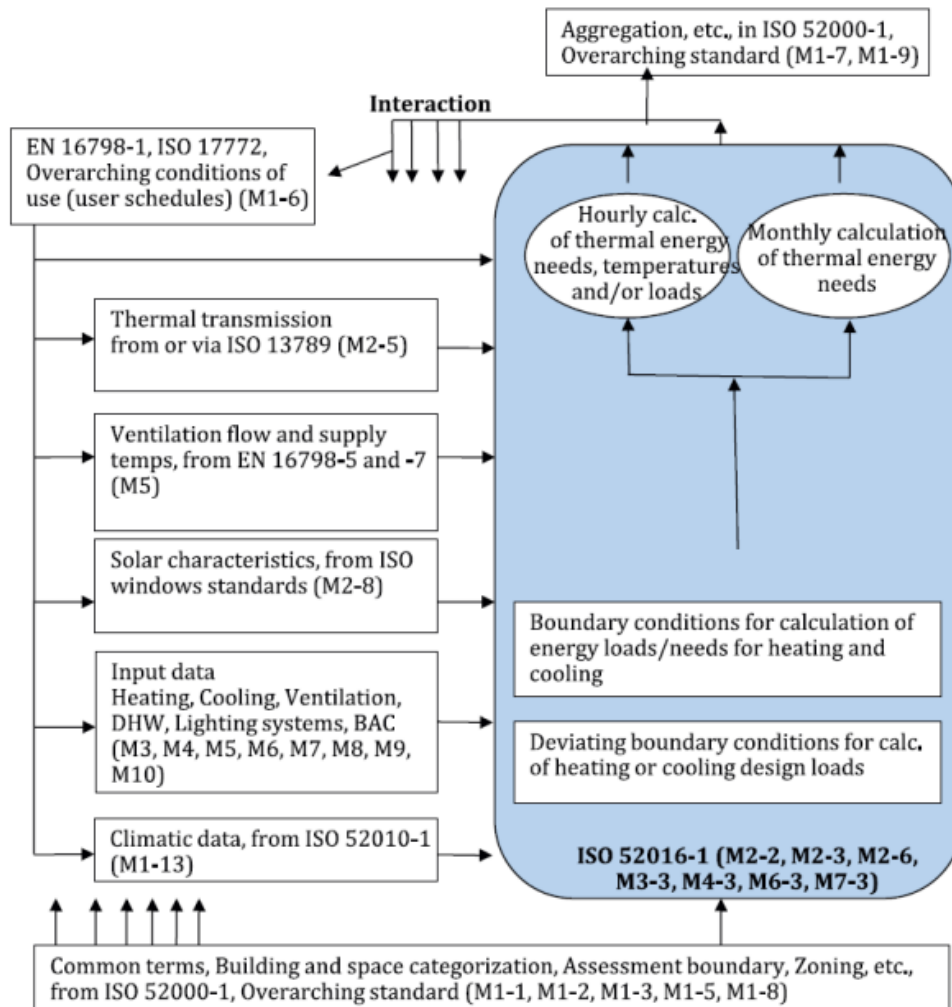


Figura 5 - Standard richiamati dallo Standard ISO 52016-1

3.1 UNI EN ISO 52016-1

Lo standard europeo EN ISO 52016:2017 entrato in vigore in Europa il 21 giugno 2017 è stato normato in Italia a marzo 2018 attraverso la pubblicazione della norma UNI EN ISO 52016:2018 [4] la quale introduce due metodi semplificati rispettivamente su base mensile ed oraria.

La norma consente di calcolare attraverso i metodi mensile ed orario semplificato:

- i fabbisogni sensibili per riscaldamento e raffrescamento;
- i fabbisogni latenti per la (de)umidificazione.

Inoltre applicando esclusivamente il metodo orario è possibile calcolare anche:

- la temperatura interna (anche in assenza di impianto “free floating conditions”);
- i carichi termici sensibili per riscaldamento e raffrescamento;
- i carichi termici latenti per la (de)umidificazione;
- i carichi termici di progetto sensibili per il riscaldamento/raffrescamento;

- i carichi termici di progetto latenti;
- le caratteristiche dell'aria di mandata per garantire l'eventuale necessaria (de)umidificazione;

Tra le varie norme abolite riportate in tabella 1 è importante sottolineare la norma UNI EN ISO 13790:2008 sulla quale ancora oggi si basa il calcolo dei fabbisogni energetici dell'involucro, infatti sebbene la pubblicazione della UNI EN ISO 52016 risalga a marzo 2018 ad oggi non è stata ancora recepita essendo ancora in corso i lavori di stesura delle nuove UNI TS 11300. Tra le principali modifiche troviamo la revisione del metodo di calcolo mensile, l'abolizione del metodo stagionale e la sostituzione del metodo orario semplificato con il nuovo metodo introdotto nella UNI EN ISO 52016, il quale risulta essere caratterizzato da una maggior trasparenza e semplicità dei parametri di input. Inoltre sono state anche apportate delle integrazioni alle regole di zonizzazione e al calcolo dei carichi sensibili e latenti di progetto invernale ed estivo.

Norme abolite dalla norma UNI EN ISO 52016-1	
UNI EN 15265:2008	Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici - Criteri generali e procedimenti di validazione
UNI EN 15255:2008	Calcolo del carico sensibile di raffrescamento di un ambiente - Criteri generali e procedimenti di validazione
UNI EN ISO 13790:2008	Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento
UNI EN ISO 13791:2012	Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Criteri generali e procedure di validazione
UNI EN ISO 13792:2012	Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Metodi semplificati

Tabella 1 - Norme abolite dalla norma UNI EN ISO 52016-1

Il metodo introdotto dalla norma riprende e dettaglia le assunzioni fornite dallo standard ISO 52017-1 2018 introducendo alcune ipotesi semplificative riportate di seguito:

- la zona termica costituisce un ambiente chiuso separato mediante elementi edilizi da altre zone climatizzate, dall'esterno, da locali non climatizzati e da locali riscaldati ad una diversa temperatura;
- gli elementi che delimitano una zona termica sono ipotizzati come costituiti da materiali aventi proprietà termiche e fisiche costanti nel tempo, senza escludere però variazioni delle caratteristiche degli elementi in seguito ad un'attivazione.
- la temperatura radiante dell'ambiente esterno all'edificio, esclusa la volta celeste, è ipotizzata pari alla temperatura dell'aria esterna;
- all'interno dei locali dotati di elementi finestrati, la radiazione solare è considerata uniformemente distribuita e costante nel tempo;
- la discretizzazione degli elementi comporta una distribuzione semplificata della massa
- le proprietà termico-solari degli elementi di involucro trasparenti, sebbene nella realtà siano strettamente legate alla posizione del sole e quindi all'angolo di incidenza della relativa radiazione solare, vengono semplificate rendendo i contributi solari indipendenti dall'angolo di incidenza sui componenti;
- la temperatura media radiante è ottenuta come la media delle temperature superficiali interne di ogni elemento pesata sulla rispettiva area dell'elemento
- i coefficienti di scambio termico convettivo, relativi alle superfici interna ed esterna, e i coefficienti di scambio termico radiativo caratterizzanti il lato esterno dell'involucro disperdente verso l'ambiente esterno, nonostante nella realtà siano strettamente correlati agli andamenti delle condizioni meteo-climatiche esterne, vengono semplificati ed ipotizzati costanti nel tempo.

Per quanto concerne il calcolo dei carichi e dei fabbisogni termici, la norma prevede la possibilità di scegliere, in funzione degli obiettivi e del campo di applicazione, tra due tipologie di calcolo:

- calcolo di base dei fabbisogni e carichi termici;
- calcolo con impianto specifico dei fabbisogni e carichi termici.

La prima tipologia di calcolo non prende in considerazione i reali impianti tecnici installati all'interno dell'edificio e assume, come riportato in tabella 2, la presenza di un impianto avente potenza infinita tale da garantire che le condizioni termo-igrometriche interne corrispondano in ogni istante alle condizioni standard previste per la categoria di locale considerato. Poiché tale calcolo prescinde dall'impianto realmente installato nell'edificio, i carichi termici vengono considerati come di natura puramente convettiva e l'impianto è caratterizzato da un funzionamento a regime continuo. L'applicazione del calcolo di base risulta di particolare interesse nei casi di scelta e dimensionamento dell'impianto da installare.

La seconda tipologia di calcolo presentata all'interno della norma è costituita dal calcolo con impianto specifico, nel quale, a differenza del calcolo di base, i fabbisogni ed i carichi energetici vengono calcolati considerando i reali sistemi impiantistici installati nell'edificio ed il loro reale funzionamento. Per tanto, tale procedura consente di considerare le reali caratteristiche relative ai sistemi impiantistici in termini di effettive potenze installate e reali quote convettive relative al sistema di riscaldamento e raffrescamento. Un'ulteriore differenza rispetto al calcolo di base consiste nel poter considerare le perdite di calore recuperabili e differenti valori e profili relativi alla temperatura di set-point. Sono contemplate in aggiunta anche le situazioni di limitazione della stagione di riscaldamento/raffrescamento e di assenza di impianto relativo ai servizi di riscaldamento e raffrescamento.

	Carico e fabbisogno di riscaldamento/raffrescamento «ideale»	Carico e fabbisogno di riscaldamento/raffrescamento «con un impianto specifico»
Condizioni	Le specifiche dell'impianto non sono note	Il tipo e il progetto dell'impianto sono noti
Obiettivi	Deve essere valutata l'utilizzabilità dell'impianto	Devono essere valutati gli effetti di una specifica gestione
Proprietà		
Funzionamento	continuo	non continuo
Potenza termica	nessuna limitazione	limitata (disponibile)
Perdite di energia termica	non recuperabili	ulteriormente specificate
Tipo di emissione termica	solo convettiva	convettiva e radiativa

Tabella 2 – Caratteristiche calcolo carico e fabbisogno di riscaldamento/raffrescamento in condizioni ideali e con impianto specifico

Una volta descritte le due procedure è utile sottolineare come, mentre nel primo caso il calcolo restituisca esclusivamente informazione sui valori relativi ai fabbisogni energetici richiesti dal fabbricato, nel calcolo con sistema specifico, con impianti di potenza finita, questi risultati sono accompagnati da informazioni sulla capacità dell'impianto di garantire o meno il raggiungimento delle temperature di set-point desiderate, in tal modo è possibile ricavare il grado di sottodimensionamento dell'impianto espresso in funzione del numero di ore in cui l'effettiva temperatura raggiunta negli ambienti interni non raggiunge quella desiderata di set-point.

Da quanto sopra riportato si evince come il calcolo del bilancio termico sensibile di una zona termica dipende dal rapporto tra i carichi sensibili per raffreddamento/riscaldamento e la potenza disponibile dall'impianto, in questo modo è possibile delineare, come riportato in figura 6, 5 possibili casistiche:

- La prima è costituita da tutti quei casi in cui la zona termica richiede di essere riscaldata, ma la potenza dell'impianto non è sufficiente a garantire il raggiungimento della temperatura desiderata di set-point ($T_{int} < T_{set-point}$);
- Il secondo caso è rappresentativo di tutti quei casi in cui la zona termica richiede di essere riscaldata e la potenza dell'impianto è sufficiente a garantire la temperatura desiderata di set-point. In questi casi la potenza dell'impianto viene modulata tra la potenza massima e il valore 0. ($T_{int} = T_{set-point}$);
- Il terzo caso comprende tutte quelle situazioni in cui la zona termica non richiede né di essere riscaldata né di essere raffrescata, questa condizione viene definita "free floating condition" e consente di calcolare la temperatura interna della zona;
- Il quarto caso rappresenta l'analogo del caso 2 ma in regime di raffrescamento, descrivendo dunque quei casi in cui la zona termica richiede di essere raffrescata e la potenza dell'impianto è sufficiente a garantire il raggiungimento della temperatura di set-point ($T_{int} = T_{set-point}$);
- Il quinto ed ultimo caso rappresenta l'analogo del caso 1 ma in regime di raffrescamento, infatti racchiude tutte quelle situazioni in cui la zona termica richiede di essere raffrescata ma la potenza dell'impianto non risulta sufficiente a garantire il raggiungimento della temperatura interna di set-point desiderata ($T_{int} > T_{set-point}$).

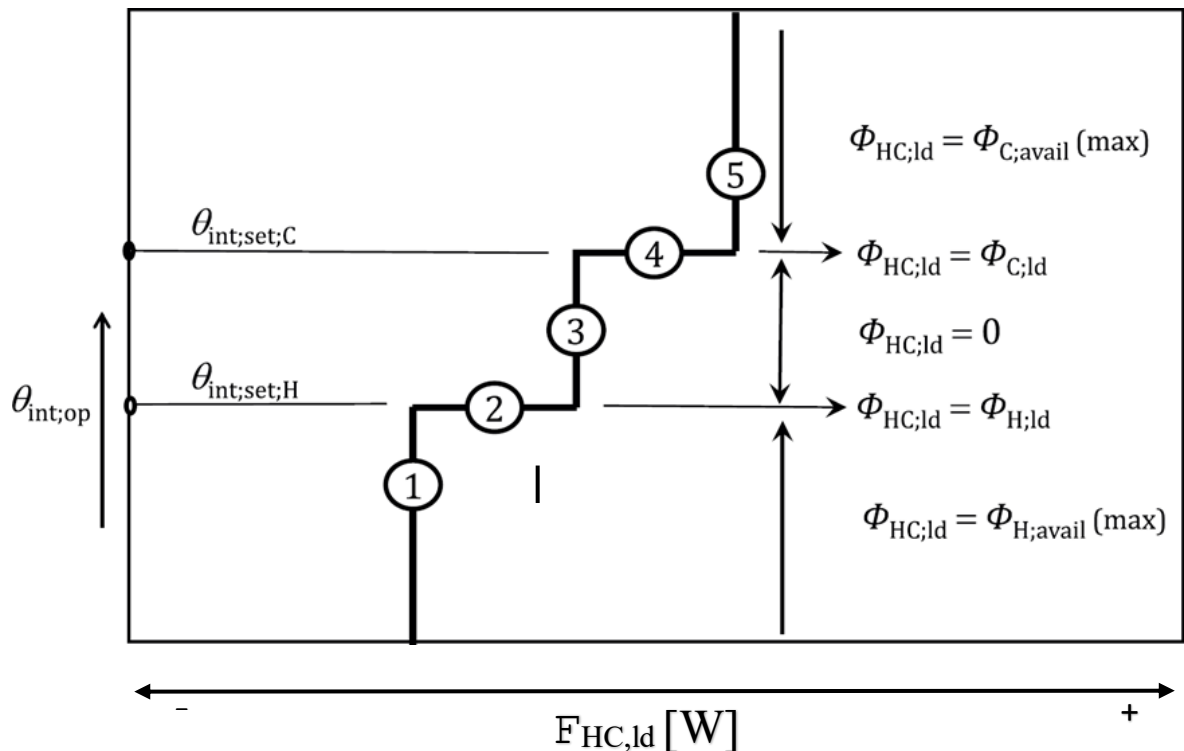


Figura 6 - Calcolo carichi termici sensibili di riscaldamento/raffrescamento e temperature UNI EN ISO 52016-1

La norma fornisce per il calcolo dei carichi termici di riscaldamento/raffrescamento una ben definita formulazione matematica costituita dalla soluzione di una matrice di equazioni lineari per ogni zona termica considerata all'interno della modellazione.

Le equazioni si basano sulle procedure generali proposte dalla ISO 52017-1 nella quale vengono considerati i bilanci termici sull'aria interna e sulle facce interne ed esterne di ognuno degli elementi che racchiude la zona termica.

Il metodo orario semplificato descritto nella UNI EN ISO 52016 si basa su un approccio di discretizzazione alle differenze finite delle equazioni differenziali che sono alla base del processo di scambio termico che caratterizza la conduzione termica all'interno dell'elemento edilizio. In tal modo tutte le equazioni coinvolte risultano essere o vengono rese lineari, ottenendo così una matrice quadrata di equazioni lineari facilmente risolvibile mediante metodi matematici standard.

Per ogni zona termica e per ogni intervallo temporale considerato all'interno della simulazione, la matrice quadrata di scambio termico è descritta dalla formulazione riportata di seguito:

$$[A] \cdot [X] = [B]$$

Dove

- la matrice $[X]$ rappresenta la matrice delle temperature nodali e costituisce l'incognita da ricavare.
- $[A]$ rappresenta la matrice (nota) dei coefficienti che moltiplicano le temperature;
- la matrice $[B]$ rappresenta una matrice (nota);

Risolvendo questo sistema di equazioni lineari siamo in grado di calcolare passo dopo passo tutti i valori relativi al vettore delle temperature nodali costituito dai valori orari di temperatura dell'aria interna e di ogni elemento di chiusura.

Per descrivere il principio di discretizzazione alla base del metodo si riporta di seguito un esempio relativo riferito ad un nodo esemplificativo.

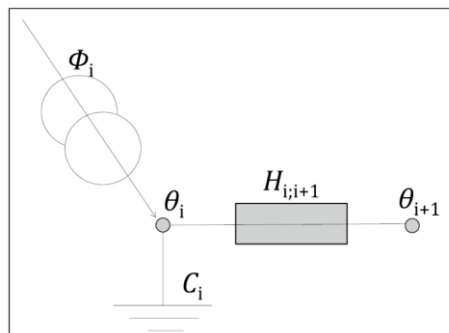


Figura 7 – Schematizzazione nodale

Osservando la schematizzazione riportata in figura 7 possiamo notare la presenza di un nodo i avente temperatura pari a ϑ_i , il quale risulta corredato da una capacità termica C_i e collegato mediante una conduttanza termica $H_{i,i+1}$ al nodo i+1 adiacente, il quale risulta a sua volta caratterizzato da una diversa temperatura ϑ_{i+1} , infine il termine Φ_i rappresenta gli apporti termici derivanti dal contributo solare o dalle sorgenti di calore interne. Lo schema consente di fare un parallelismo tra il modello

termico sopra riportato, denominato appunto “Modello RC”, ed un circuito di tipo elettrico, dove la resistenza termica, la capacità termica e la temperatura riportate nello schema possono essere rispettivamente equiparate ad una resistenza elettrica, un condensatore e al voltaggio elettrico.

La discretizzazione, come riportato nella formula seguente, consiste nel passaggio dalle derivate temporali della temperatura alle variazioni della temperatura espresse come differenze finite tra l'intervallo temporale considerato e quello precedente.

$$C_i \cdot \frac{d\vartheta_i}{dt} \approx \frac{C_i}{\Delta t} \cdot (\vartheta_{i;t} - \vartheta_{i;t-1})$$

Dove:

- C_i indica la capacità termica del nodo i ;
- $\frac{d\vartheta_i}{dt}$ indica la derivata temporale della temperatura del nodo i ;
- $\vartheta_{i;t}$ indica il valore della temperatura del nodo i ;
- $\vartheta_{i;t-1}$ indica il valore della temperatura del nodo i ;

In questo modo è possibile scrivere il bilancio termico riferito al nodo i -esimo considerato, riportata di seguito.

$$\frac{C_i}{\Delta t} \cdot (\vartheta_{i;t} - \vartheta_{i;t-1}) = H_{i;i} \cdot (\vartheta_{i;t} - \vartheta_{i+1;t}) + \Phi_i$$

Dove:

- Φ_i rappresenta gli apporti termici dovuti alla sorgente solare o agli apporti interni;
- $H_{i;i}$ indica la conduttanza termica che collega il nodo i al nodo adiacente $i+1$.

Dopo aver descritto la discretizzazione operata all'interno del presente metodo orario semplificato, il bilancio termico sull'aria interna presentato dalla metodologia generale all'interno dello standard ISO 52017, può essere riscritto discretizzando la derivata temporale relativa alla temperatura interna come riportato di seguito.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{C_{int,ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci,eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve,vei,t} + H_{tr,tb,ztc} \right] \cdot \theta_{int,a,ztc,t} - \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci,eli} \cdot \theta_{pln,eli,t}) \\ & = \frac{C_{int,ztc}}{\Delta t} \cdot \theta_{int,a,ztc,t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve,vei,t} \cdot \theta_{sup,vei,t}) + H_{tr,tb,ztc} \cdot \theta_{e,a,t} \\ & + f_{int,c} \cdot \Phi_{int,a,ztc,t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol,ztc,t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{HC,ztc,t} \end{aligned}$$

Dove:

- $C_{int,ztc}$ indica la capacità termica dell'aria e di tutti gli oggetti interni alla zona termica;

- A_{eli} indica l'area dell'elemento di chiusura eli;
- $h_{ci,eli}$ indica il coefficiente di scambio termico convettivo dell'elemento eli;
- $H_{ve,vei,t}$ indica lo scambio termico per ventilazione;
- $H_{tr,tb,ztc}$ indica lo scambio termico attraverso gli elementi di ponte termico;
- $\theta_{int,a,ztc;t}$ indica la temperatura interna al tempo t;
- $\theta_{pln,eli;t}$ indica la temperatura del nodo relativo alla superficie interna dell'elemento eli;
- $\theta_{int,a,ztc;t-1}$ indica la temperatura interna al tempo t-1;
- $\theta_{sup,vei,t}$ indica temperatura relativa all'aria di mandata;
- $\theta_{e,a,t}$ indica la temperatura esterna al tempo t;
- $f_{int,c}$ indica frazione convettiva degli apporti interni;
- $\Phi_{int,ztc;t}$ indica gli apporti termici dovuti alle sorgenti interne;
- $f_{sol,c}$ indica la frazione convettiva degli apporti solari;
- $\Phi_{sol,ztc;t}$ indica gli apporti termici dovuti alla sorgente solare;
- $f_{H/c,c}$ indica la frazione convettiva degli apporti solari;
- $\Phi_{HC,ztc;t}$ indica gli apporti termici dovuti agli impianti di riscaldamento/raffrescamento.

Passando al bilancio termico riferito agli elementi di chiusura dell'involucro edilizio, la norma prevede due possibili metodi di modellazione dei componenti edilizi di chiusura.

La prima modalità di modellizzazione si basa sul metodo originale introdotto dallo standard europeo EN ISO 52016-1, il quale fornisce un modello a parametri concentrati la cui schematizzazione di carattere generale riferita ad un elemento di chiusura opaco riportata in figura 8.

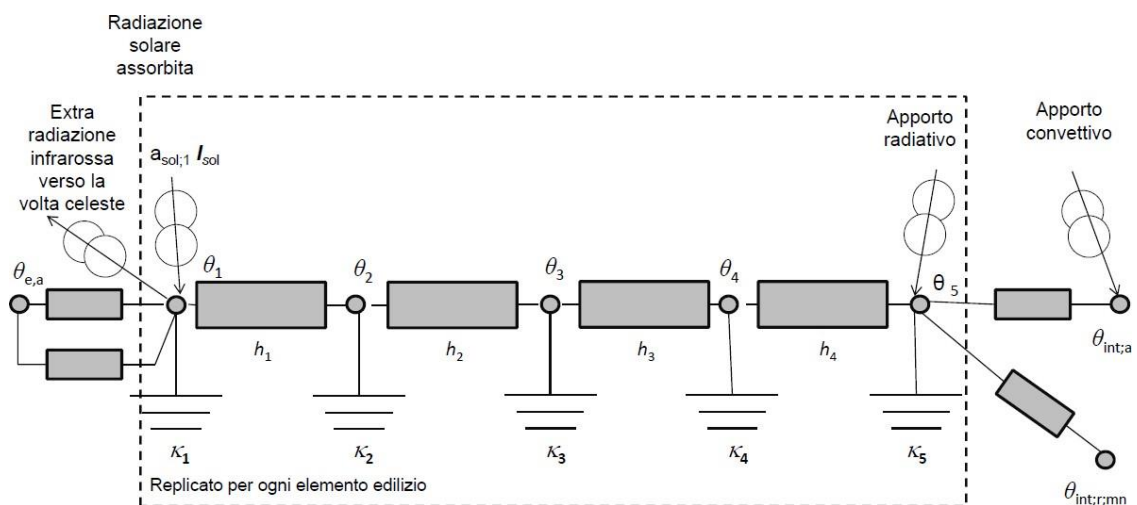


Figura 8-Modellazione a parametri concentrati di un componente opaco di involucro (UNI EN ISO 52016-1)[5]

Dallo schema è possibile evincere la presenza di 5 nodi, di cui 3 interni e i restanti due disposti rispettivamente sulle facce interne ed esterne dell'elemento opaco.

Il nodo 1 insiste sulla faccia esterna dell'elemento e collega quest'ultimo all'ambiente esterno alla zona termica caratterizzato da un temperatura $\theta_{e,a}$, scambiando con esso calore per convezione ed irraggiamento. Tale nodo è contraddistinto da uno scambio termico per extra radiazione con la volta celeste e da un apporto termico dovuto alla radiazione solare incidente sulla faccia esterna dell'elemento, la quale viene in parte assorbita dall'elemento stesso.

La faccia interna dell'elemento è invece rappresentata dal nodo 5 il quale scambia calore per irraggiamento e convezione con l'ambiente interno alla zona termica, in questo caso però, come si evince dalla figura, la zona termica è caratterizzata da due differenti nodi. Infatti lo scambio termico per radiazione avviene tra il nodo 5 e il nodo interno alla zona avente temperatura pari alla temperatura media radiante $\theta_{int;r,mn}$, mentre lo scambio termico per convezione avviene tra il nodo 5 e il nodo interno alla zona termica contraddistinto da un a temperatura pari alla temperatura interna $\theta_{int;a}$. Su questo nodo interno agiscono i contributi solari, i quali attraversano i componenti finestrati e vengono successivamente riflessi e diffusi sulle superfici interne di tutti gli elementi di chiusura.

I cinque nodi risultano essere ognuno ad una propria capacità termica k_i e risultano essere collegati in serie mediante 4 resistenze termiche h_i .

La conduttanza termica tra il nodo pli e il nodo $pli-1$ appartenenti all'elemento eli è data da:

$$h_{pl4;eli} = h_{pl4;eli} = \frac{6}{R_{c,eli}}$$

$$h_{pl2;eli} = h_{pl3;eli} = \frac{3}{R_{c,eli}}$$

Dove $R_{c,eli}$ indica la resistenza dell' elemento considerato depurata dai contributi relativi ai coefficienti di scambio termico liminare interno ed esterno.

$$R_{c,eli} = \frac{1}{U_{eli}} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_{ie}}$$

In base al posizionamento della massa all'interno dell'elemento edilizio la norma prevede 5 classi di distribuzione della massa riportate in figura 9.

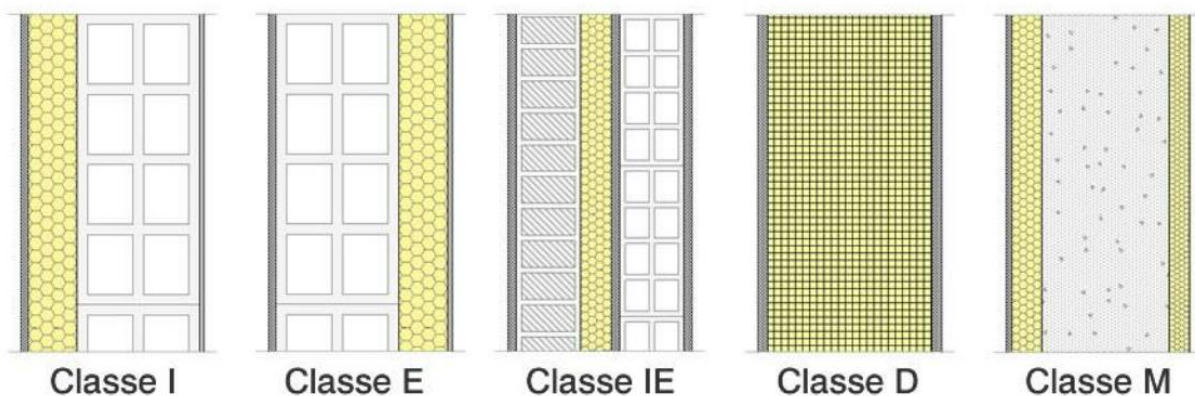


Figura 9 - Classificazione in funzione della distribuzione della massa

La norma prevede un'ulteriore classificazione degli elementi edilizi in funzione della massa e in particolare della capacità termica areica $k_{m,op}$ caratterizzante il componente. Tale parametro espresso in $J/(m^2 \cdot K)$ viene calcolato come:

$$k_{m,op} = \sum_{j=1}^n \rho_j \cdot s_j \cdot c_j$$

Dove

- ρ_j indica la densità del materiale relativo allo strato j -esimo;
- s_j indica lo spessore dello strato j -esimo;
- c_j indica il calore specifico dello strato j -esimo.

In funzione di tale parametro è possibile individuare 5 classi come riportato in tabella 3.

Class	$\kappa_{m,op}$ [J/(m ² ·K)]	Specification of the class
Very light	50 000	Construction containing no mass components, other than e.g. plastic board and/or wood siding, or equivalent
Light	75 000	Construction containing no mass components other than 5 to 10 cm lightweight brick or concrete, or equivalent
Medium	110 000	Construction containing no mass components other than 10 to 20 cm lightweight brick or concrete, or less than 7 cm solid brick or heavy weight concrete, or equivalent
Heavy	175 000	Construction containing 7 to 12 cm solid brick or heavy weight concrete, or equivalent
Very heavy	250 000	Construction containing more than 12 cm solid brick or heavy weight concrete, or equivalent

Tabella 3 - Classificazione degli elementi di involucro in funzione della capacità termica areica

Una volta note la distribuzione della massa all'interno dell'elemento e la relativa capacità termica areica, quest'ultima viene ripartita tra i nodi dell'elemento edilizio in funzione della classe di concentrazione dello stesso, come riportato di seguito in tabella 4.

Classe I (massa concentrata sul lato interno)	Classe I (massa concentrata sul lato interno)
$k_{p15;eli} = k_{m;eli}$	$k_{p12;eli} = k_{p13;eli} = k_{p14;eli} = \frac{k_{m;eli}}{4}$
$k_{p11;eli} = k_{p12;eli} = k_{p13;eli} = k_{p14;eli} = 0$	$k_{p11;eli} = k_{p15;eli} = \frac{k_{m;eli}}{4}$
Classe I (massa concentrata sul lato interno)	Classe I (massa concentrata sul lato interno)
$k_{p11;eli} = k_{m;eli}$	$k_{p11;eli} = k_{p12;eli} = k_{p14;eli} = k_{p15;eli} = 0$
$k_{p12;eli} = k_{p13;eli} = k_{p14;eli} = k_{p15;eli} = 0$	$k_{p13;eli} = k_{m;eli}$
Classe I (massa concentrata sul lato interno)	
$k_{p11;eli} = k_{p15;eli} = \frac{k_{m;eli}}{2}$	
$k_{p12;eli} = k_{p13;eli} = k_{p14;eli} = 0$	

Tabella 4 - Distribuzione della capacità termica in funzione del posizionamento della massa

Il secondo metodo di modellizzazione degli elementi edilizi è introdotto all'interno dell'appendice nazionale della UNI EN ISO 52016. Tale approccio deriva dal lavoro condotto dalla commissione tecnica UNI/CT 202 e consiste in un miglioramento del metodo originale introdotto dalla EN ISO 52016 precedentemente descritto.

L'obiettivo di questo metodo è quello di rendere più riproducibile e più precisa la modellizzazione degli elementi opachi. Infatti rispetto all'approccio originale, il presente metodo non considera un numero fisso di nodi pari a 5, ma considera un numero di nodi variabile in funzione delle caratteristiche e del posizionamento degli strati all'interno della stratigrafia considerata, garantendo almeno un nodo rappresentativo per ogni strato.

Un'ulteriore rilevante modifica consiste nel fatto che, come riportato nello schema in figura 10, mentre nell'approccio originale tutti i nodi sono contraddistinti da una capacità termica, nel metodo introdotto nell'appendice italiana i nodi sulla faccia esterna ed interna del componente edilizio non sono nodi capacitivi, quindi possono solo scambiare calore ma non capaci di immagazzinarlo al loro interno.

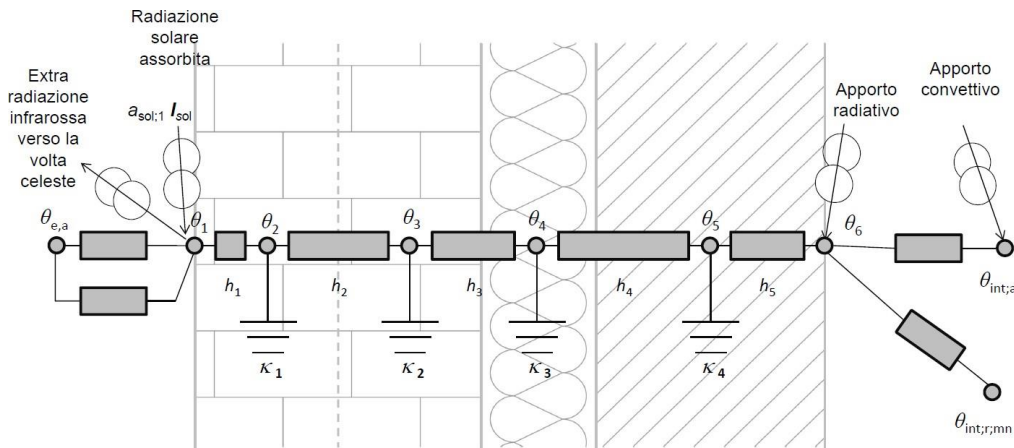


Figura 10 - Modellizzazione a parametri concentrati di un componente opaco di involucro (UNI EN ISO 52016-1_Appendice Nazionale)[5]

Per poter risolvere il sistema di equazioni lineari precedentemente descritto è necessario, per ognuno degli elementi di delimitazione della zona termica, risolvere un'equazione per ciascun nodo costituente l'elemento.

Le equazioni relative al bilancio energetico sul nodo superficiale interno ed esterno e sui nodi interni all'elemento sono riportati di seguito.

Equazione di bilancio energetico lato interno (nodo $pli = n$)

$$\begin{aligned}
 & -(h_{pli-1,eli} \cdot \theta_{pli-1,eli;t}) + \left[\frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} + h_{ci,eli} + h_{ri,eli} \cdot \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \right) + h_{pli-1,eli} \right] \cdot \theta_{pli,eli;t} \\
 & - h_{ci,eli} \cdot \theta_{int,a;zt;t} - \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \cdot h_{ri,eli} \cdot \theta_{pli,elk;t} \right) \\
 & = \frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli,eli;t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[(1 - f_{int,c}) \cdot \Phi_{int,ztc;t} + (1 - f_{sol,c}) \cdot \Phi_{sol,ztc;t} + (1 - f_{H/C,c}) \cdot \Phi_{HC,ztc;t} \right]
 \end{aligned}$$

Dove:

- $h_{pli-1,eli}$ indica la conduttanza tra i nodi pli e pli-1 dell'elemento eli;
- $\theta_{pli-1,eli;t}$ indica la temperatura relativa al nodo pli-1 dell'elemento eli al tempo t;
- Δt indica l'intervallo temporale tra l'istante t e t-1;
- $k_{pli,eli}$ indica la capacità termica del nodo pli dell'elemento eli;
- $h_{ci,eli}$ indica il coefficiente di scambio termico convettivo dell'elemento eli;
- $h_{ri,eli}$ indica il coefficiente di scambio termico convettivo dell'elemento eli;
- A_{elk} indica l'area della superficie interna dell'elemento di involucro considerato;
- A_{tot} indica l'area totale della superficie interna degli elementi di chiusura della zona termica;
- $\theta_{pli,eli;t}$ indica la temperatura del nodo interno al tempo t;
- $\theta_{int;a;zt;t}$ indica la temperatura interna alla zona termica la tempo t;
- $\theta_{pli;elk;t}$ indica la temperatura di tutte le superfici con le quali la superficie in esame scambia calore per radiazione infrarossa al tempo t;
- $\theta_{pli,eli;t-1}$ indica la temperatura del nodo interno al tempo t-1;
- $(1 - f_{int,c})$ indica la frazione non convettiva degli apporti termici interni;
- $\Phi_{int;ztc;t}$ indica gli apporti termici dovuti alle sorgenti di calore interne alla zona termica al tempo t;
- $(1 - f_{sol,c})$ indica la frazione non convettiva degli apporti solari;
- $\Phi_{sol;ztc;t}$ indica gli apporti termici solari al tempo t;
- $(1 - f_{H/c,c})$ indica la frazione non convettiva relativa al contributo termico fornito dall'impianto;
- $\Phi_{HC;ztc;t}$ indica il contributo termico fornito dall'impianto al tempo t;

Equazione di bilancio energetico nodi interni

$$-h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-1;eli;t} + \left[\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli;eli} + h_{pli-1;eli} \right] \cdot \theta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} = \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1}$$

Equazione di bilancio energetico lato esterno (nodo)

$$\left(\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli;eli} \right) \cdot \theta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} \\ = \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + (h_{ce;eli} + h_{re;eli}) \cdot \theta_{e;t} + a_{sol;pli;eli} \cdot (I_{sol;dif;eli;t} + I_{sol;dir;eli;t} + F_{sh;obst;eli;t}) - \Phi_{sky;eli;t}$$

Dove:

- $(h_{ce;eli} + h_{re;eli})$ indica il coefficiente liminare esterno;
- $\theta_{e;t}$ indica la temperatura esterna;
- $a_{sol;pli;eli}$ indica l'assorbimento solare;
- $I_{sol;dif;eli;t}$ indica l'irradianza solare diffusa incidente sull'elemento eli ;
- $I_{sol;dir;eli;t}$ indica l'irradianza solare diretta al tempo t ;
- $F_{sh;obst;eli;t}$ indica il fattore di schermatura da parte degli ostacoli esterni all'edificio;
- $\Phi_{sky;eli;t}$ indica l'extra flusso termico di natura infrarossa verso la volta celeste.

4 Approccio metodologico per la diagnosi energetica dell'edificio

L'approccio metodologico adottato per redigere il presente lavoro di diagnosi rispecchia gli step e le modalità riportate all'interno delle "Linee Guida Enea relative alla diagnosi energetica rivolta ad edifici pubblici" [3] riportati nel diagramma in figura 11.

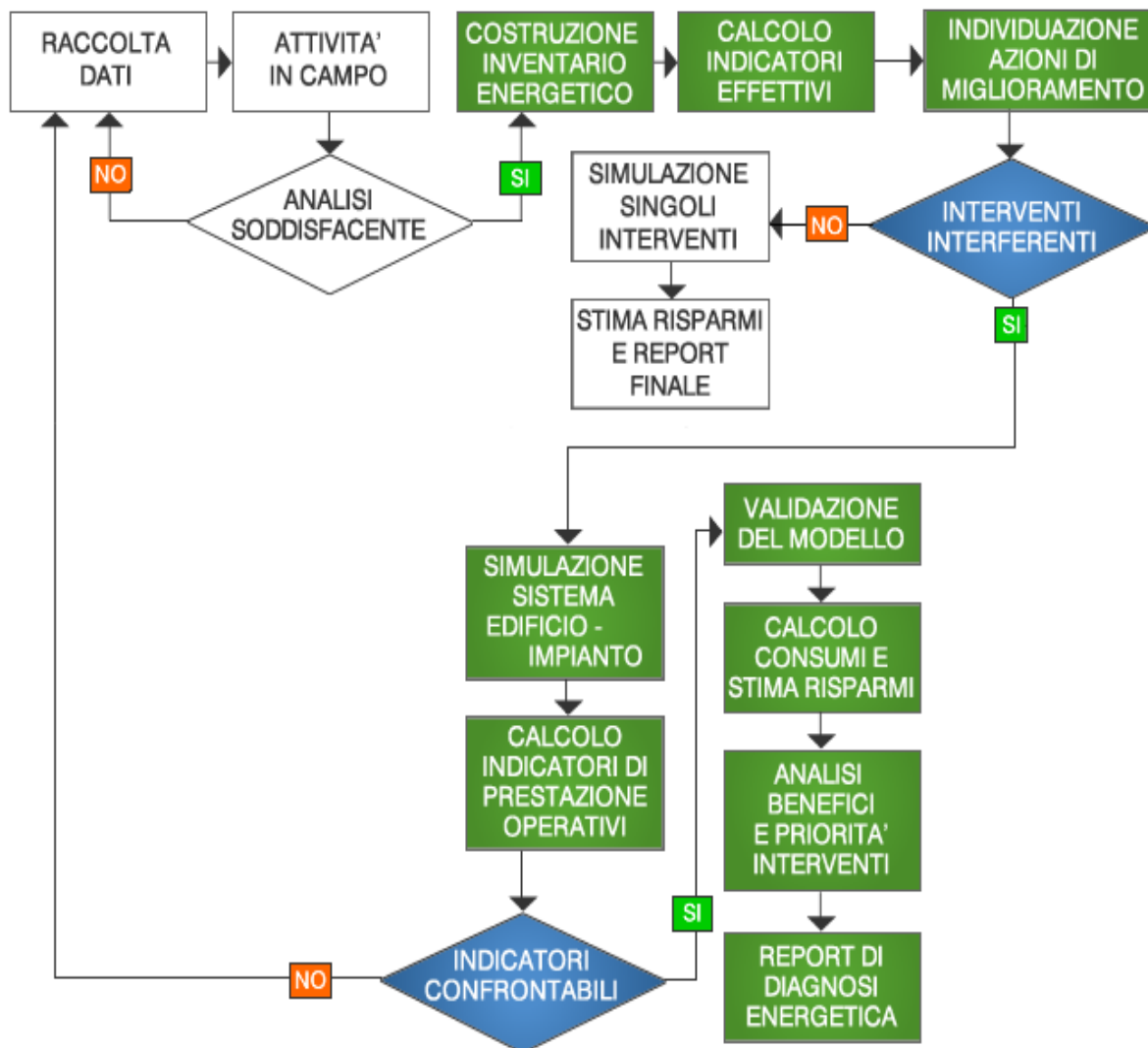


Figura 11 -Diagramma di flusso Diagnosi Energetica (Rielaborato da Manuale per la diagnosi energetica degli edifici pubblici, ENEA, 2019) [3]

Il primo step all'interno della procedura di diagnosi energetica è rappresentato dal reperimento dei dati di input alla modellazione energetica, dati che è possibile ottenere mediante rilievo in situ, consultazione di attestati di prestazione energetica o altro materiale preesistente e/o interrogazione dell'utenza [3].

I principali dati da collezionare riguardano:

- la caratterizzazione dimensionale e termofisica del fabbricato e dei sistemi impiantistici;

- la caratterizzazione del profilo di utilizzo dell'edificio in termini di gestione degli impianti e profili di utilizzo da parte dell'utenza;

- la caratterizzazione e il reperimento dei dati climatici esterni relativi alle ultime tre annualità consecutive

- reperimento dei consumi registrati per ciascun vettore energetico relativi alle tre annualità considerate.

Il passo successivo è la creazione del cosiddetto "Inventario Energetico" che consiste nella ripartizione per ogni vettore energetico e per ognuna delle tre annualità considerate dei consumi registrati tra i vari servizi energetici caratterizzanti l'edificio. Tale inventario restituisce un'immediata idea sul contributo dei diversi servizi energetici al consumo totale.

I dati reperiti nelle prime fasi vengono utilizzati per creare un modello energetico dell'edificio che simuli al meglio il sistema edificio- impianto, il quale, oltre alla caratterizzazione del fabbricato e dei sistemi impiantistici, tenga conto delle reali condizioni al contorno in termini di comportamento dell'utenza e condizioni meteorologiche. Tale modello è dunque ottenuto mediante una valutazione di tipo adattata all'utenza (Tailored Energy Assessment).

I risultati ottenuti dal modello adattato all'utenza vengono confrontati con i risultati derivanti dalla valutazione energetica di tipo operativo (Operational Energy Assessment). Tale confronto prende il nome di calibrazione e costituisce un'importante procedura che rappresenta il carattere intrinsecamente iterativo della diagnosi energetica. All'interno del presente lavoro la calibrazione del modello energetico sui consumi reali, come descritto dettagliatamente nel capitolo 7, è stata condotta in accordo con le Linee Guida ASHRAE 14-2014, utilizzando il metodo grafico relativo alla firma energetica, mentre la validazione della procedura di calibrazione è stata eseguita sulla base del rispetto dei limiti relativi a due indici statistici Mean Bias Error (MBE) e CV(RMSE) (Coefficient of Variation of the Roots Mean Square Error).

Nel caso in cui i consumi calcolati tramite la valutazione di tipo adattato all'utenza si discostino dai consumi registrati in misura tale da non soddisfare i limiti relativi ai due indici statistici considerati si provvede ad interpretare i risultati ottenuti e ad intervenire in maniera iterativa sui dati di input alla modellazione.

Una volta ottenuto il modello energetico calibrato e validato, si procede caratterizzando il modello appena ottenuto con dati climatici di tipo standard. Questa standardizzazione dei dati climatici di input consente di ottenere dei risultati che non siano funzione delle particolari condizioni meteorologiche relative alle tre annualità considerate. In questo modo il modello energetico adattato all'utenza ma caratterizzato da dati climatici di tipo standard viene utilizzato come modello base e punto di partenza rispetto al quale valutare gli effetti delle misure di efficienza energetica.

Le caratteristiche e le criticità evidenziate dai risultati di tale modellazione, assieme alle esigenze della committenza, forniscono la base per una corretta pianificazione degli interventi di efficienza energetica da considerare. Infatti il primo passo per poter valutare l'effettiva convenienza delle misure di efficienza energetica considerate è quello di effettuare un'analisi dei costi in esercizio della struttura allo stato di fatto.

All'interno del presente lavoro, dopo aver pianificato i singoli interventi da considerare, si è proceduto ad analizzarli dapprima separatamente e successivamente sono stati combinati tra di loro attraverso la creazione di diversi scenari collettivi comprendenti scenari di riqualificazione energetica e ristrutturazione importante di primo e secondo livello.

L'analisi dei costi, trattata in dettaglio nel capitolo 8, è stata condotta in accordo con la norma europea EN 15459-1:2017 “Energy performance of building–Economic evaluation procedure for energy system in building-Part 1: Calculation procedures”, per ognuno dei singoli interventi e scenari esaminati l'analisi si è basata sui seguenti indicatori economici:

- Valore attuale netto (VAN);
- Tempo di ritorno dell'investimento;
- Costo globale;

La “bontà” di un intervento o di uno scenario, come è possibile notare nel capitolo relativo ai risultati dell'analisi dei costi, è stata quantificata sia in termini puramente economici che in termini di dipendenza da fonti non rinnovabili, per mezzo dell'indice di prestazione globale non rinnovabile $E_{p,gl,nren}$.

La procedura di diagnosi energetica si conclude con un report completo e riepilogativo del lavoro svolto e dei risultati ottenuti.

5 Caso studio

L'immobile oggetto del presente lavoro di tesi è costituito, come precedentemente accennato, da un edificio pubblico di tipo scolastico situato in viale Europa n.21 nel Comune di Trepuzzi in Provincia di Lecce. Il Comune è caratterizzato da 1224 Gradi Giorno e, in accordo con il Decreto del Presidente della Repubblica n.412 del 26 Agosto 1993, classificato in zona climatica C. Il territorio comunale risulta costituito da una morfologia pianeggiante, tipica del Tavoliere Leccese, che lo accoglie e si estende su un'area di circa 22 km² che va dai 33 ai 60 metri s.l.m., questa porzione di territorio appartiene alla cosiddetta "Valle della Cupa" zona pianeggiante di depressione carsica che circonda il Capoluogo Leccese.

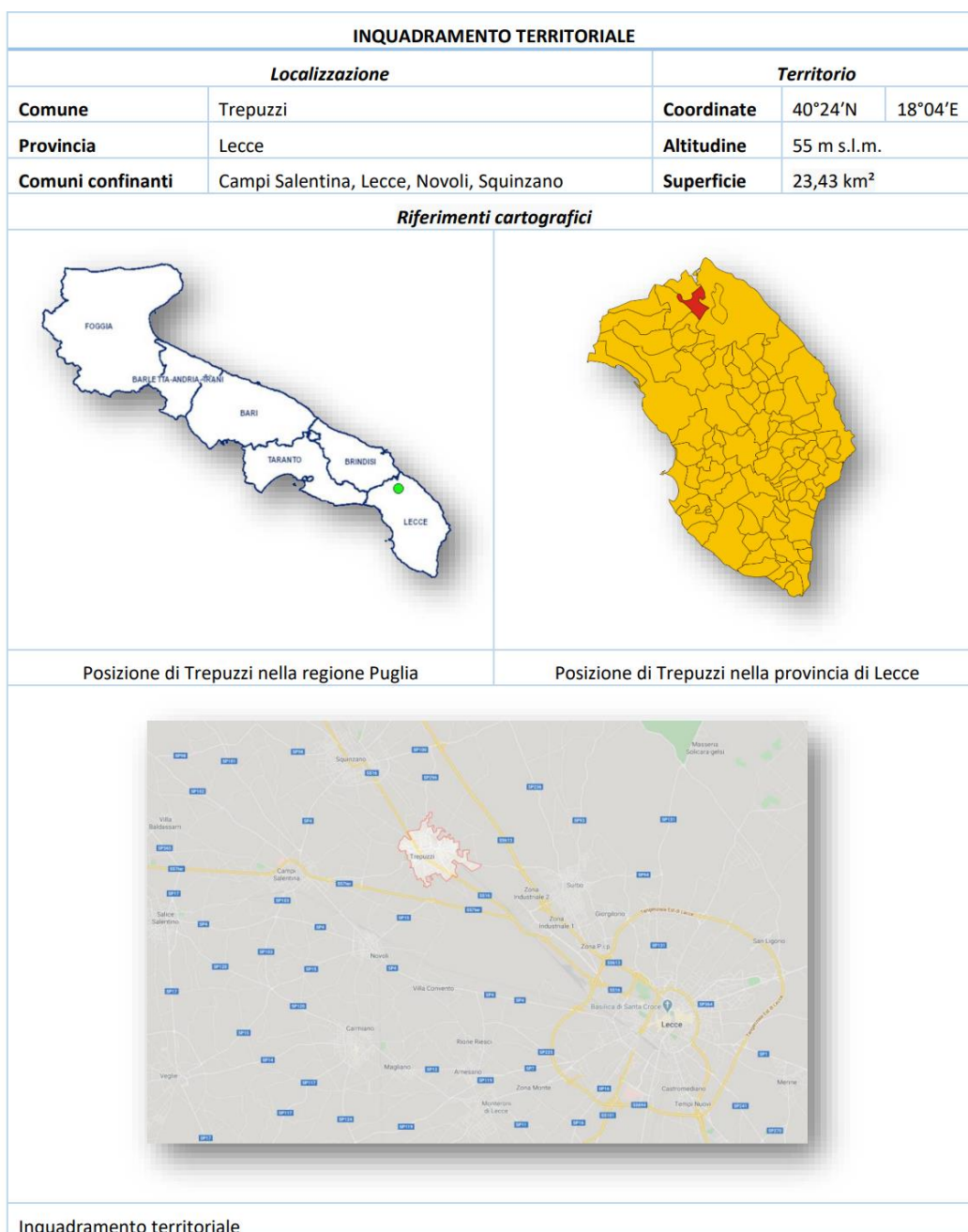


Figura 12- Inquadramento territoriale Comune di Trepuzzi

L'edificio, edificato attorno alla fine degli anni '80, si articola su due livelli e risulta caratterizzato da una struttura portante in calcestruzzo armato, tamponato con muratura in blocchi forati.



Figura 13- Prospetto ingresso - Viale Europa

L'edificio, come è possibile notare in figura 14, data la sua collocazione e il suo contesto urbano non presenta particolari ostruzioni e ombreggiamenti ad eccezion fatta per la zona posta ad ovest dove l'edificio della palestra proietta parte della sua ombra sul fabbricato.



Figura 14 – Immagine aerea del lotto di intervento tratta da Google Maps

Per avere un'idea del reale contributo ombreggiante offerto dall'edificio adibito a palestra nei confronti dell'edificio scolastico considerato è stato condotto un accurato studio degli ombreggiamenti. Con l'obiettivo di toccare con mano l'esiguo livello di ombreggiamento offerto dal corpo palestra in figura 15 e 16 sono riportati rispettivamente gli ombreggiamenti relativi ai giorni di solstizio estivo (21 Giugno) ed invernale (21 Dicembre). In entrambi i casi l'orario considerato corrisponde alle ore 14:00 poiché rappresenta in entrambi i casi l'orario di massimo ombreggiamento durante l'orario di utilizzo della struttura.

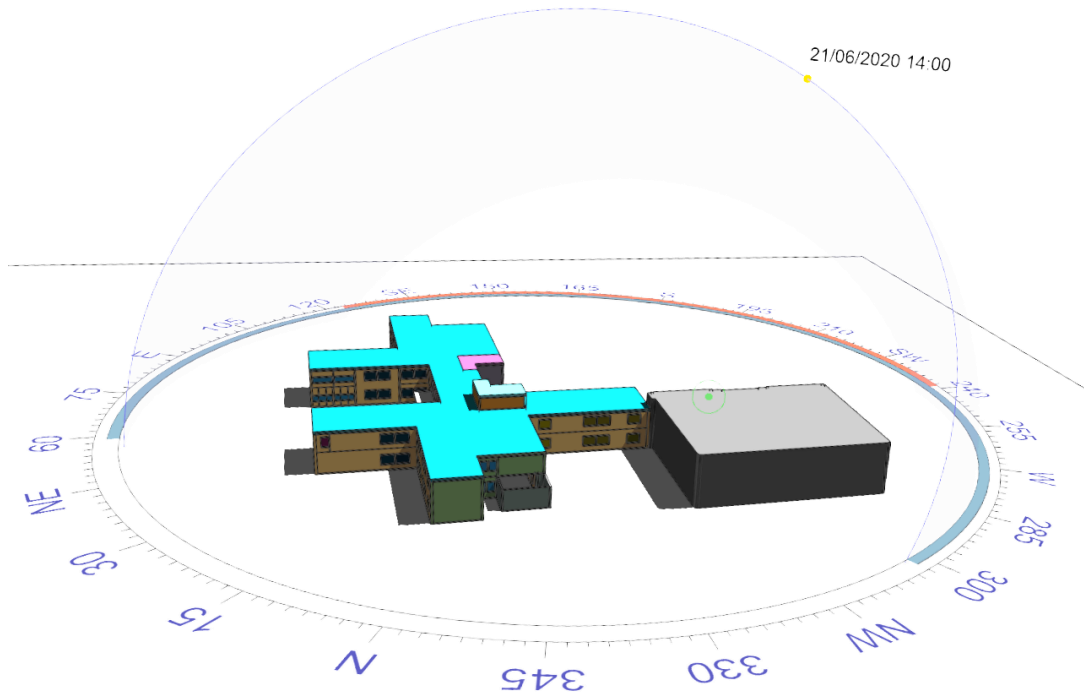


Figura 15 - Ombreggiamento relativo alle ore 14:00 del solstizio estivo

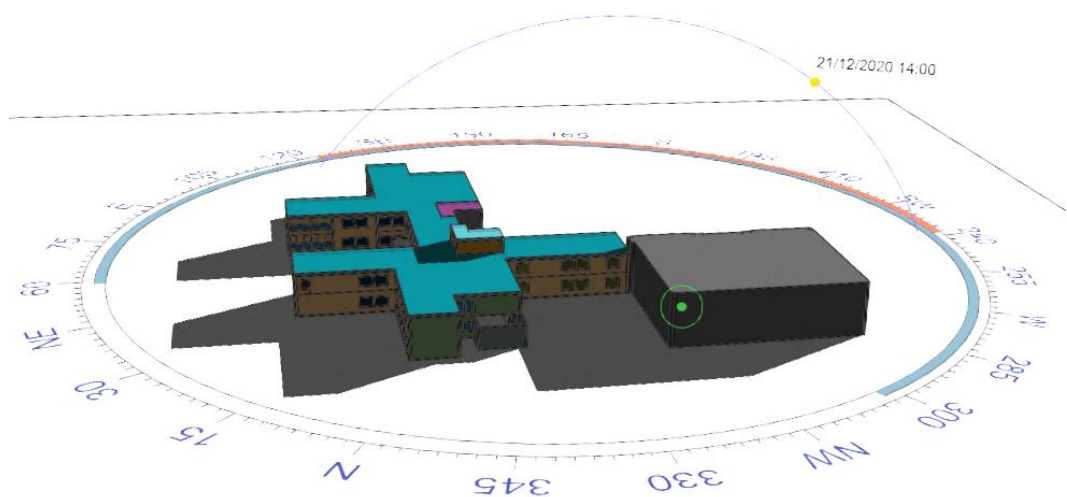


Figura 16- Ombreggiamento relativo alle ore 14:00 del solstizio invernale

Come è possibile notare in figura 14, il prospetto principale, esposto a Nord-Est, si affaccia direttamente sulla prospiciente Via Europa ed è arretrato rispetto al marciapiede grazie alla presenza di un piazzale asfaltato e un giardino verde che circonda l'intero immobile.



Figura 17- Prospetto Nord-Est

Il secondo prospetto, esposto a Nord-Ovest, riportato in figura 18, si affaccia sul giardino di pertinenza, confinante con altre proprietà. Gli edifici prospicienti e circostanti l'immobile si trovano all'angolo tra Viale Europa e Via Don Minzoni, mentre i restanti lati dell'immobile ospitano terreni non edificati.

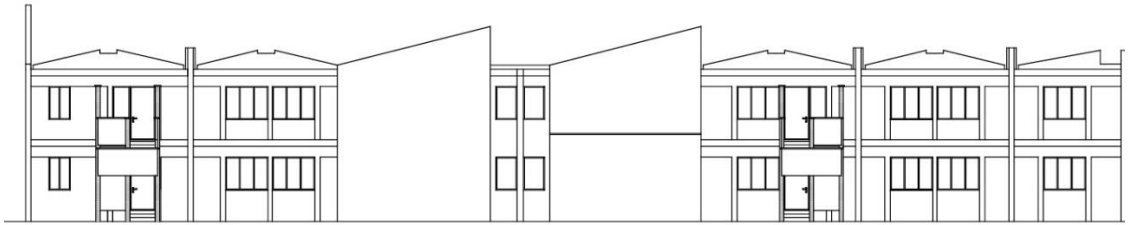


Figura 18- Prospetto Nord-Ovest

Per una maggiore chiarezza architettonica dell'immobile si riportano in figura 19,20,21 e 22 rispettivamente la pianta del piano terra, del primo piano e le sezioni A-A e B-B.

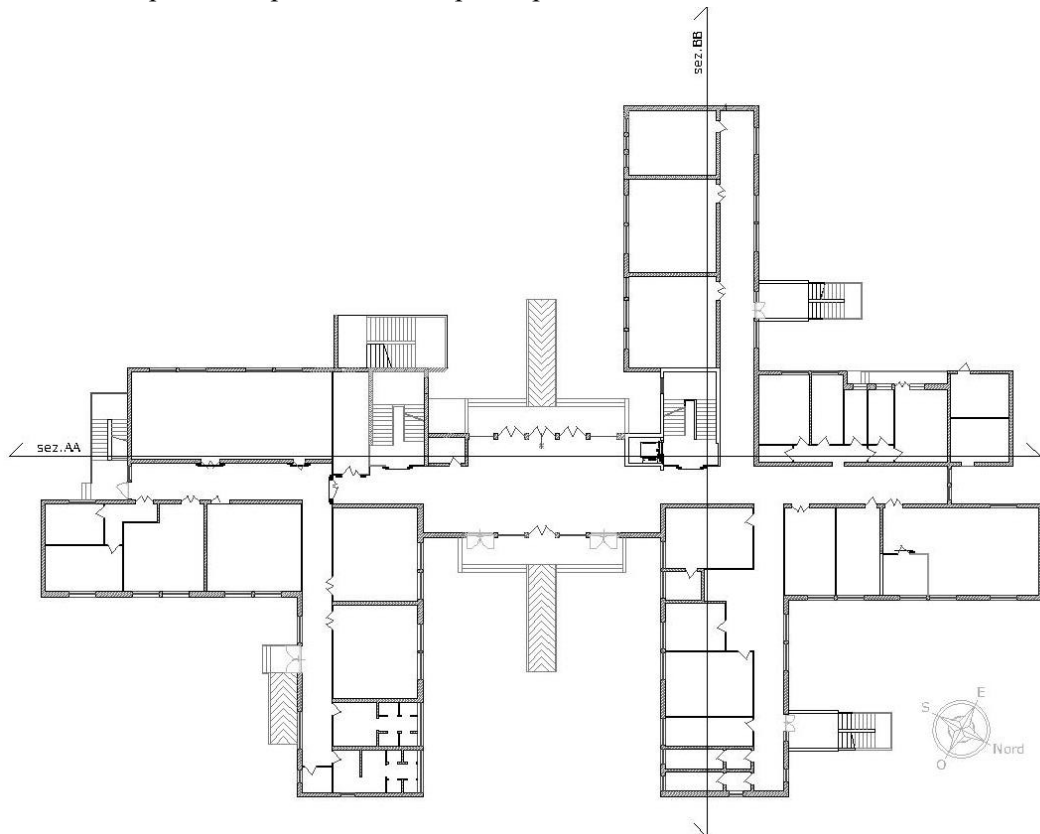


Figura 19- Pianta Piano Terra

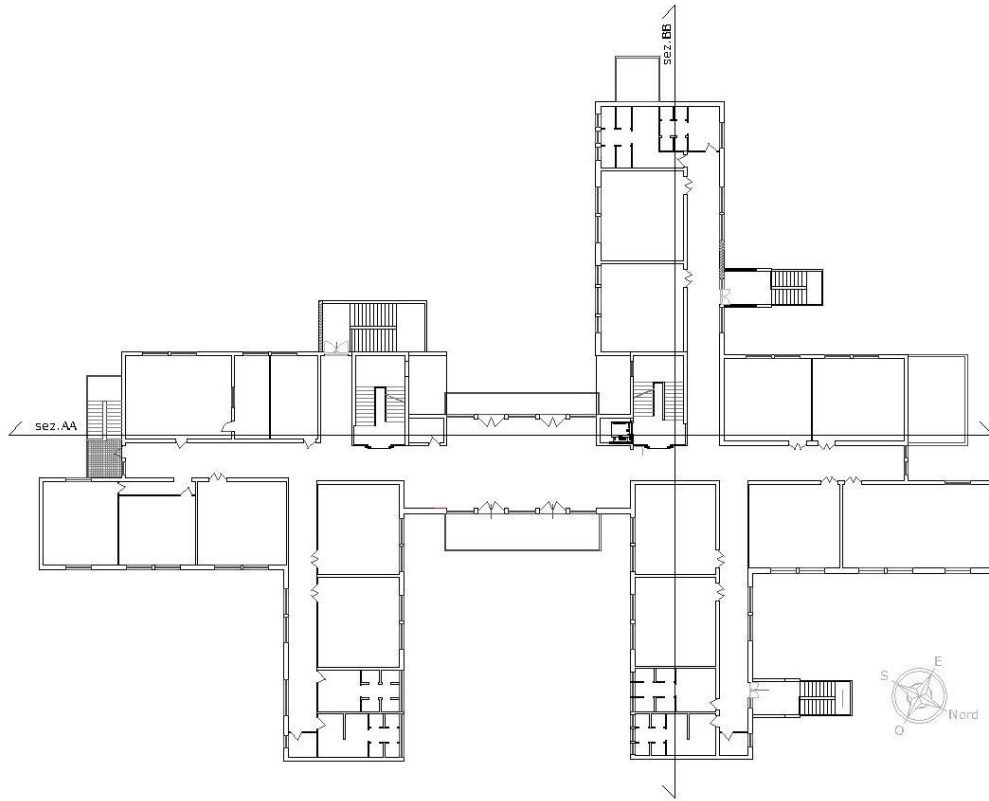


Figura 20 – Pianta Piano Primo

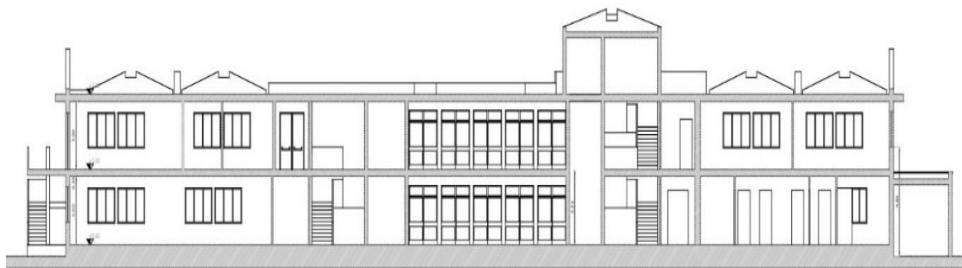


Figura 21 - Sezione A-A

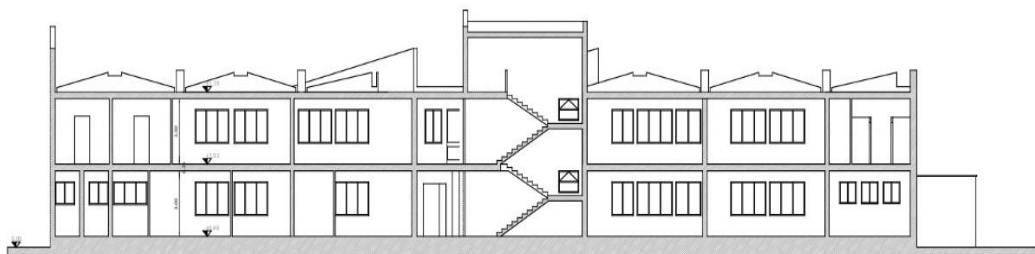


Figura 22 - Sezione B-B

5.1 Fabbricato

In questo paragrafo sono riportati i principali dati relativi all'edificio in termini di caratterizzazione dell'involucro disperdente.

I dati geometrici riferiti al fabbricato in termini di superficie utile, superficie netta e lorda climatizzata, volume netto e lordo climatizzato, superficie lorda disperdente e rapporto di forma S/V sono riportati in tabella 5.

Sup.utile [m ²]	Sup. lorda climatizzata [m ²]	Sup. netta climatizzata [m ²]	Vol. lordo climatizzato [m ³]	Vol. netto climatizzato [m ³]	Sup. lorda disperdente [m ²]	Rapporto di forma S/V [m ⁻¹]
2440	2773.24	2425.34	10105.59	7276.01	51165.75	0.51

Tabella 5 - Caratterizzazione geometrica del fabbricato

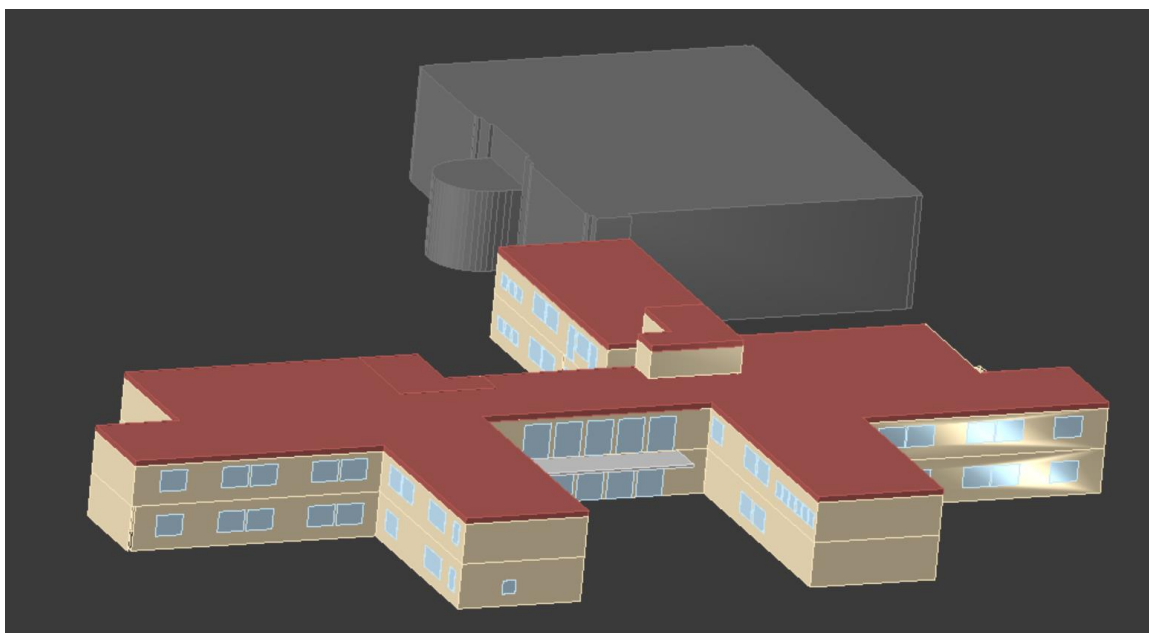


Figura 23 – Visione assonometrica edificio 3d lato nord-est

5.1.1 Involucro opaco

L'involucro opaco è costituito da tutti gli elementi di chiusura opachi che delimitano i volumi relativi agli ambienti riscaldati:

- dall'ambiente esterno;
- da ambienti riscaldati ad una diversa temperatura;
- da ambienti non riscaldati;
- dal terreno.

Di seguito vengono trattati dettagliatamente gli elementi di involucro opachi distinti in elementi verticali e orizzontali.

5.1.1.1 Elementi verticali

Le pareti che delimitano il volume riscaldato dell'edificio dall'esterno sono costituite da murature in mattoni forati non isolate dello spessore complessivo di 40 cm e la relativa stratigrafia è riportata in tabella 6.

M_1					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco forato	370	0.349	1.060	670	0.84
Intonaco di calce e cemento	20	0.9	0.22	1800	1.00

Tabella 6 - Stratigrafia elemento opaco verticale M1

Gli elementi verticali interni di separazione tra locali riscaldati adiacenti appartenenti all'edificio sono costituiti da tramezzi in blocchi di tufo locale squadrate intonacati con intonaco civile sulle due facce, di vario spessore complessivo rispettivamente pari a 10, 15, 20, 25, 30 e 40 cm e le rispettive stratigrafie sono riportate nelle tabelle 7_16.

M_9					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco in pietra di tufo squadrate	230	0.55	0.418	1600	1.00
Intonaco di calce e cemento	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 7 - Stratigrafia tramezzo interno M9

M_10					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco in pietra di tufo squadrate	80	0.55	0.145	1600	1.00
Intonaco di calce e cemento	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 8 - Stratigrafia tramezzo interno M10

M_11					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco in pietra di tufo squadrate	280	0.55	0.509	1600	1.00
Intonaco di calce e cemento	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 9 - Stratigrafia tramezzo interno M11

M_14					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco in pietra di tufo squadrate	130	0.55	0.236	1600	1.00
Intonaco di calce e cemento	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 10 - Stratigrafia tramezzo interno M14

M_15					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco in pietra di tufo squadrate	280	0.55	0.691	1600	1.00
Intonaco di calce e cemento	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 11 - Stratigrafia tramezzo interno M15

M_16					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco in pietra di tufo squadrate	180	0.55	0.327	1600	1.00
Intonaco di calce e cemento	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 12 - Stratigrafia tramezzo interno M16

L'edificio, come è possibile notare in figura 24, è caratterizzato dalla presenza di tre locali non riscaldati costituiti dai due corpi scala centrali e dal locale adibito a centrale termica situato nella zona perimetrale dell'edificio esposta a nord-est.



Figura 24 - Individuazione locali climatizzati e non climatizzati

Le pareti di separazione tra locali climatizzati e locali non climatizzati sono costituite da pareti in calcestruzzo di spessore pari rispettivamente a 25 e 30 cm verso i due corpi scala e una parete in blocchi di tufo squadriati da 25 cm non isolata verso il locale “Centrale Termica”. Si riportano di seguito le rispettive stratigrafie nelle tabelle 13_15.

M_3/M_4					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
ClS	250	2.5	0.088	2400	1.00
Intonaco di calce e cemento	20	0.9	0.22	1800	1.00

Tabella 13 - Stratigrafia elementi opachi verticali M3 ed M4

M_8					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
ClS	270	2.5	0.108	2400	1.00
Intonaco di calce e cemento	20	0.9	0.22	1800	1.00

Tabella 14 - Stratigrafia elemento opaco verticale M8

M_12					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco in pietra di tufo squadriati	230	0.55	0.418	1600	1.00
Intonaco di calce e cemento	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 15 - Stratigrafia elemento opaco verticale M12

Dei tre locali non climatizzati, i due vani scala “Vano scala 1” “Vano scala 2” sono separati dall'esterno da pareti non isolate in calcestruzzo dallo spessore rispettivamente pari a 25 e 30 cm, mentre il terzo locale “Centrale termica” confina all'esterno con pareti non isolate in calcestruzzo aventi spessore pari a 25cm. Si riportano di seguito le rispettive stratigrafie nelle tabelle 16 e 17.

M_5/M_6					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno))	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
ClS	270	2.5	0.108	2400	1.00
Intonaco di calce e cemento	20	0.9	0.22	1800	1.00

Tabella 16 - Stratigrafie elementi opachi verticali M5 ed M6

M_7/M_13					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
ClS	220	2.5	0.088	2400	1.00
Intonaco di calce e cemento	20	0.9	0.22	1800	1.00

Tabella 17 - Stratigrafie elementi opachi verticali M7 ed M13

In tabella 18 si riporta una scheda riepilogativa degli elementi opachi verticali con i relativi spessori e valori di trasmittanza estrapolata dal modello energetico realizzato.

Muri - riepilogo				
Codice	Tipo	Descrizione	Sp [mm]	Ue [W/m²K]
M1	T	laterizio 40	400.00	0,785
M3	U	cls 25_clim-unclim_scala1	250.00	2,601
M4	U	cls 25_clim-unclim_scala2	250.00	2,601
M5	E	cls 30_unclim-est_scala1	300.00	3,116
M6	E	cls 30_unclim-est_scala2	300.00	3,116
M7	E	cls 25_unclim-est	250.00	3,323
M8	U	cls 30_clim-unclim	300.00	2,472
M9	D	tramezzo_tufo_25	250.00	1,415
M10	D	tramezzo_tufo_10	100.00	2,306
M11	D	tramezzo_tufo_30	300.00	1,254
M12	U	tufo_25_clim_unclim	250.00	1,415
M13	E	cls 25_unclim-est_centrale	250.00	3,323
M14	D	tramezzo_tufo_15	150.00	1,906
M15	D	tramezzo_tufo_40	400.00	1,021
M16	D	tramezzo_tufo_20	200.00	1,625

Tabella 18 - Tabella riepilogativa elementi verticali opachi

5.1.1.2 Elementi orizzontali

Gli elementi opachi orizzontali caratterizzanti la struttura sono costituiti da un pavimento contro terra, un solaio interpiano e una copertura.

Il pavimento contro terra caratterizza l'intero piano terra e si estende per una superficie di circa 1300 m², è costituito da una struttura multistrato sommariamente composta da ghiaia di calcare frantumato (dim. max. 30mm), getto di calcestruzzo debolmente armato dello spessore di 8 cm, strato impermeabilizzante costituito da membrana bituminosa da 4mm armata con fibra di vetro, massetto a base cementizia autolivellante da 12 cm, malta di allettamento cementizia e finitura costituita da piastrelle in ceramica, come riportato in tabella 19.

P_1					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m²K/W]	Massa Volumica [kg/m³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Piastrelle in ceramica	10	1.30	0.008	2300	0.84
Malta di cemento	10	1.40	0.007	2000	1.00
Massetto autolivellante	120	1.40	0.086	1950	1.00
Membrana bituminosa	4	0.17	0.024	1200	0.92
Cls	80	0.70	0.114	1800	1.00
Ghiaia grossa senza argilla (um 5%)	250	1.20	0.208	1700	1.00

Tabella 19 - Stratigrafia pavimento contro terra P1

Il solaio interpiano di separazione tra i volumi riscaldati appartenenti a piano terra e piano primo è costituito da una struttura portante in calcestruzzo armato costituita da travetti unidirezionali ad interasse 50 cm, soletta di completamento da 4 cm e blocchi di alleggerimento, intonacato all'intradosso con intonaco a base di calce e gesso. La parte estradossale del solaio è completata con getto di argilla espansa a struttura chiusa, malta cementizia di allettamento e finitura con piastrelle in ceramica, come riportato in tabella 20.

P_2					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Piastrelle in ceramica	10	1.30	0.008	2300	0.84
Malta di cemento	10	1.40	0.007	2000	1.00
Cls in argilla espansa a struttura chiusa (um. 4%)	80	0.39	0.205	1200	1.00
Soletta in laterizio spessore 24-inter. 50	240	0.66	0.364	1100	0.84
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00

Tabella 20 - Stratigrafia solaio interpiano P2

La copertura che separa il piano primo dall'ambiente esterno risulta essere caratterizzata da una struttura portante in calcestruzzo armato costituita da travetti in calcestruzzo, blocchi di alleggerimento in argilla e soletta di completamento, intonacato all'intradosso con intonaco a base di calce e gesso e completato sulla parte estradossale con una membrana bituminosa, massetto di protezione a pendio e pavimentazione solare in lastre in pietra di Cursi (calcarenite del miocene) posata su letto di sabbia secca, come riportato in tabella 21.

S_2					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Resistenza Termica [m ² K/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Calclare semiduro in Pietra di Cursi	40	1.40	0.029	2000	1.00
Sabbia secca (um. <1%)	100	0.60	0.167	1700	1.00
C.l.s.	50	0.94	0.053	1800	1.00
Membrana bituminosa	4	0.17	0.024	1200	0.92
Blocco da solaio	260	0.74	0.350	1146	0.84
Intonaco di calce e gesso	10	0.70	0.014	1400	1.00

Tabella 21 - Stratigrafia elemento di copertura S2

5.1.2 Involucro trasparente

I componenti finestrati caratterizzanti il fabbricato presentano un'estensione pari a circa 388 m² e, come è possibile notare nella foto effettuata durante l'attività di rilievo e riportata a titolo esemplificativo in figura 25, sono costituiti da un'unica tipologia di elementi costituiti da infissi con telaio in alluminio senza taglio termico e vetro singolo.



Figura 25 – Foto rappresentativa degli infissi

Nel dettaglio il frame degli elementi finestrati è costituito da un telaio in alluminio non isolato avente spessore pari a 6 cm e trasmittanza U_f pari a 7 Wm²/K.

Per quanto concerne la componente vetrata tutti gli infissi sono caratterizzati da un vetro semplice da 6 mm caratterizzato da un'emissività ϵ pari a 0.837, un fattore di trasmissione solare $g_{gl,n}$ pari a 0.85 e un fattore di trasmissione solare diretta t_{D65} pari a 0.9.

Attraverso l'attività di rilievo è stato dunque possibile caratterizzare la totalità degli elementi finestrati costituenti l'involucro trasparente del fabbricato, tale caratterizzazione ha portato all'individuazione di 78 elementi finestrati raggruppabili in 23 tipologie e i risultati di tale caratterizzazione in termini di codifica, dimensioni e trasmittanza U_w sono riportati in tabella 22.

Componenti finestrati - riepilogo					
Codice	Tipo	Descrizione	L [cm]	H [cm]	Uw [W/m²K]
W1	T	PF_100_255	100,0	255,0	6,018
W2	T	PF_200_260_	200,0	260,0	5,749
W3	T	PF_120_245	120,0	245,0	6,026
W4	T	F_100_100	100,0	100,0	6,148
W5	T	F_100_110	100,0	110,0	6,129
W6	T	F100_155	100,0	155,0	6,072
W7	T	F_105_105	105,0	105,0	6,127
W8	T	F_105_145	105,0	145,0	6,071
W9	T	F_105_155	105,0	155,0	6,061
W10	T	F_110_155	110,0	155,0	6,051
W11	T	F_115_100	115,0	100,0	6,120
W12	T	F_115_105	115,0	105,0	6,110
W13	T	F_125_155	125,0	155,0	6,026
W14	T	F_155_125	155,0	125,0	6,026
W15	T	F_190_155	190,0	155,0	5,962
W16	T	F_200_105	200,0	105,0	6,084
W17	T	F_200_155	200,0	155,0	6,014
W18	T	F_200_260	200,0	260,0	5,999
W19	T	F_210_155	210,0	155,0	6,006
W20	T	F_285_155	285,0	155,0	6,003
W21	T	F_310_100	310,0	100,0	6,107
W22	T	F_75_105	75,0	105,0	6,210
W23	T	F_90_110	90,0	110,0	6,153

Tabella 22 - Riepilogo componenti finestrati

In figura 26 è riportata a titolo esemplificativo la schermata relativa alla caratterizzazione in termini dimensionali ed energetici di una delle 23 tipologie di infissi estrapolata dal modello energetico di calcolo realizzato.



Figura 26 - Caratterizzazione dimensionale ed energetica dell'elemento finestrato W2

5.1.3 Ponti termici

All'interno di una procedura di valutazione della performance energetica di un edificio i ponti termici costituiscono degli elementi di particolare importanza.

I ponti termici rappresentano una discontinuità nelle proprietà termo-fisiche dell'involucro disperdente e vengono definiti dalla norma UNI EN ISO 14683:2018 come "parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto della compenetrazione totale o parziale di materiale con conduttività termica diversa nell'involucro edilizio e/o la variazione dello spessore della costruzione e/o la differenza tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella del lato esterno".

Nella realtà dunque i ponti termici a causa di discontinuità geometriche e/o termofisiche sono zone caratterizzate da un andamento non lineare del flusso di calore che attraversa l'elemento e, sebbene nella realtà questo fenomeno abbia un carattere chiaramente tridimensionale, all'interno della normativa, attraverso una semplificazione, viene trattato come monodimensionale. Tali discontinuità sono caratterizzate da temperature superficiali interne minori rispetto alle temperature superficiali relative alle zone omogenee. Queste basse temperature superficiali causano un aumento dello scambio termico a discapito del comfort termo-igrometrico degli occupanti, infatti l'abbassamento delle temperature superficiali in corrispondenza delle zone di ponte termico, se associate ad alti valori di umidità relativa possono dare luogo a fenomeni di condensa superficiale e formazione muffa.

Per modellare i ponti termici dell'edificio è stato fornito con licenza un modulo dedicato di EC 700 (EC 709). Per il calcolo della trasmittanza termica lineare questo modulo fa riferimento ad un abaco dei ponti termici che fornisce i risultati di una molteplicità di calcoli eseguiti su una vasta gamma di strutture edilizie utilizzando il metodo di calcolo agli elementi finiti (FEM).

La struttura oggetto di indagine risulta essere caratterizzata dalle seguenti tipologie di ponti termici:

- ponti termici verticali (angolo tra pareti; parete-pilastro);
- ponti termici orizzontali (parete solaio contro terra; parete solaio interpiano; parete copertura; parete-balcone);
- ponti termici parete-serramento;

In tabella 23 viene riportata la tabella riassuntiva dei ponti termici riscontrati nell'edificio.

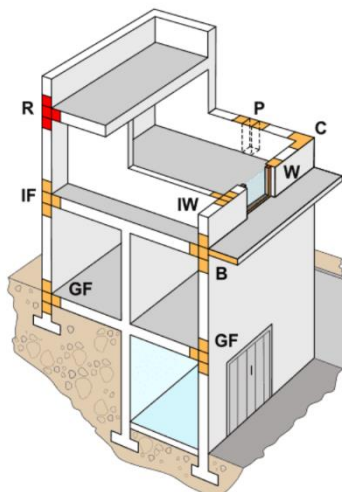


Figura 27 – Schematizzazione ponti termici

Ponti termici - riepilogo		
Codice	Descrizione	ψ [W/mK]
Z3	IF - Parete - Solaio interpiano	0,394
Z4	C - Angolo tra pareti_rientrante_30_30	0,232
Z5	W - Parete - Telaio_40	0,250
Z6	P - Parete - Pilastro	0,315
Z7	B - Ponte termico PARETE - BALCONE	0,181
Z8	GF - Parete - Solaio controterra(40)	0,212
Z9	GF - Parete - Solaio controterra(30)	0,284
Z10	R - Parete - Copertura	-0,382
Z12	IF - Parete - Solaio interpiano_40	0,374
Z13	C - Angolo tra pareti_rientrante_40_40	0,257
Z14	C - Angolo tra pareti_sporgente_40_40	-0,079
Z15	C - Angolo tra pareti_sporgente_30_30	-0,067
Z16	P - Parete - Pilastro_40	0,335
Z17	P - Parete - Pilastro_30	0,390
Z19	W - Parete - Telaio_30	0,250

Tabella 23 - Riepilogo ponti termici

Essendo la muratura esterna caratterizzata da un unico tipo di elemento murario, i ponti termici verticali d'angolo tra pareti riscontrati all'interno del fabbricato risultano essere di due tipi:

-angolo tra parete rientrante con pilastro;

-angolo tra pareti sporgente con pilastro.

Osservando le relative caratterizzazioni in termini grafici, dimensionali ed energetici riportate rispettivamente in figura 28 e 29, è possibile notare i valori di trasmittanza termica lineica ϵ pari a 0.257 W/mK nel caso di ponte termico d'angolo sporgente e - 0.079 W/mK nel caso di ponte termico d'angolo rientrante, le relative estensioni dimensionali risultano essere pari a 91 m e 66 m.

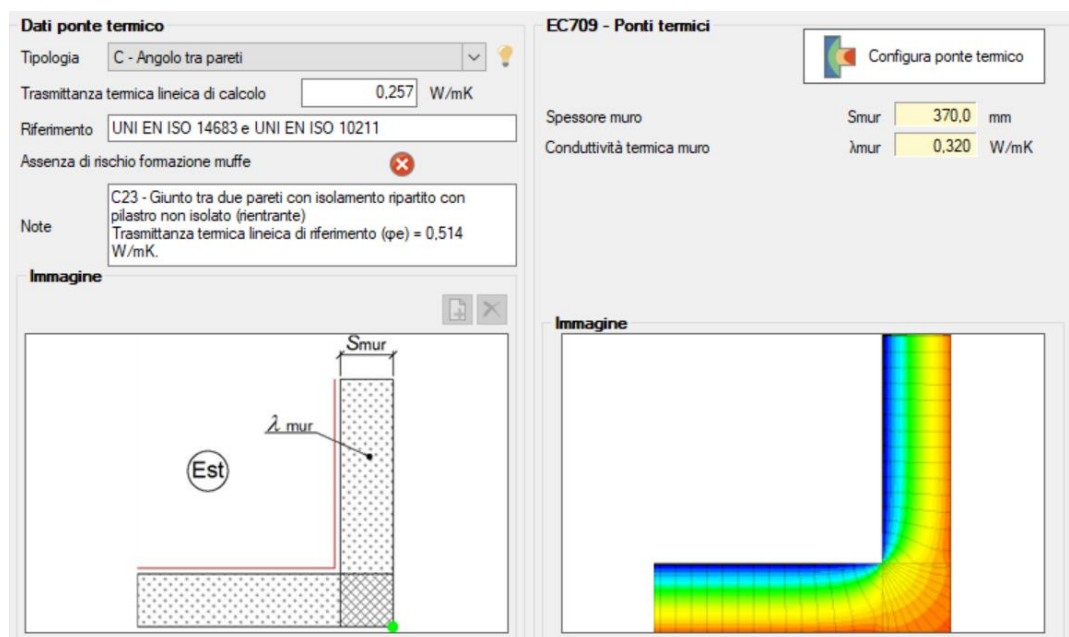


Figura 28- Caratterizzazione ponte termico d'angolo tra pareti sporgente con pilastro

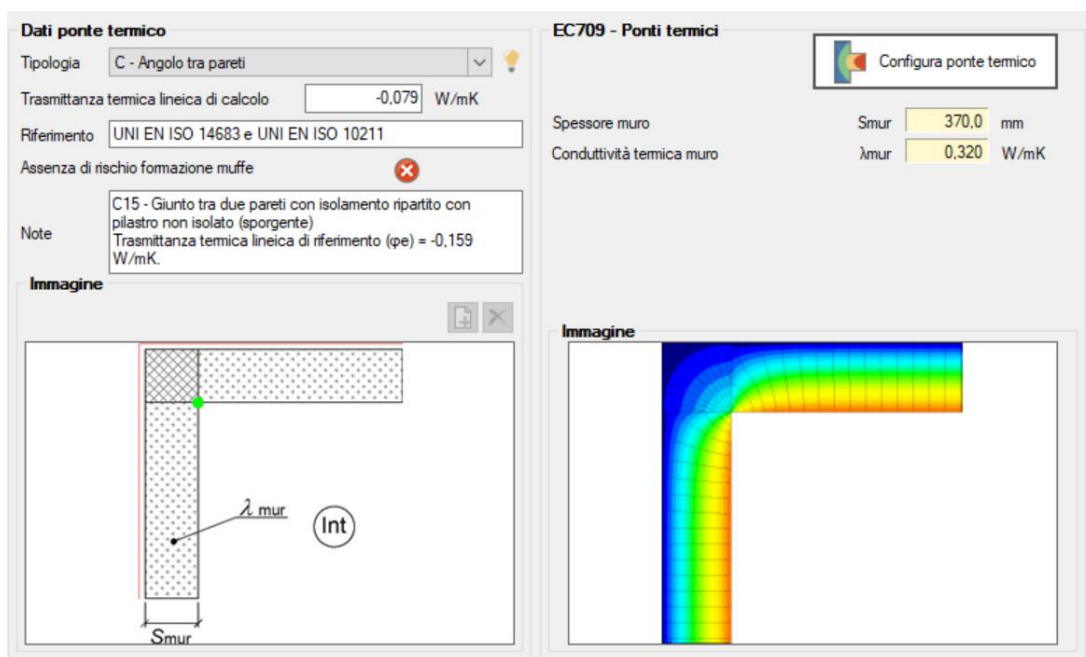


Figura 29- Caratterizzazione ponte termico d'angolo tra pareti rientrante con pilastro

L'ultima tipologia di è ponte termico verticale è costituito dal ponte termico esistente in corrispondenza del giunto parete-pilastro. In particolare, come è possibile notare in figura 30, il ponte termico risulta essere caratterizzato da un valore di trasmittanza termica lineica \mathcal{F} pari a 0.315 W/mK e da uno sviluppo lineare di 258 m.

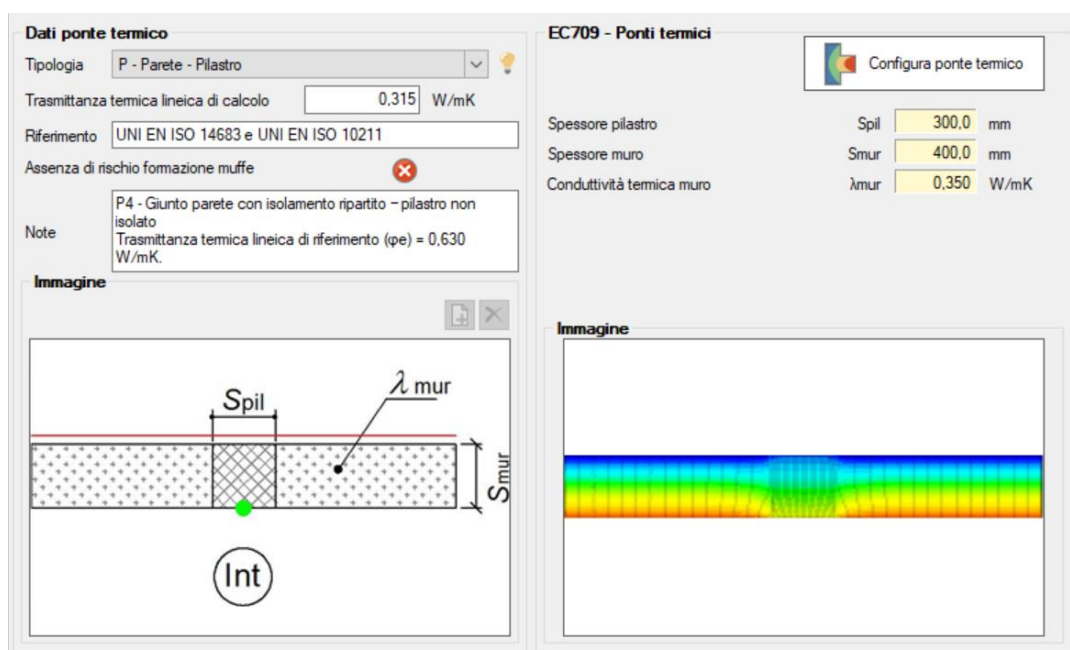


Figura 30- Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – pilastro

Procedendo con i ponti termici orizzontali, questi includono quattro tipologie di elementi ossia ponti termici parete-solio interpiano, parete- solaio contro terra, parete copertura e parete balcone.

Per quanto concerne il ponte termico di giunzione tra parete perimetrale esterna M1 e solaio contro terra S2 riportato in figura 31, questo elemento presenta un'estensione lineare pari a circa 265 m e una trasmittanza termica lineica pari a \mathcal{F} pari a 0.212 W/mK.

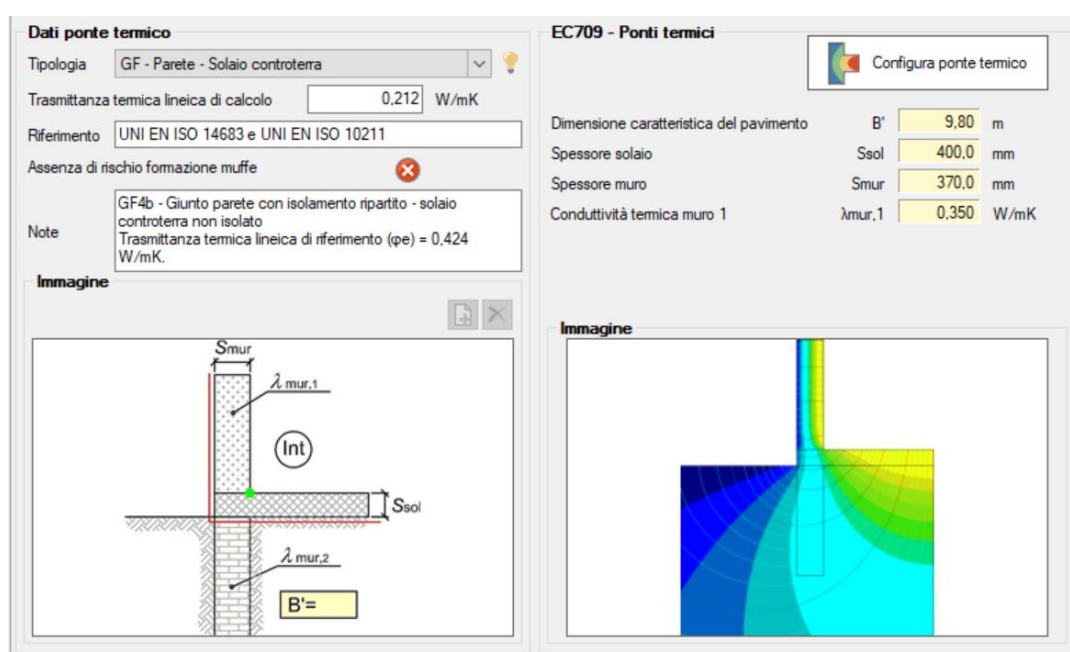


Figura 31- Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – solaio contro terra

Il ponte termico di giunzione tra la muratura esterna M1 e il solaio interpiano S1, riportato in figura 32, presenta un valore di trasmittanza termica lineica pari a ϵ pari a 0.394 W/mK ed un'estensione lineare pari a circa 240 m.

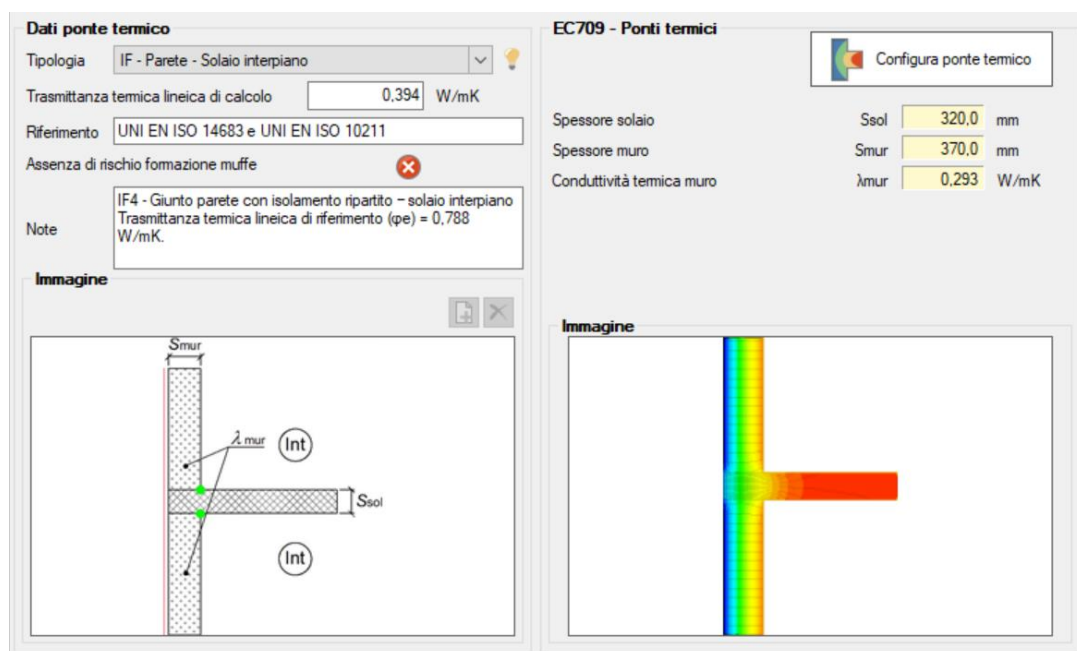


Figura 32 - Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – solaio interpiano

Il primo piano della struttura è delimitato dall'esterno dal solaio di copertura S3 il quale congiungendosi con la muratura esterna di tipo M1 genera un ponte termico di tipo parete- copertura, riportato in figura 33. avente trasmittanza termica lineica ϵ pari a -0.382 W/mK ed un'estensione lineare pari a circa 265 m.

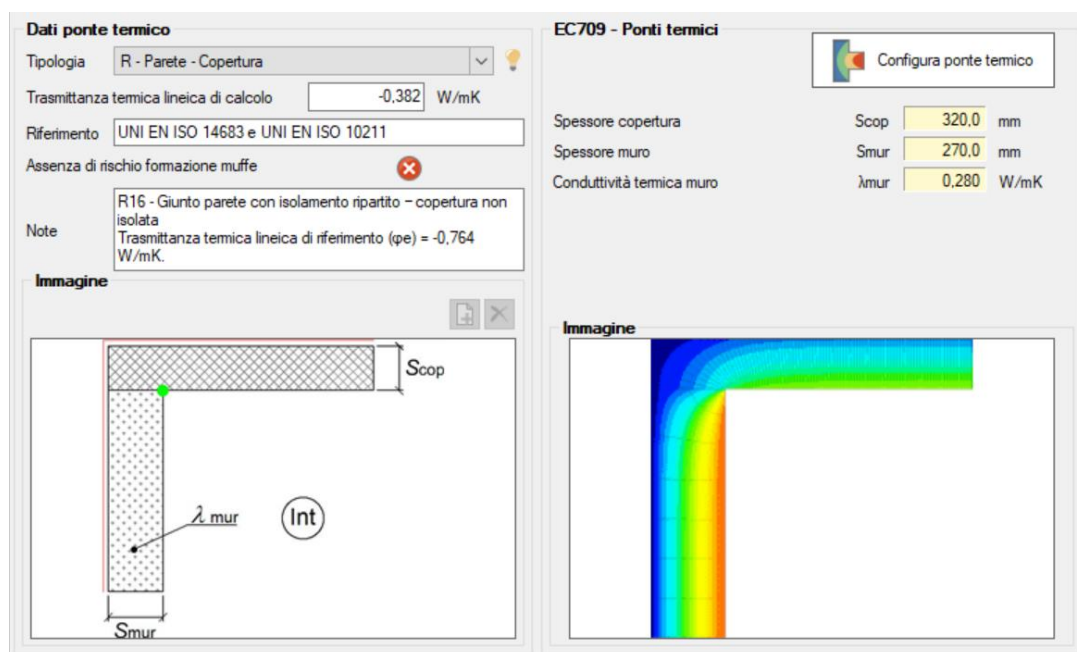


Figura 33- Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – copertura

A completamento dei ponti termici a sviluppo orizzontale, in figura 34 viene riportata la caratterizzazione del ponte termico di giunzione tra parete perimetrale esterna e balcone. Tale elemento presenta un valore di trasmittanza termica lineica ψ pari a 0.181 W/mK ed un'estensione lineare pari a circa 24 m.

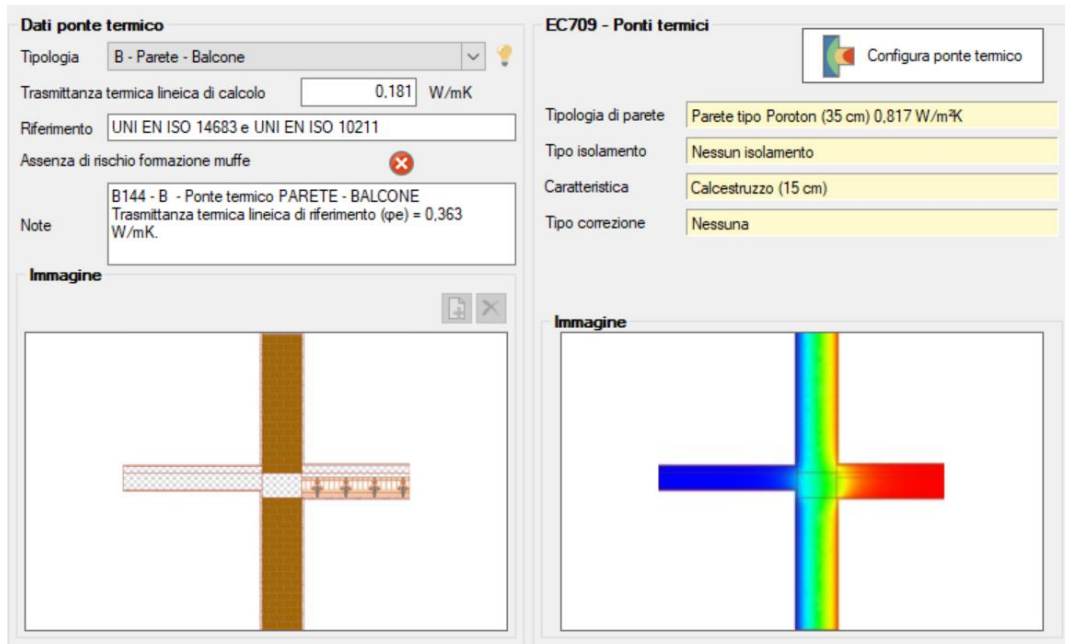


Figura 34 - Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – balcone

L'ultima tipologia di ponte termico riscontrato all'interno dell'edificio è rappresentata dal ponte termico generato dalla giunzione tra il telaio degli elementi finestrati e la muratura che li accoglie. Tale ponte termico è contraddistinto, come riportato in figura 35, da una trasmittanza termica lineica ψ pari a 0.181 W/mK ed insiste su una lunghezza complessiva di 877 m.

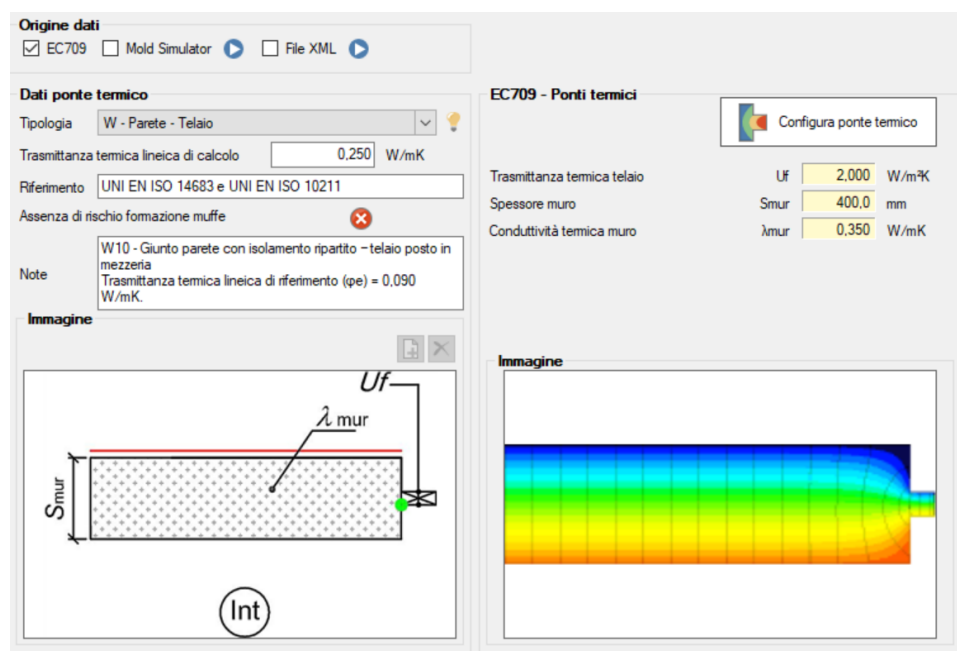


Figura 35 - Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – telaio

In figura 36 e 37 vengono riportate due viste termografiche tridimensionali della struttura e dei suoi elementi rispettivamente lato ingresso principale e lato cortile posteriore.

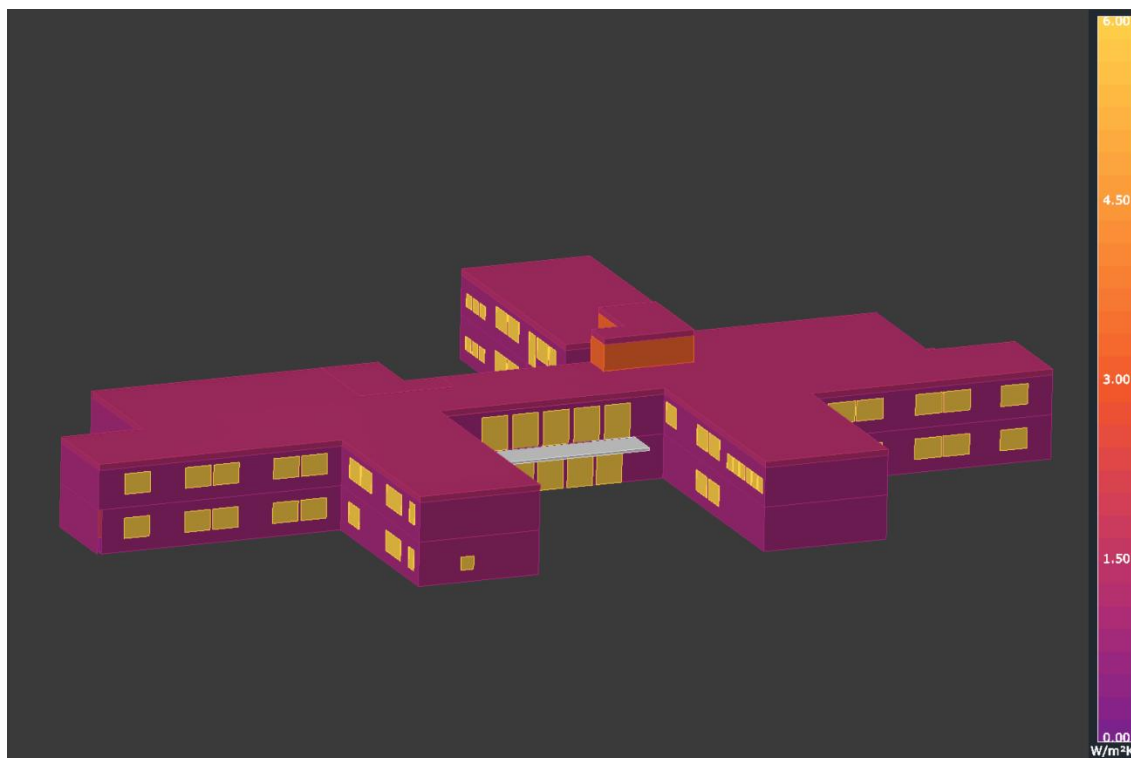


Figura 36 - Visualizzazione tridimensionale termografica dell'edificio lato ingresso

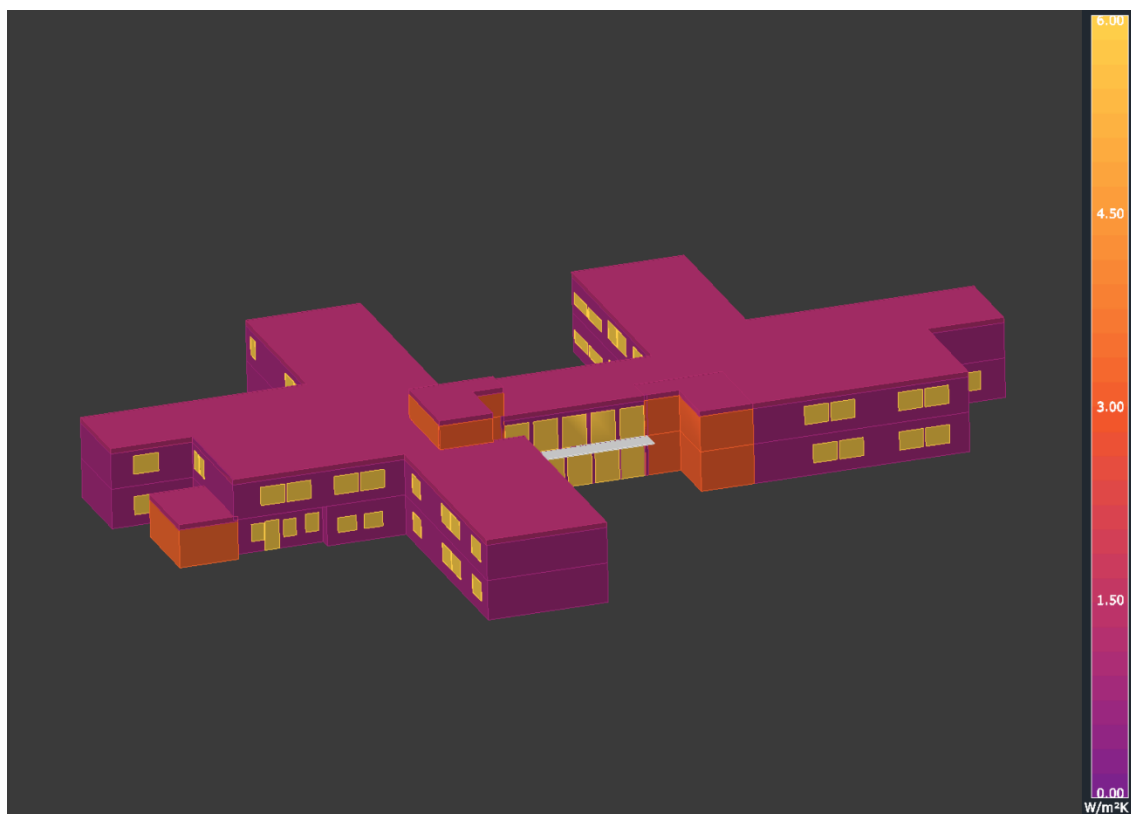


Figura 37 - Visualizzazione tridimensionale termografica dell'edificio affaccio cortile posteriore

5.2 Sistema impiantistico

L'edificio oggetto di diagnosi energetica risulta essere dotato dei seguenti servizi energetici:

- riscaldamento (H);
- produzione di acqua calda sanitaria (W);
- illuminazione (L);
- trasporto di persone e cose (T).

Nel presente sotto capitolo vengono riportate le informazioni reperite sul campo relative ai sistemi e sottosistemi impiantistici caratterizzanti i vari servizi energetici riscontrati all'interno dell'edificio.

5.2.1 Servizio di riscaldamento

La centrale termica, come illustrato in figura 38, è posta in un locale non riscaldato situato a piano terreno nella zona ad est del fabbricato, e risulta inserita all'interno della volumetria del fabbricato.

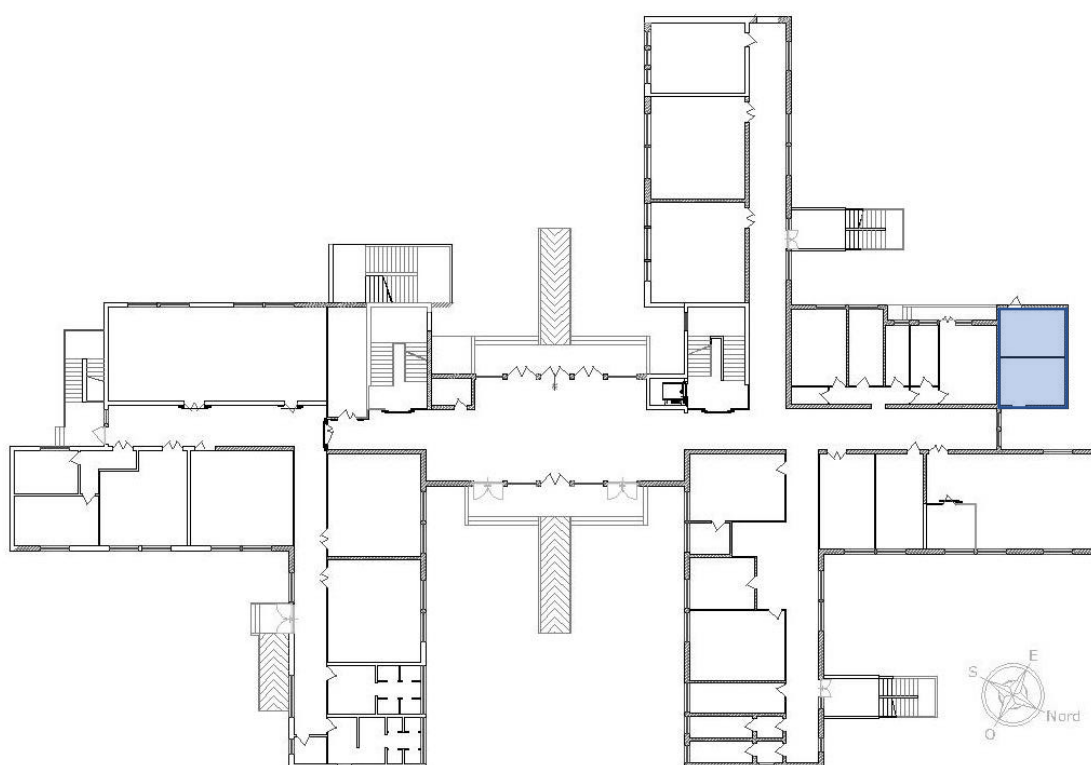


Figura 38 - Posizionamento locale adibito a Centrale Termica

L'impianto di riscaldamento è costituito da una caldaia a basamento alimentata a gas metano, costruttore "Baltur" modello "T-AR 200", di potenza termica al focolare pari a 258 kW con corpo in acciaio, l'anno di costruzione del generatore è il 1995 e l'installazione si presume risalire allo stesso periodo. All'interno della centrale termica la coibentazione delle tubazioni risulta scadente e non conforme agli spessori minimi previsti dal DPR 412/93 relativi al periodo di installazione dell'impianto.

In tabella 21 è riportata una scheda riassuntiva delle caratteristiche relative al generatore di calore.

Generatore di calore a combustibile	
Rif.	GT1
Servizio	RISCALDAMENTO
Marca e Modello	BALTUR 258 kW
Camera di combustione	stagna
Materiale	acciaio
Potenza nominale [kW]	99 - 258
Anno di costruzione	1995
Stato d'uso	buono
Perdite d'acqua	no
Potenza ausiliari elettrici (kW)	0,5
Ubicazione (*)	Centrale Termica
Rendimento (dati sulla combustione)	90,6%

Tabella 24 - Caratteristiche generatore di calore per riscaldamento

La caldaia produce acqua calda ad una temperatura di mandata fissa pari a 70°C con differenziale pari a 10°C. La regolazione dell'impianto avviene mediante crono-termostato on-off a diretto comando del generatore. Nella centrale termica è presente un unico circuito di zona.

Il sottosistema di distribuzione impiantistico risulta essere stato installato nel 1995 ed è costituito da una rete in ferro nudo installata a vista a soffitto all'interno dei locali riscaldati. Il sistema serve i due piani della struttura secondo una distribuzione a due tubi con derivazione agli apparecchi scaldanti.

Il sottosistema di emissione è costituito da radiatori in ghisa disposti su pareti esterne non isolate ed interne. I corpi scaldanti hanno elementi con altezza e numero variabile e risultano sprovvisti di valvole termostatiche, in figura 39 è riportata una foto a titolo esemplificativo.



Figura 39 – Foto rappresentativa dei corpi scaldanti costituenti il sottosistema di emissione

5.2.2 Servizio di produzione di acqua calda sanitaria

Il sistema impiantistico relativo alla produzione di acqua calda sanitaria risulta essere costituito da sei boiler di tipo elettrico situati nei bagni, dalla potenza di 1,2 kW cadauno per un totale di 7,2 kW installati. Di seguito sono riportate la tabella relativa al sottosistema di generazione per il servizio di acqua calda sanitaria (tabella 25), mentre in figura 40 e 41 è possibile notare uno dei sei boiler a titolo rappresentativo.

Impianto di produzione ACS	
Tipo di impianto	ACS - boiler elettrico
Materiale	acciaio
Potenza nominale [kW]	1,2
Anno di costruzione	2010

Tabella 25 - Dati generatore di calore per ACS



Figura 40 – Foto rappresentativa dei boiler elettrici installati



Figura 41 – Targa dei boiler installati

5.2.3 Servizio di illuminazione

Durante l'attività di rilievo è stato possibile effettuare un dettagliato rilievo dell'impianto di illuminazione il quale presenta una potenza complessiva degli apparecchi installati pari a circa 14 kW ripartiti tra piano terra (7,7kW) e piano primo (6,8kW). I corpi illuminanti caratterizzanti ciascun locale dell'edificio risultano raggruppabili in tre tipologie:

- lampade tubolari al neon da 28 W;
- lampade tubolari al neon da 56 W;
- plafoniere ad incandescenza da 60 W.

Inoltre gli unici dispositivi elettronici rilevati sono costituiti da computer e stampanti nel locale presidenza e in alcuni degli uffici del personale scolastico. Nella seguente tabella 26 è possibile notare il rilievo dei corpi illuminanti e dei dispositivi elettrici installati in ogni ambiente.

LOCALE	PIANO	Lampada tubolare 2x28 W	Lampada tubolare 1x56 W	Plafoniere 60 W	Dispositivi	Descrizione	Potenza elettrica [W]	Potenza elettrica totale [W]
Deposito cucina	terra	1		0				56
Sala pasti pronti	terra	1		0				56
Laboratorio	terra	2		0				112
Aula1	terra	6		0				336
Aula attività ricreativ	terra	8		0	1	proiettore	100	548
Corridoio	terra	3		0				168
Corridoio	terra	3		0				168
Ripostiglio	terra	1		0				56
Aula2	terra	6		0				336
Aula3	terra	6		0				336
Bagno maschetti	terra			2				120
Bagno femminucce	terra			3				180
Bagno insegnanti	terra			1				60
Scala1	terra	1		0				56
Corridoio	terra	10		0				560
Corridoio	terra	10		0				560
Ingresso principale	terra	3		0				168
Ingresso cortile	terra			3				180
scala2	terra	1		0				56
Lab. Multimediale	terra	4		0				224
Sala docenti	terra	4		0				224
Archivio	terra	2		0				112
Percorso 6	terra	5		0	2	caffè	150	580
Presidenza	terra	2		0	1	pc	100	212
Bagno presidenza	terra			1				60
Ufficio	terra	1		0	4	pc	100	456
Segreteria	terra	2		0				112
Ufficio	terra	1		0	1	pc	100	156
Bagno donne	terra			2				120
Bagno uomini	terra			2				120
Amministrazione	terra	2		0	2	pc	100	312
Aula clarinetto	terra	2		0				112
Archivio	terra	1		0				56
Lab. Musicale	terra	7		0				392
Ufficio	terra	1		0				56
Ufficio	terra	1		0	1	pc	100	156
Bagno	terra			1				60
Bagno	terra			1				60
Aula di sostegno	terra	1						56
							TOTALE_PT	7748
Lab.scientifico	primo	4						224
Lab. Artistico	primo	4						224
Aula 4	primo	6						336
Lab.musicale	primo	6						336
Sala registrazione	primo	2						112
Aula di pianoforte	primo	0			2			120
Aula 5	primo	6						336
Aula 6	primo	6						336
Bagno donne	primo				2			120
Bagno uomini	primo				3			180
Bagno docenti	primo				1			60
Corridoio sx	primo	8						448
Corridoio centrale	primo	9						504
Corridoio dx	primo	12						672
Aula 7	primo	4		1				280
Aula 8	primo	4		1				280
Bagno donne	primo			3				168
Bagno uomini	primo			4				224
Aula 9	primo	4						224
Aula magna	primo	6		1				392
Aula 10	primo	4						224
Aula 11	primo	4						224
Aula 12	primo	4						224
Aula 13	primo	4						224
Bagno donne	primo				3			168
Bagno uomini	primo				3			168
							TOTALE_PT	6808
							TOTALE EDIFICIO	14556

Tabella 26 - Rilievo corpi illuminanti

5.2.4 Servizio di trasporto di persone e cose

L'edificio scolastico risulta essere dotato di servizio di trasporto persone costituito da un ascensore con potenza pari a 10kW che collega il Piano Terra con il Piano Primo e, come riportato in figura 42, risulta situato nella zona di ingresso adiacente al corpo scala.

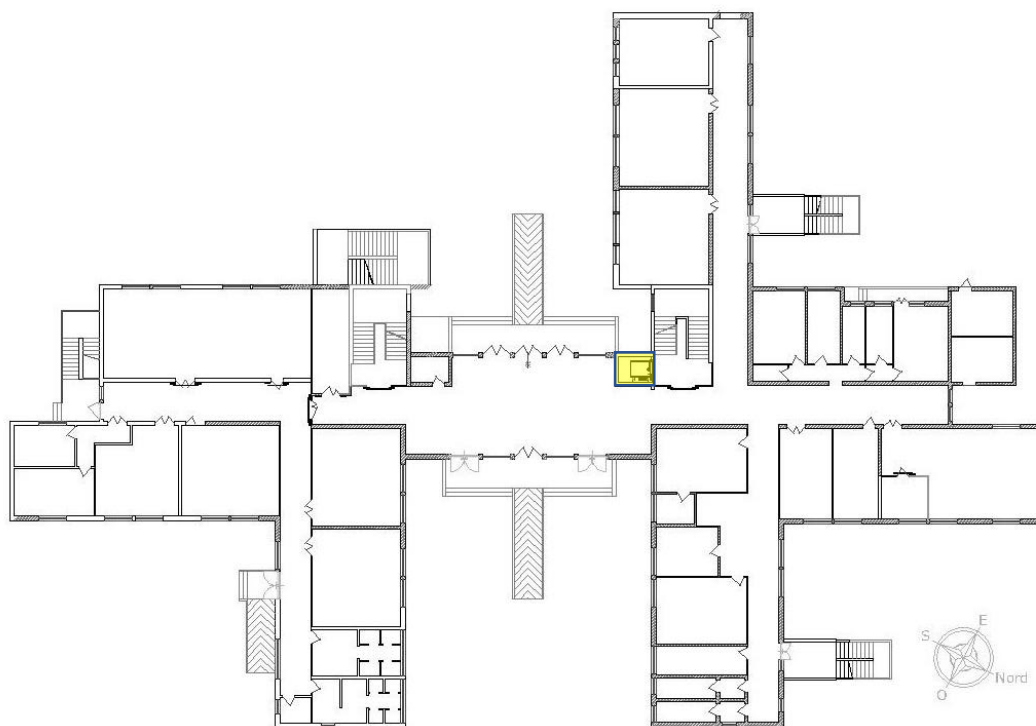


Figura 42 - Collocazione ascensore

L'ascensore, come riportato in tabella 27, rientra nella Categoria 3A poiché installato in un edificio rientrante nella definizione di “edifici scolastici e biblioteche fino a 260 utenti”.

Categoria	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A
Tipologia edificio	Edifici fino a 4 unità immobiliari: - residenziali (365) - uffici con ridotta operatività verso il pubblico (260) Stazioni ferroviarie secondarie suburbane (365)	Edifici fino a 10 unità immobiliari: - residenziali (365) - uffici con ridotta operatività verso il pubblico (260) Residenze per anziani, case famiglia, ecc. fino a 10 camere (365) Stazioni ferroviarie suburbane (365)	Edifici fino a 20 unità immobiliari: - residenziali (365) - uffici con media operatività verso il pubblico (260) Uffici fino a 4 piani di un'unica società con ridotta operatività verso il pubblico (260) Residenze per anziani, case famiglia, ecc. fino a 30 camere (365) Edifici scolastici e biblioteche (260) Stazioni ferroviarie principali (360)	Edifici fino a 30 unità immobiliari: - residenziali (365) - uffici con media operatività verso il pubblico (260) Uffici fino a 6 piani di un'unica società con ridotta operatività verso il pubblico (260) Uffici fino a 4 piani di più società con operatività verso il pubblico (260) Alberghi fino a 20 camere (360) Parcheggi (365) Edifici per attività ricreative (360)	Edifici fino a 50 residenze (365) Uffici fino a 10 piani (260) Alberghi fino a 40 camere (360) Piccoli ospedali (365) Aeroporti (365) Università (260) Centri commerciali (365)	Edifici con più di 50 residenze (365) Uffici con più di 10 piani (260) Alberghi con più di 40 camere (360) Ospedali (365)	Uffici in edifici con più di 100m di altezza (260)
Frequenza d'uso	Molto bassa	Bassa	Medio-bassa	Media	Medio-alta	Alta	Molto alta
Range di corse giornaliere	≤ 25	>25; ≤50	>50; ≤100	>100; ≤200	>200; ≤500	>500; ≤1000	>1000
Numero medio di corse giornaliere	15	35	75	130	300	750	1500
Velocità tipica	0,63 m/s	0,63 m/s	Da 0,63 m/s a 1,00 m/s	1,00 m/s	1,60 m/s	2,50 m/s	5,00 m/s

Tabella 27 - Categorizzazione d'uso ascensore

5.3 Inventario energetico (*operational energy performance assessment*)

5.3.1 Rilievo dei consumi

Al fine di poter evitare anomalie e singolarità nei dati rilevati dai consumi si è provveduto a reperire tramite la Pubblica Amministrazione i dati relativi ai consumi di metano ed elettricità relativi agli ultimi tre anni consecutivi documentati ossia le annualità 2018/2019/2020 riportate numericamente in tabella 28 e graficamente in figura 43 e 44.

Vettore energetico	Anno	Consumo
Gas naturale	2018	20034 smc
Energia elettrica	2018	22000 kWhe
Gas naturale	2019	22787 smc
Energia elettrica	2019	22973 kWhe
Gas naturale	2020	19087 smc
Energia elettrica	2020	23015 kWhe

Tabella 28 - Tabella riepilogativa consumi

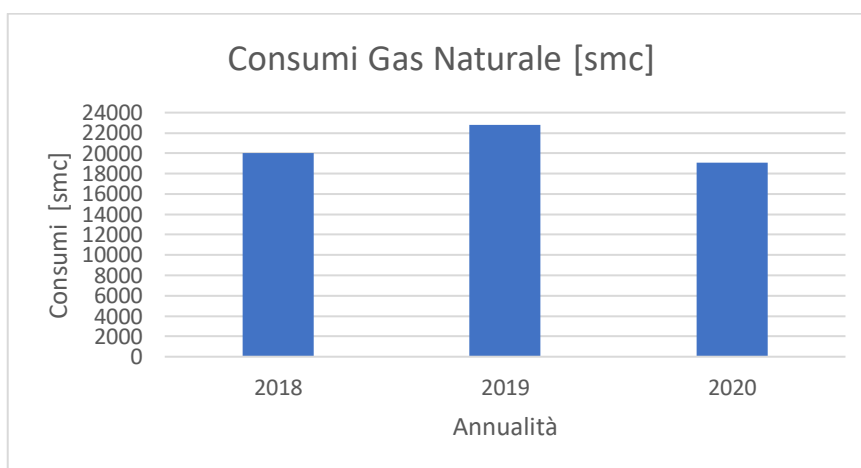


Figura 43 – Andamento consumi di gas naturale relativi alle annate 2018, 2019 e 2020

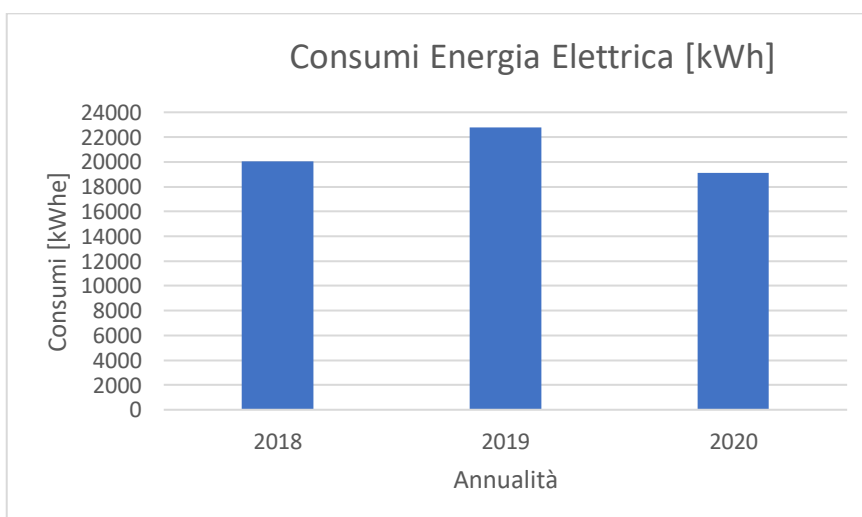


Figura 44 – Andamento consumi elettrici relativi alle annate 2018, 2019 e 2020

5.3.2 Gas metano

Il consumo di metano è stato attribuito interamente al servizio di riscaldamento e i consumi rilevati nei mesi fuori dal periodo di riscaldamento, come si evince dalla tabelle 29, 30 e 31, sono stati ripartiti tra i mesi di funzionamento dell'impianto in maniera proporzionale ai gradi giorno relativi ad ogni mese.

Dal	Al	Consumo [smc]
01/01/2018	31/01/2018	5197,2
01/02/2018	28/02/2018	4638,6
01/03/2018	31/03/2018	4040,4
01/04/2018	30/04/2018	-
01/05/2018	31/05/2018	-
01/06/2018	30/06/2018	-
01/07/2018	31/07/2018	-
01/08/2018	31/08/2018	-
01/09/2018	30/09/2018	-
01/10/2018	31/10/2018	-
01/11/2018	30/11/2018	2689,8
01/12/2018	31/12/2018	3864,7
TOTALE		20430,8

Tabella 29 - Rilievo consumi metano 2018

Dal	Al	Consumo [smc]
01/01/2019	31/01/2019	6197,2
01/02/2019	28/02/2019	5138,6
01/03/2019	31/03/2019	4040,4
01/04/2019	30/04/2019	-
01/05/2019	31/05/2019	-
01/06/2019	30/06/2019	-
01/07/2019	31/07/2019	-
01/08/2019	31/08/2019	-
01/09/2019	30/09/2019	-
01/10/2019	31/10/2019	-
01/11/2019	30/11/2019	3030,5
01/12/2019	31/12/2019	3441,2
TOTALE		21848,0

Tabella 30 - Rilievo consumi metano 2019

Dal	Al	Consumo [smc]
01/01/2020	31/01/2020	5270,825
01/02/2020	28/02/2020	4097,875
01/03/2020	31/03/2020	3780,7875
01/04/2020	30/04/2020	-
01/05/2020	31/05/2020	-
01/06/2020	30/06/2020	-
01/07/2020	31/07/2020	-
01/08/2020	31/08/2020	-
01/09/2020	30/09/2020	-
01/10/2020	31/10/2020	-
01/11/2020	30/11/2020	2876,1375
01/12/2020	31/12/2020	3441,2625
TOTALE		19466,8875

Tabella 31 - Rilievo consumi metano 2020

5.3.3 Elettricità

Diversamente, il vettore di energia elettrica risulta essere associato ai servizi energetici relativi a riscaldamento, illuminazione, acqua calda sanitaria e trasporto e i consumi mensili per le tre annualità sono riportati nelle tabelle 32_ 34.

Dal	Al	Consumo [kWhe]
01/01/2018	31/01/2018	3183,75
01/02/2018	28/02/2018	3006,25
01/03/2018	31/03/2018	436,25
01/04/2018	30/04/2018	691,25
01/05/2018	31/05/2018	1683,75
01/06/2018	30/06/2018	963,75
01/07/2018	31/07/2018	980
01/08/2018	31/08/2018	977,5
01/09/2018	30/09/2018	1687,5
01/10/2018	31/10/2018	2647,5
01/11/2018	30/11/2018	2867,5
01/12/2018	31/12/2018	3355
TOTALE		22480

Tabella 32 - Rilievo consumi elettrici 2018

Dal	Al	Consumo [kWhe]
01/01/2019	31/01/2019	2929,05
01/02/2019	28/02/2019	2765,75
01/03/2019	31/03/2019	2304,6
01/04/2019	30/04/2019	1815,85
01/05/2019	31/05/2019	1549,05
01/06/2019	30/06/2019	886,65
01/07/2019	31/07/2019	901,6
01/08/2019	31/08/2019	899,3
01/09/2019	30/09/2019	1552,5
01/10/2019	31/10/2019	2435,7
01/11/2019	30/11/2019	2638,1
01/12/2019	31/12/2019	3086,6
TOTALE		23764,75

Tabella 33 - Rilievo consumi elettrici 2019

Dal	Al	Consumo [kWhe]
01/01/2020	31/01/2020	3056,4
01/02/2020	28/02/2020	2886
01/03/2020	31/03/2020	1320
01/04/2020	30/04/2020	745,2
01/05/2020	31/05/2020	2338,8
01/06/2020	30/06/2020	1444,8
01/07/2020	31/07/2020	813,6
01/08/2020	31/08/2020	699,6
01/09/2020	30/09/2020	1620
01/10/2020	31/10/2020	2541,6
01/11/2020	30/11/2020	2752,8
01/12/2020	31/12/2020	3220,8
TOTALE		23439,6

Tabella 34 - Rilievo consumi elettrici 2020

6 Valutazione energetica adattata all'utenza (*tailored energy performance assessment*)

6.1 Dati climatici orari

All'interno di una procedura di diagnosi energetica dinamica oraria, a differenza di una procedura con metodo stazionario, i dati meteo-climatici di input alla modellazione e il loro andamento costituiscono un parametro di particolare influenza ai fini del calcolo della prestazione energetica del sistema edificio impianto. Al fine di modellare al meglio i parametri climatici esterni si è proceduto consultando i dati forniti da "Arpa Lecce" relativi alla stazione di misurazione del capoluogo Leccese riferiti alle annate 2018-2019-2020. Tali dati in formato semi-orario sono stati resi compatibili con il formato orario recepito dal software di calcolo utilizzato riportato in figura 54, e, per ogni anno ciascuno degli 8760 step orari è stato caratterizzato con i rispettivi valori di:

- Temperatura dell'aria esterna [°C];
- Irradianza solare diretta su piano orizzontale [W/m²];
- Irradianza solare diffusa su piano orizzontale [W/m²];
- Umidità relativa [UR%];
- Pressione di vapore [Pa];
- Velocità del vento [m/s].

In tabella 35 è possibile notare la caratterizzazione meteo-climatica oraria relativa al 1/01/2018.

Mese	Giorno	Ora	Temp. [°C]	Irr. Diretta [W/m ²]	Irr. Diffusa [W/m ²]	Umidità rel. [%]	Press.vapore [Pa]	Vel. Vento [m/s]
1	1	0	7,9	0	0	86,2	1008,2	0,8
1	1	1	7,6	0	0	86,7	1007,9	0,7
1	1	2	7,9	0	0	87,7	1007,9	1
1	1	3	7,1	0	0	89,9	1007,5	0,9
1	1	4	7,1	0	0	90,6	1007,1	0,7
1	1	5	7	0	0	93	1006,5	0,8
1	1	6	7,8	0	0	94,4	1006,1	1
1	1	7	8,2	0	2,2	94,2	1005,7	0,9
1	1	8	9,4	79,6	78,6	94,3	1005,4	0,7
1	1	9	11,2	45	149,1	93,4	1005,1	1,4
1	1	10	12,6	308,1	91,4	91,7	1005	1,2
1	1	11	14	17,2	172,6	85,9	1004,5	2,5
1	1	12	14,4	104,1	196,7	81,3	1003,9	2,3
1	1	13	15	91,5	171,1	79,2	1003,4	2,2
1	1	14	15,2	26,1	125,8	76,5	1002,8	3,1
1	1	15	14,7	0,1	11	77,3	1002,1	1,9
1	1	16	14,1	0	0	80,9	1001,8	1,6
1	1	17	13,4	0	0	84,5	1000,7	1,6
1	1	18	12,7	0	0	87,6	1000,1	2,1
1	1	19	13	0	0	90,2	999,4	2,5
1	1	20	13,1	0	0	92,4	998,8	2,2
1	1	21	13,6	0	0	93,2	998,5	1,9
1	1	22	12	0	0	90,5	998,7	3,1
1	1	23	11,6	0	0	90,5	998,5	1,4

Tabella 35 - Caratterizzazione climatica esemplificativa

6.2 Dati relativi all'utenza

Durante la fase di sopralluogo è stato possibile rilevare gli orari di effettivo funzionamento dell'edificio, intesi come gli orari di espletamento delle lezioni e gli orari di effettiva presenza del personale all'interno dell'edificio scolastico.

6.2.1 Gestione dell'impianto

Gli orari di effettivo utilizzo dell'edificio e i periodi di attivazione e spegnimento degli impianti sono stati ricavati tramite intervista al personale.

L'impianto di riscaldamento è attivo dal 15 Novembre al 30 Marzo e risulta essere in funzione dal lunedì al venerdì dalle ore 6:00 alle ore 16:00 in funzionamento continuo e spento durante le festività e le chiusure scolastiche in accordo con il calendario scolastico adottato dalla regione Puglia.

6.2.2 Profili di occupazione e sorgenti di calore interne

Trattandosi di un edificio pubblico di tipo scolastico al fine di ottenere i reali giorni di occupazione sono state considerate le festività in accordo con il calendario scolastico adottato dalla regione Puglia. Una volta fissati dunque i reali giorni di occupazione della struttura (203 giorni) tramite indagine al personale è stato possibile fissare l'orario per gli studenti dalle ore 8:30 alle ore 13:30, mentre per il personale della segreteria dalle ore 8:00 alle ore 14:00.

Per quanto riguarda le sorgenti di calore interne dell'edificio, per ognuno dei locali è stato calcolato il valore degli apporti interni sensibili relativi agli occupanti in accordo con la norma UNI 7730 .

Gli apporti termici interni dovuti alle sorgenti di illuminazione e alle apparecchiature elettroniche è stato calcolato ipotizzando un contributo agli apporti pari al 50% della potenza installata.

Di seguito si riportano in figura 36 a titolo esemplificativo gli andamenti giornalieri dei profili di occupazione e degli apporti sensibili interni riferiti al locale "aula 1".

Ore del giorno	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Media
OCCUPAZIONE																									
focc [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
APPORTI INTERNI SENSIBILI																									
φ _{int,P} [W/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,40
f _{int,A} [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
φ _{int,A} [W/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
f _{int,L} [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
φ _{int,L} [W/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65

Tabella 36 - Profilo orario esemplificativo locale "aula 1"

L'andamento settimanale degli apporti interni sensibili dovuti agli occupanti, ai dispositivi di illuminazione e alle apparecchiature elettriche caratterizzanti il locale "aula 1" espressi in W/m² sono riportati a titolo esemplificativo rispettivamente in figura 45 e figura 46.

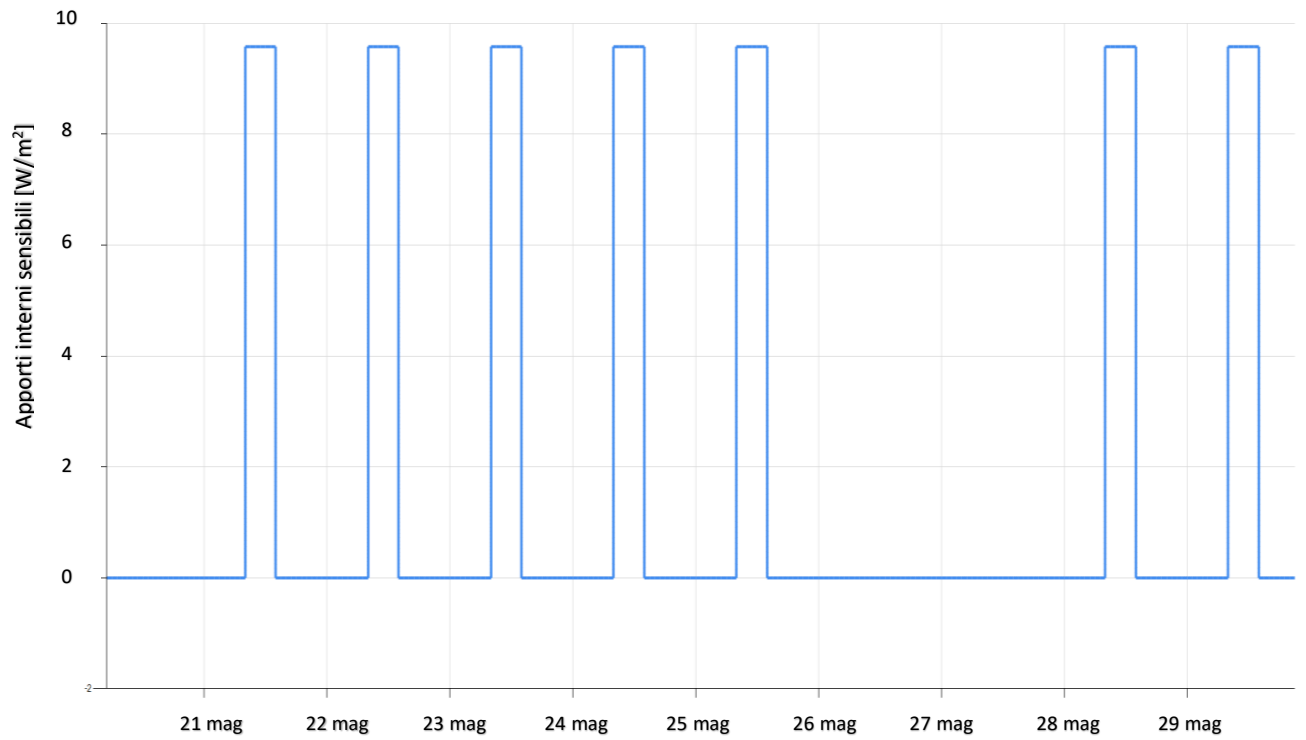


Figura 45 – Profilo apporti interni dovuti agli occupanti

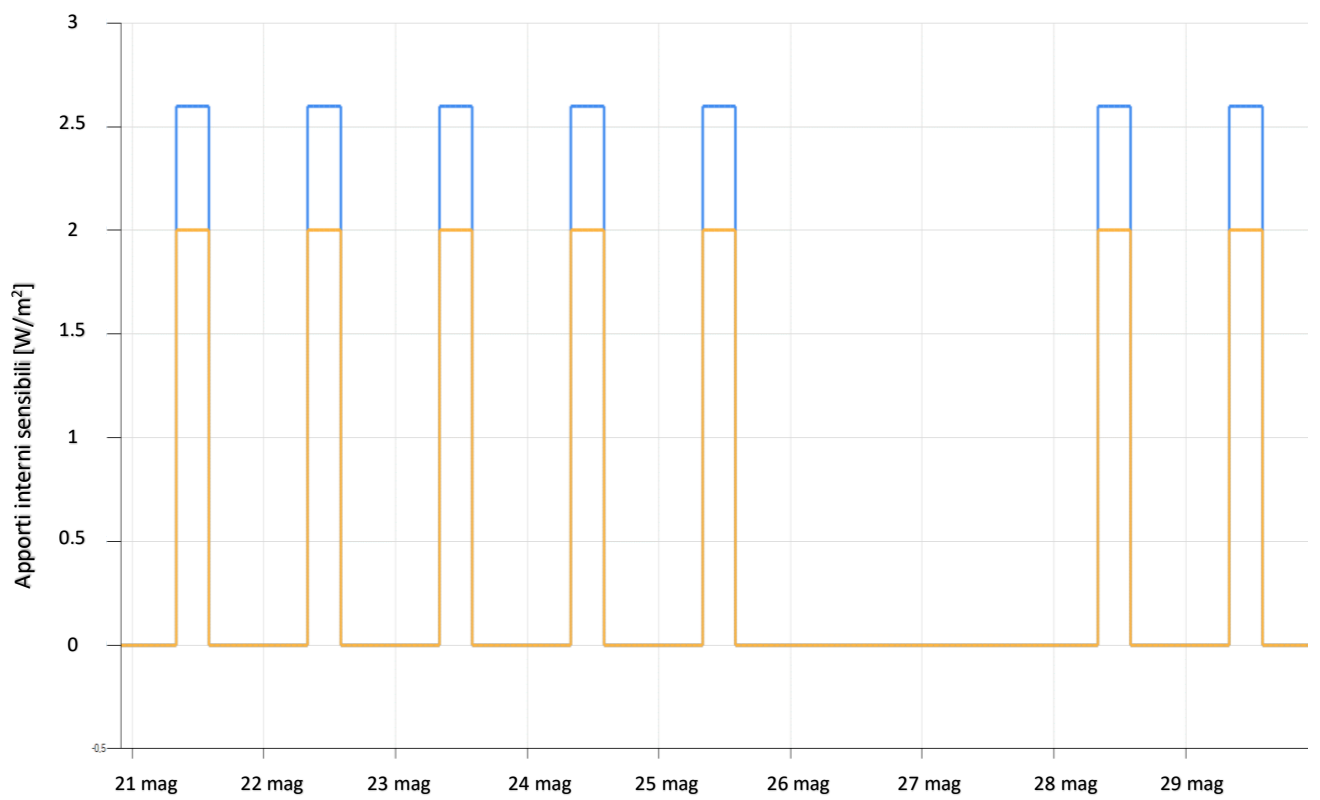


Figura 46 - Profilo apporti interni dovuti ai dispositivi di illuminazione e alle apparecchiature elettriche

6.2.3 Zonizzazione

La procedura di zonizzazione riguarda la suddivisione dell'edificio in zone termiche ed aree di servizio. Per quanto concerne la ripartizione in zone termiche, questa viene effettuata ai fini del calcolo del bilancio termico e dei carichi e i fabbisogni per riscaldamento e raffrescamento. Se possibile l'edificio viene considerato come un'unica zona termica tuttavia, può risultare necessario dividere l'edificio in più zone termiche per vari possibili motivazioni imputabili alle condizioni d'uso degli ambienti e alla complessità dell'edificio e dei relativi sistemi impiantistici.

Poiché l'edificio risulta essere caratterizzato da un'uniformità per quanto riguarda i sistemi impiantistici di emissione e le caratteristiche termofisiche dei componenti edilizi, all'interno del presente lavoro la suddivisione in zone termiche è stata condotta attraverso una differenziazione basata sui seguenti parametri:

- destinazioni d'uso dei locali e caratterizzazione dell'utenza;
- esposizione e apporti solari;
- differenti proporzioni tra i diversi contributi allo scambio termico per trasmissione

Come è possibile notare in figura 47 il piano terra è stato suddiviso in 4 zone termiche rispettivamente:

- Zona 1 “Atrio ingresso”;
- Zona 2 “Ala piano terra ovest”;
- Zona 3 “Presidenza e uffici”;
- Zona 4 “Ala piano terra nord/ nord-est”.

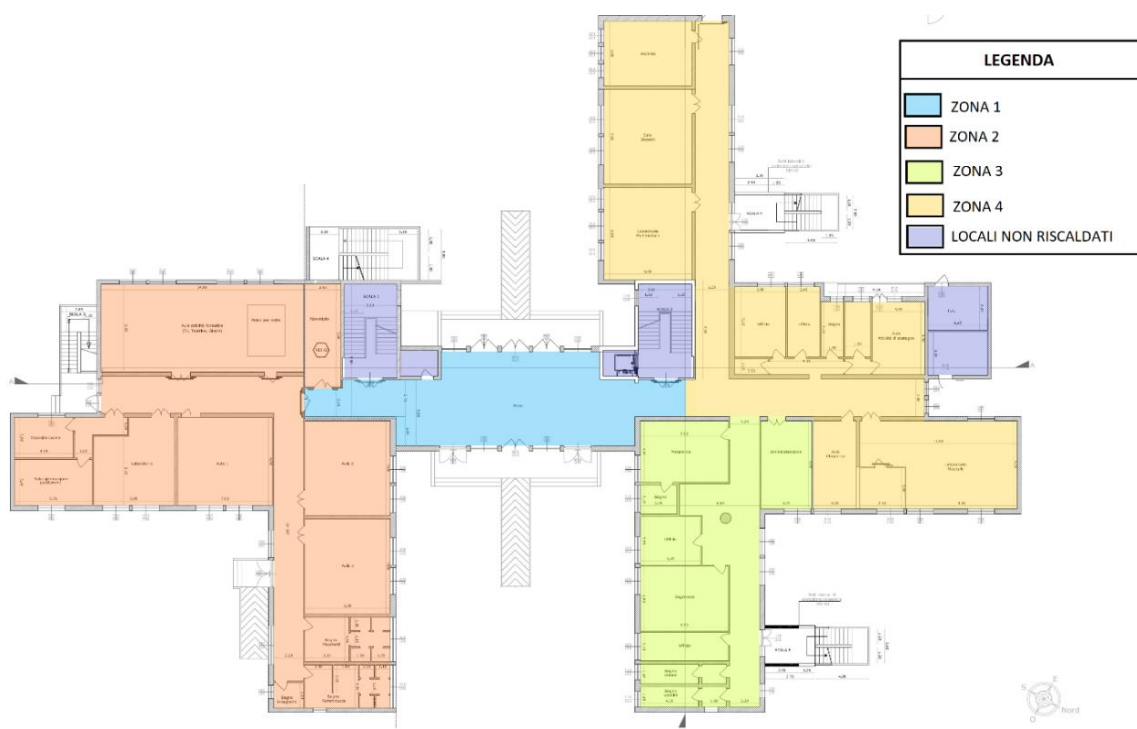


Figura 47 – Zonizzazione Piano Terra

Anche il piano primo, come riportato in figura 48, è stato suddiviso in 4 zone termiche:

- Zona 5 “Ala piano primo ovest”;
- Zona 6 “Passerella piano primo”;
- Zona 7 “Ala piano primo nord/nord-ovest”;
- Zona 8 “Ala piano primo est, sud-est”.

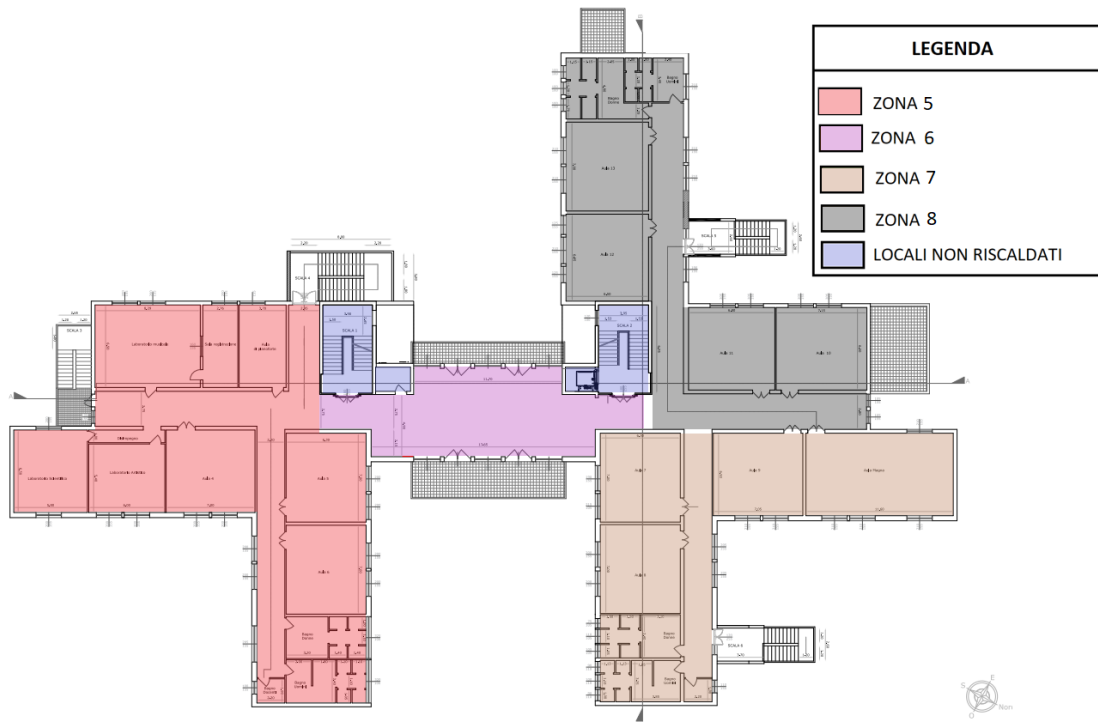


Figura 48 – Zonizzazione Piano Primo

La ripartizione dell’edificio in aree di servizio è una procedura che consiste nel suddividere l’edificio, per ogni servizio energetico preso singolarmente, in funzione delle rispettive caratteristiche impiantistiche. La struttura oggetto di indagine, caratterizzata dai servizi energetici di riscaldamento, acqua calda sanitaria, illuminazione e trasporto, data l’omogeneità degli impianti consente di essere considerata per rogni servizio come un’unica area di servizio.

Si riportano di seguito in tabella 37 i risultati relativi ad ogni zona termica in termini di superficie netta, volume lordo riscaldato, superficie lorda disperdente e rapporto di forma dato dal rapporto tra superficie lorda disperdente e volume lordo riscaldato.

DETTAGLI ZONE TERMICHE					
Nr.	Cat. DPR 412	Sup. netta [m ²]	Vol. lordo [m ³]	Sup. lorda [m ²]	S / V [m ⁻¹]
1	E.7	138,89	577,75	332,40	0,58
2	E.7	456,33	1881,98	922,45	0,49
3	E.7	201,08	847,85	404,04	0,48
4	E.7	410,04	1737,53	900,01	0,52
5	E.7	462,20	1899,83	925,84	0,49
6	E.7	133,30	553,55	321,09	0,58
7	E.7	298,30	1245,92	620,70	0,50
8	E.7	325,20	1361,17	690,22	0,51

Tabella 37 - Tabella riepilogativa zone termiche

7 Calibrazione del modello

Una volta ottenuto il modello adattato all'utenza (tailored energy performance assessment) il passaggio successivo è quello di comparare i risultati ottenuti dalle letture (operational energy performance assessment) con i dati di output ottenuti mediante la modellazione energetica per testarne la corrispondenza.

7.1 Procedura di calibrazione

Gli edifici esistenti sono caratterizzati da numerose incertezze relative ai parametri di input del modello utilizzato per la simulazione energetica come ad esempio incertezze relative a semplificazioni presenti negli algoritmi di calcolo, incertezze relative ai dati utilizzati per modellare il sistema edificio-impianto in generale, per questo motivo la procedura di calibrazione rappresenta una procedura dal carattere intrinsecamente iterativo. All'interno del presente lavoro di tesi la calibrazione è stata condotta in accordo le Linee Guida ASHRAE 14-2014 e risulta essere di "secondo livello" poiché corredata da un'attività di sopralluogo finalizzata alla verifica dei dati relativi allo stato di fatto e alla raccolta di ulteriori informazioni.

La calibrazione rappresenta un processo di messa a punto dei dati di input alla simulazione in modo che il consumo energetico misurato mediante letture dei consumi relativi ai vettori energetici considerati corrisponda strettamente a quello calcolato tramite il modello energetico.

In letteratura sono presenti due principali tipologie di metodi di calibrazione basate rispettivamente su modelli grafici o numerici, nel presente lavoro il modello energetico è stato calibrato seguendo metodi grafici e successivamente validato mediante l'utilizzo di indici numerici.

Il primo passo per testare la bontà dei dati ottenuti tramite la modellazione energetica è stato quello di servirsi di uno dei principali metodi grafici rappresentato dalla firma energetica.

La firma energetica costituisce un metodo di calibrazione di tipo grafico e, a differenza di altri metodi, consente non solo di calibrare numericamente il modello ma anche di interpretare i risultati e di correlarli al reale comportamento dell'edificio. Tale procedura grafica consiste in una correlazione tra i consumi energetici (calcolati e misurati) o il carico richiesto all'impianto e le relative condizioni climatiche esterne e, seppur basata su dati di natura numerica, fornisce un'immediata visione qualitativa sul livello di calibrazione.

Una volta ottenute le firme energetiche relative rispettivamente ai dati calcolati e misurati, l'obiettivo è quello di minimizzare le differenze tra le due firme e far sì che le due funzioni, aventi in genere andamento di tipo lineare, possano essere sovrapponibili. Poiché, come precedentemente sottolineato, ogni modellazione energetica risulta essere inevitabilmente correlata ad un determinato livello di incertezze relative ai parametri di input, è molto difficile che a primo tentativo le due firme energetiche siano sovrapponibili.

In questi casi, come si evince dallo schema relativo alla procedura di calibrazione riportato in figura 49, si procede interpretando i risultati ottenuti in modo tale da selezionare i parametri di input alla modellazione energetica sui quali risulta opportuno apportare delle modifiche.

Calibration process

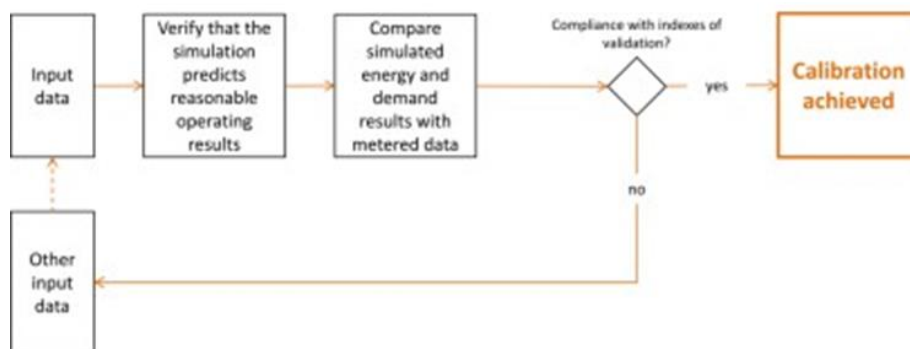


Figura 49 - Schema procedura di calibrazione

La firma energetica relativa ai dati calcolati risulta nella maggior parte dei casi avere un andamento di tipo lineare, per tale motivo trattandosi di una funzione lineare questa può essere modificata agendo sull'inclinazione o per mezzo di una traslazione della retta stessa.

Per descrivere la logica alla base del processo di calibrazione riferito al reale caso studio considerato, si riportano, a titolo esemplificativo, due dei numerosi interventi di modifica dei parametri di input alla modellazione che hanno contraddistinto il complesso processo iterativo di calibrazione del modello energetico del presente lavoro di tesi.

Per quanto concerne i casi in cui l'inclinazione della firma energetica di calcolo e quella misurata siano simili, ma risultino sfalsate come in figura 50, risulta opportuno modificare la firma energetica di calcolo mediante traslazione della stessa intervenendo su quei dati di input alla modellazione il cui contributo energetico non dipenda dalla temperatura esterna come ad esempio potrebbero essere i parametri relativi alla temperatura interna o agli apporti termici interni dovuti agli occupanti, alle apparecchiature elettriche e alle sorgenti luminose artificiali installate nei locali dell'edificio.

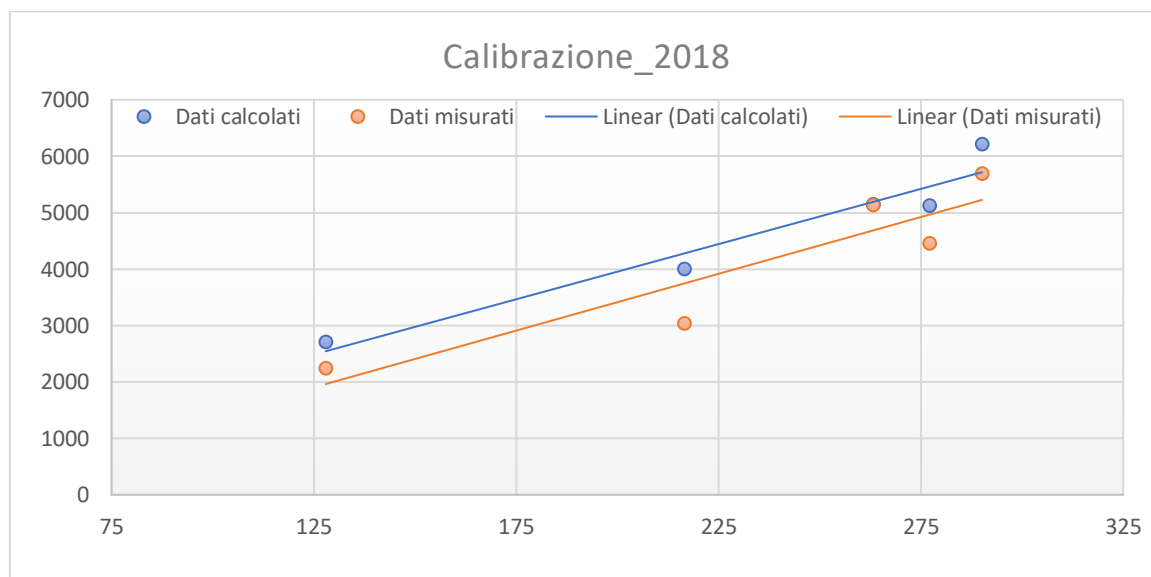


Figura 50 - Step di calibrazione intermedio_2018

Nel presente caso, si è deciso di agire sul parametro relativo agli apporti termici interni dovuti alle sorgenti di illuminazione. Nel dettaglio il contributo agli apporti per tali dispositivi è stato ridotto dal 50 al 25% della totale potenza installata. Tale intervento sui parametri di input ha prodotto, come è

possibile notare in figura 51, una traslazione verso il basso della firma energetica di calcolo portando ad una migliore corrispondenza tra le funzioni descritte dalle due firme energetiche

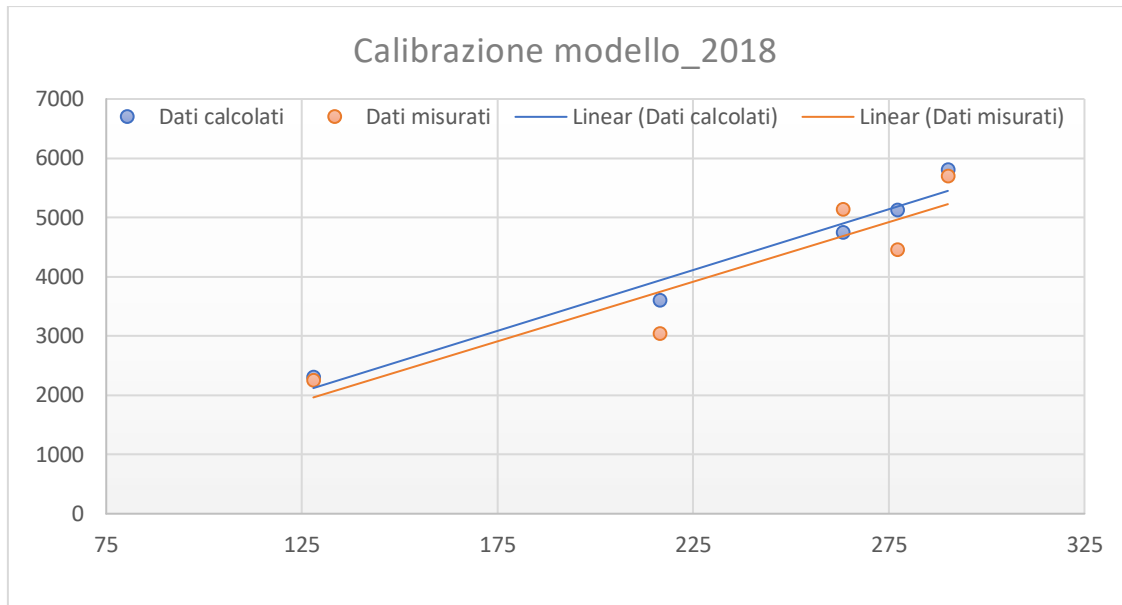


Figura 51 - Step di caslibrazione intermedio_2018

Il secondo caso rappresentativo è costituito da un'azione di modifica dei parametri di input alla modellazione avente come obiettivo quello di modificare l'andamento della firma energetica agendo sull'inclinazione della stessa. All'atto pratico, per modificare l'inclinazione della funzione descritta dalla firma energetica è opportuno agire su quei dati di input alla modellazione il cui contributo energetico sia funzione della temperatura esterna come ad esempio potrebbe essere una modifica dei dati di input quali ventilazione, trasmittanza termica degli elementi ecc.

Come è possibile notare in figura 52, il discostamento tra le firme energetiche misurate e calcolate è più marcato in corrispondenza di alti valori relativi ai gradi giorno, ossia alle basse temperature.

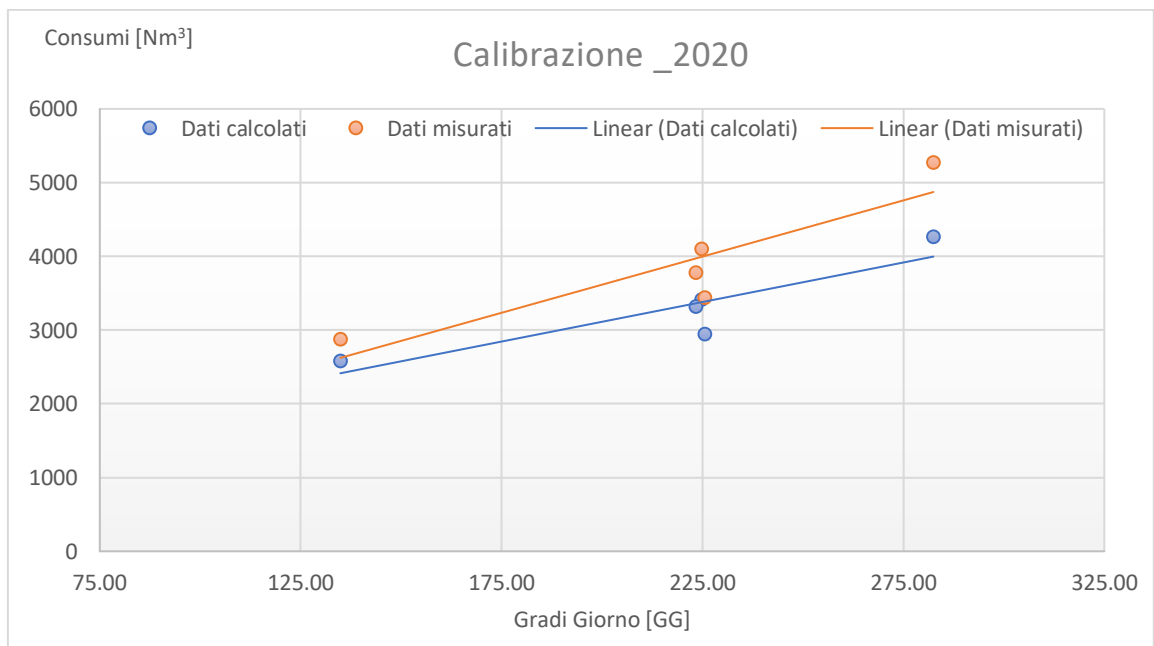


Figura 52 - Step di calibrazione intermedio_2020

L'interpretazione di questi risultati affiancate a considerazioni di natura tecnica ha portato all'individuazione di uno dei possibili parametri sui quali agire per diminuire il gap ed avere una migliore corrispondenza tra i due andamenti.

Nel presente caso si è scelto di intervenire sul parametro relativo alla portata di ventilazione naturale incrementando tale valore da 0.3 a 0.5 Vol/h. I risultati così ottenuti, riportati in figura 53, dalla quale è possibile evincere come l'inclinazione della firma energetica di calcolo sia diventata molto più simile a quella relativa alla firma energetica misurata.

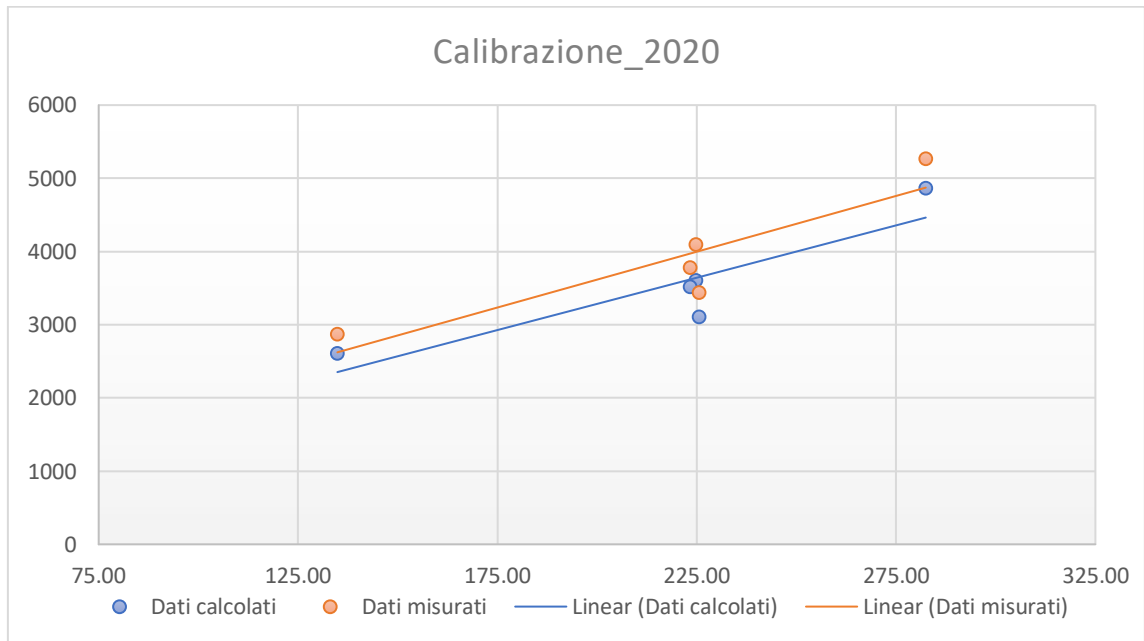


Figura 53 - Step di calibrazione intermedio_2020

Dopo aver descritto la base della procedura adottata all'interno della procedura di calibrazione di seguito si riportano per ognuna delle tre annualità considerate le firme energetiche e il discostamento mensile tra i dati calcolati e i dati rilevati.

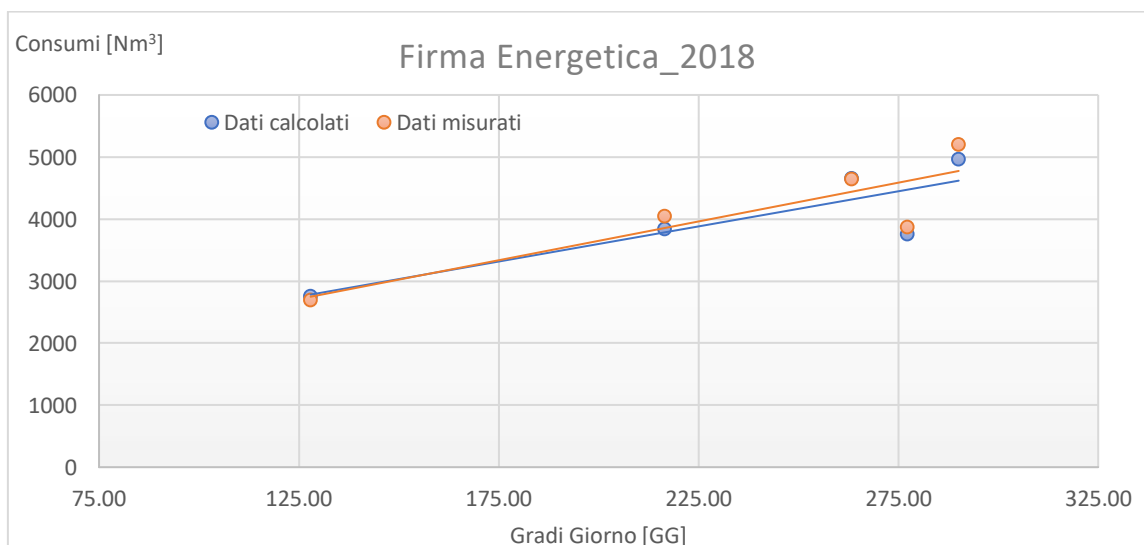


Figura 54 – Firma Energetica 2018

2018					
Mese	Gradi Giorno	Consumi calcolati [Nm ³]	Consumi misurati [Nm ³]	D	%
GENNAIO	290,09	4965	5197	-232,24	-4,47
FEBBRAIO	263,27	4656	4638	17,40	+0,38
MARZO	216,52	3841	4040	-199,41	-4,94
NOVEMBRE	127,93	2757	2689	67,20	+2,50
DICEMBRE	277,20	3753	3864	-111,79	-2,89

Tabella 38 - Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2018

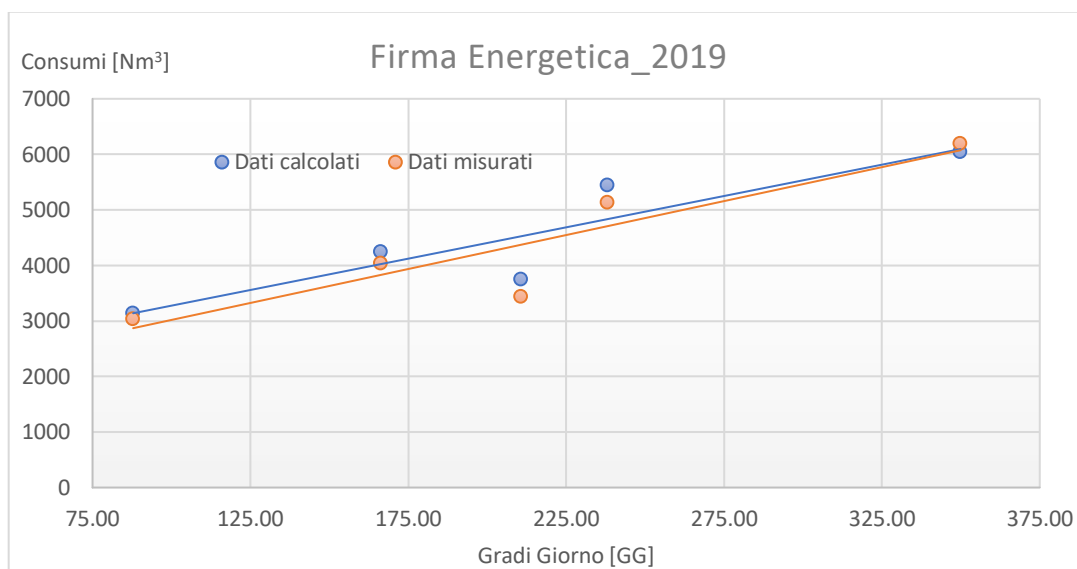


Figura 55- Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2019

2019					
Mese	Gradi Giorno	Consumi calcolati [Nm ³]	Consumi misurati [Nm ³]	D	%
GENNAIO	349,88	6042	6197	-141,2	-2,28
FEBBRAIO	238,11	5439	5138	+350,4	+6,82
MARZO	166,29	4243	4040	+376,5	+9,32
NOVEMBRE	87,85	3135	3030	+325,4	+10,74
DICEMBRE	210,61	3753	3441	+27,7	+0,81

Tabella 39 - Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2019

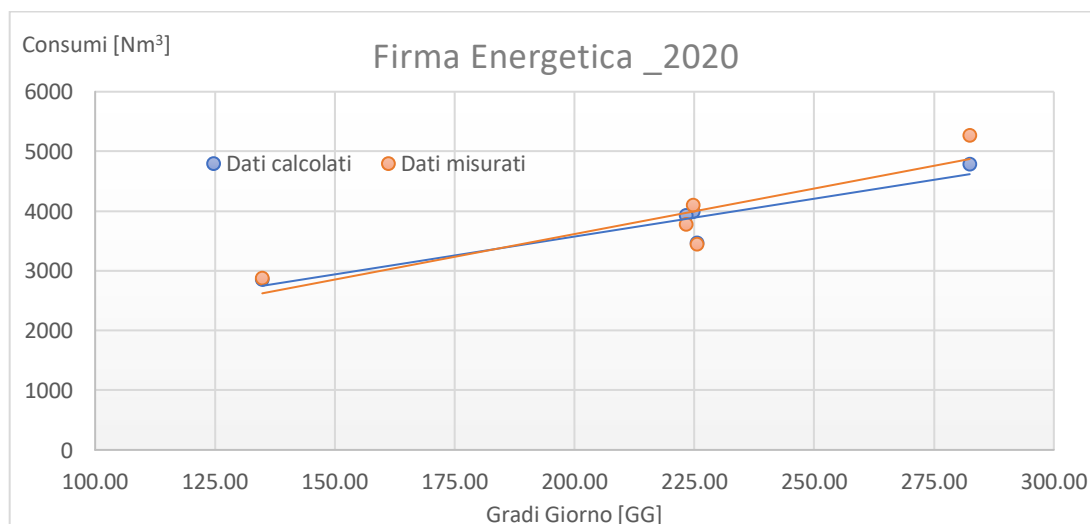


Figura 56- Firma Energetica_2020

2020					
Mese	Gradi Giorno	Consumi calcolati [Nm ³]	Consumi misurati [Nm ³]	D	%
GENNAIO	282	4788	5270	-482,8	-9,16
FEBBRAIO	224	3989	4097	-108,8	-2,66
MARZO	223	3926	3780	145,2	+3,84
NOVEMBRE	134	2852	2876	-24,1	-0,84
DICEMBRE	225	3468	3441	26,7	+0,78

Tabella 40 - Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2020

Dopo aver ottenuto una soddisfacente corrispondenza tra le due firme energetiche si è proceduto alla validazione della calibrazione appena ottenuta per mezzo di un approccio di tipo statistico basato su due indici:

- “Monthly mean bias error index” (MBE);
- “Coefficient of the root-mean-square error” (CVRMSE).

Il primo indice indica una percentuale di errore rappresentativa di quanto i dati calcolati si discostano da quelli misurati su base mensile o annuale.

$$MBE = \frac{\sum_{period} (S - M)_{interval}}{\sum_{period} M_{interval}} \times 100 \text{ [%]}$$

dove:

- S rappresenta energia calcolata;
- M rappresenta energia misurata.

Analizzando il numeratore della formula relativa al calcolo del (MBE) sopra riportata è possibile notare come, trattandosi di una sommatoria priva di valore assoluto, questo possa causare delle anomalie nella veridicità dei risultati poiché differenze tra consumi stimati e misurati positive potrebbero bilanciare altrettante differenze negative portando ad un valore di MBE accettabile ma poco rappresentativo. Quindi, poiché variazioni nel segno del numeratore di tale indice potrebbero portare a percentuali di errore non veritiere, è necessario adottare un ulteriore indice statistico il CV(RMSE). Infatti il CV(RMSE) rappresenta il coefficiente di variazione dello scarto quadratico medio tra dati misurati e calcolati su base mensile o annuale.

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE_{period}}{A_{period}} \times 100 \text{ [%]}$$

dove:

- A rappresenta l'energia media utilizzata nel periodo considerato.

Il (RMSE) rappresenta lo scarto quadratico medio e rappresenta un indice del livello di dispersione che caratterizza i dati, viene calcolato utilizzando formula riportata di seguito.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{interval}^2}{n_{interval}}}$$

dove:

-n rappresenta il numero di intervalli nel periodo considerato

In funzione della tipologia di dati di input, i limiti da rispettare relativi ai due indici statistici per ritenere un modello calibrato sono riportati in tabella 41:

Statistical index	Monthly data	Hourly data
MBE	± 5%	± 10%
CV(RMSE)	15%	30%

Tabella 41 - Valori limite per MBE e CV(RMSE) per dati mensili e orari

7.2 Risultati calibrazione

La procedura di calibrazione e validazione descritte nel precedente paragrafo sono state condotta per ognuno dei tre anni considerati, ossia le annualità 2018-2019-2020, e i relativi risultati finali sono riportati rispettivamente nelle tabelle 42_44, dalle quali è possibile notare come in tutti e tre i casi la calibrazione del modello energetico risulti pienamente soddisfatta. Infatti per ognuna delle tre annualità entrambi gli indici statistici considerati, ossia il MBE ed il CV(RMSE) risultino abbondantemente inferiori ai limiti presentati in tabella 41.

2018					
Mese	Gradi Giorno	Consumi calcolati [Nm ³]	Consumi misurati [Nm ³]	CV	MBE
GENNAIO	290	4965	5197	3,46	1,94
FEBBRAIO	263	4656	4638		
MARZO	216	3841	4040		
NOVEMBRE	127	2757	2689		
DICEMBRE	277	3753	3864		

Tabella 42 - Validazione della procedura di calibrazione_2018

2019					
Mese	Gradi Giorno	Consumi calcolati [Nm ³]	Consumi misurati [Nm ³]	CV	MBE
GENNAIO	282	6042	6197	5,41	4,29
FEBBRAIO	224	5439	5138		
MARZO	223	4243	4040		
NOVEMBRE	134	3135	3030		
DICEMBRE	225	3753	3441		

Tabella 43 - Validazione della procedura di calibrazione_2019

2020					
Mese	Gradi Giorno	Consumi calcolati [Nm ³]	Consumi misurati [Nm ³]	CV	MBE
GENNAIO	349	4788	5270	4,93	1,95
FEBBRAIO	238	3989	4097		
MARZO	166	3926	3780		
NOVEMBRE	87	2852	2876		
DICEMBRE	210	3468	3441		

Tabella 44 - Validazione della procedura di calibrazione_2020

8 Analisi tecnico economica di misure di efficienza energetica

8.1 Modello calibrato con dati climatici standard (*calibrated tailored energy performance assessment with standard climate*)

Una volta ottenuto un modello energetico adattato all'utenza e calibrato, con l'obiettivo di rendere i risultati indipendenti dalle particolari condizioni meteo-climatiche relative alle tre annualità considerate, si è proceduto effettuando una valutazione di tipo adattato all'utenza, ma caratterizzata da dati meteorologici orari di input di tipo standard. Di seguito si riporta in figura 57, il grafico relativo agli andamenti orari della temperatura esterna e in tabella 45 è possibile notare i gradi giorno in condizioni standard riferiti al periodo di funzionamento del servizio di riscaldamento.

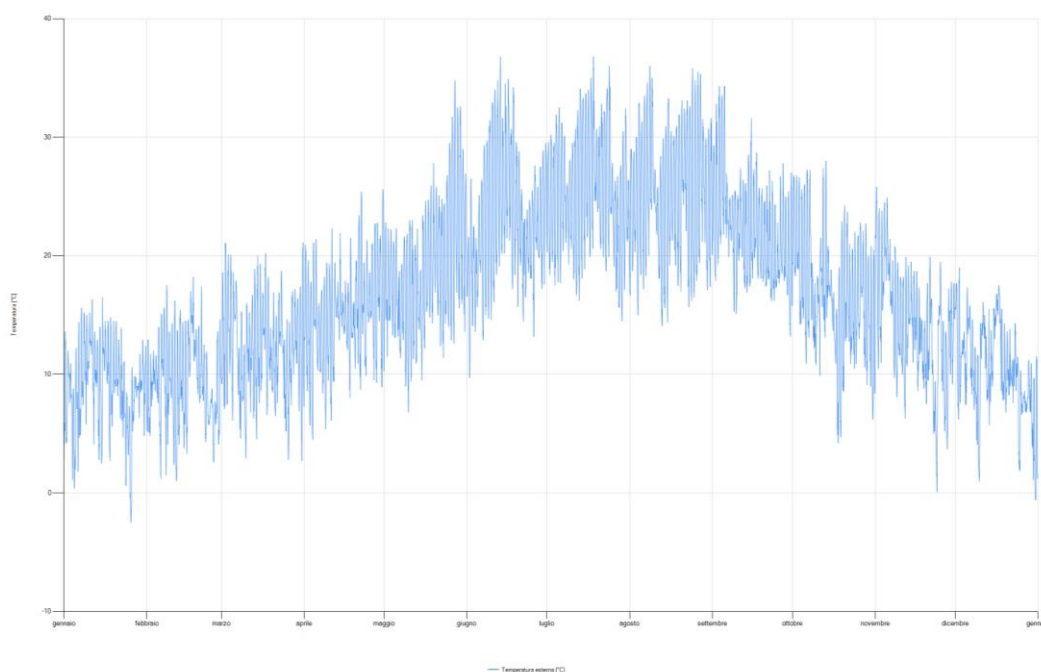


Figura 57 - Andamento valori orari standard di temperatura

Andamento dei Gradi Giorno durante il periodo di riscaldamento	
Mese	Gradi Giorno
GENNAIO	345
FEBBRAIO	295
MARZO	234
NOVEMBRE	179
DICEMBRE	299

Tabella 45 - Andamento dei gradi giorno relativo al periodo di riscaldamento

I risultati in termini di fabbisogni di energia primaria, indici di prestazione energetica e vettori energetici con le relative emissioni di biossido di carbonio sono riportati rispettivamente nelle tabelle 46_48.

Servizio	Qp,nren [kWh]	Qp,ren [kWh]	Qp,tot [kWh]
Riscaldamento	238254	1030	239283
Acqua calda sanitaria	2490	600	3091
Illuminazione	36770	8862	45632
Trasporto	1993	480	2473
Globale	279507	10973	290479

Tabella 46 - Fabbisogni energia primaria

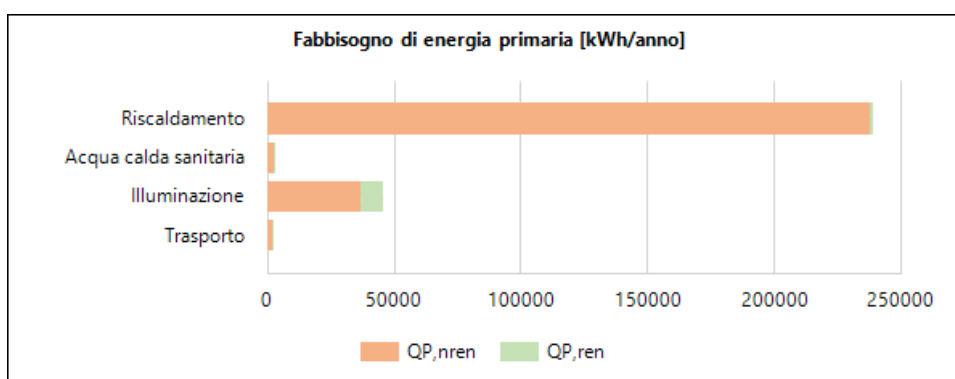


Figura 58- Fabbisogno di energia primaria

Servizio	EP,nren [kWh/m ²]	EP,ren [kWh/m ²]	EP,tot [kWh/m ²]
Riscaldamento	98,24	98,24	98,24
Acqua calda sanitaria	1,03	1,03	1,03
Illuminazione	15,16	15,16	15,16
Trasporto	0,82	0,82	0,82
Globale	115,24	115,24	115,24

Tabella 47 - Indici di prestazione energetica

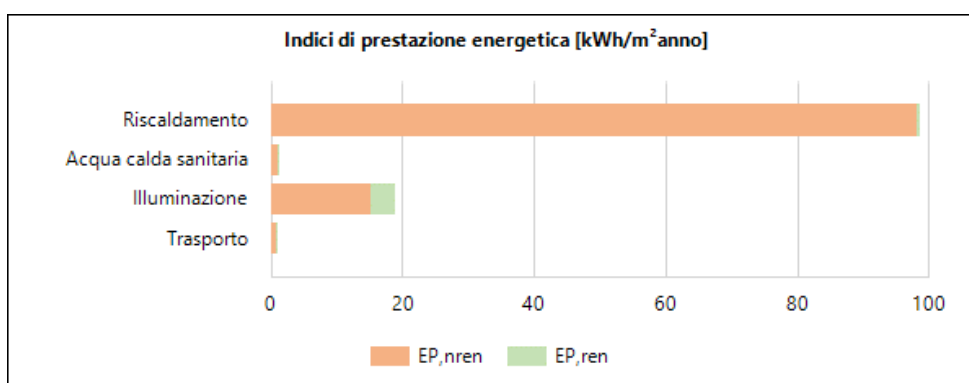


Figura 59- Indici di prestazione energetica

Vettore energetico	Consumo	U.M.	CO ₂ [kg/anno]
Metano	22419	Nm ³ /anno	46796
Energia elettrica	23346	kWhel/anno	10739

Tabella 48 - Consumi energetici modello adattato all'utenza con dati climatici di tipo standard

8.2 Analisi dei costi

Nel presente lavoro l'analisi dei costi è stata condotta in accordo con la norma europea EN 15459-1:2017 "Energy performance of building–Economic evaluation procedure for energy system in building–Part 1: Calculation procedures".

Per ognuno dei singoli interventi e scenari esaminati l'analisi si è basata sui seguenti indicatori economici:

- Valore attuale netto (VAN);
- Tempo di ritorno dell'investimento;
- Costo globale;

Valore netto attualizzato (Net Present Value NPV)

Il calcolo del valore netto attualizzato si ottiene attraverso un'analisi dei flussi di cassa, intesi come differenza tra ricavi e costi per ognuno degli anni costituenti il ciclo di vita considerato, tali differenze annuali vanno attualizzate tramite il fattore di attualizzazione. Di seguito si riportano le formule adottate per il calcolo dei flussi di cassa attualizzati CF_{disc} e del valore netto attualizzato NPV.

$$CF_{disc,t} = (R - C)_{disc,t} = \frac{(R - C)_{(t)}}{(1 + r)^t} = CF_{(t)} \times DF_{(t)}$$

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_{(t)}}{(1 + r)^t} = \sum_{t=0}^n CF_{(t)} \times DF_{(t)}$$

Dove:

- $CF_{(t)}$ indica il flusso di cassa netto riferito ad un periodo t (nel presente caso espresso in anni);
- t indica il periodo a cui è riferito il flusso di cassa (nel presente caso espresso in anni);
- $(1 + r)^{-t}$ indica il fattore di attualizzazione;
- r indica il tasso di interesse reale e viene calcolato come:

$$r = \frac{r_m - r_{in}}{1 + r_{in}}$$

Dove:

- r_m indica il tasso di interesse di mercato;
- r_{in} indica il tasso di inflazione;

Periodo di ritorno dell'investimento (Discounted Payback Period DPP)

Il periodo di ritorno dell'investimento rappresenta il periodo entro il quale vengono recuperate le somme investite e corrisponde dunque al periodo per il quale il valore netto attualizzato si annulla.

Costo globale (Global Cost)

Il costo globale indica la somma di tutti i costi di esercizio e periodici sostenuti all'interno del ciclo di vita considerato attualizzati all'anno iniziale.

$$GC(n) = C_i + \sum_j \left[\sum_{t=0}^n (C_{a,t(j)} \times DF_{(t)}) - V_{f,n(j)} \right]$$

Dove:

- C_i indica il costo di investimento iniziale;
- $C_{a,t(j)}$ indica la somma dei costi di esercizio e periodici per ogni anno attualizzate all'anno iniziale;
- $DF_{(t)}$ indica il fattore di attualizzazione;
- $V_{f,n}$ indica il valore finale del bene.

Alla luce dei parametri presi in considerazione, l'analisi dei costi condotta nel presente lavoro è caratterizzata dai seguenti parametri di input:

- Durata ciclo di vita considerata pari a 30 anni;
- Tasso di inflazione r_i pari al 2,5 %;
- Tasso di mercato r_m nullo;
- Tasso di interesse globale r pari al 2,5 %;
- Costo attuale vettore energia elettrica pari a 0.35 €/kWh;
- Costo attuale vettore metano pari a 1.5 €/Nm³;
- Costo interventi da "Elenco Prezzi regione puglia 2023" e "Prezziario Dei";

I costi di manutenzione espressi come percentuale sull'investimento iniziale e la durata degli interventi espressa in anni sono stati definiti in accordo con i valori indicati nella norma EN 15459-1:2017 riportati in tabella 49.

Component	Lifespan (min – max) [years]	Annual maintenance costs (including operation, repairs and servicing costs) [% of the initial investment]	Component	Lifespan (min – max) [years]	Annual maintenance costs (including operation, repairs and servicing costs) [% of the initial investment]
Fuel tank	30	0.5	Air conditioning units	15	4
Heat pumps	15 – 20	2 – 4	Boiler – condensing	20	1 – 2
Heat recovery units - cyclic	15	4	Burners, oil and gas	10	4 – 6
Heat recovery units - static	20	4	Control system - central	15 – 25	4
Meters	10	1	Control system - room	15 – 25	4
Pumps – circulation	10 – 20	2	Control valves - automatic	15	6
Radiators, water	30 – 40	1 – 2	Control valves - manual	30	4
Solar collector (vacuum, plate)	15 – 25	0.5	Convectors	20	1
Tank storage for domestic water	20	1	Cooling panels and ceilings	30	2
Valve - thermostatic	20	1.5	Diffusers	20	4
Water floor heating	50	2	Fan coil units	15	4
			Fans	15 – 20	4

Tabella 49 - Ciclo di vita e costi annuali di manutenzione distinti per componente impiantistico oggetto di intervento

8.3 Pianificazione degli interventi

Il primo passo per poter valutare l'effettiva convenienza delle misure di efficienza energetica considerate è quello di effettuare un'analisi dei costi in esercizio della struttura "running costs" allo stato di fatto i quali includono le spese relative ai vettori energetici, i costi di installazione, sostituzione e manutenzione degli interventi considerati.

I consumi energetici relativi ai vettori di energia elettrica e gas metano relativi allo stato di fatto sono riportati in tabella 50.

Consumi Energetici Stato di Fatto	
Metano [Nm ³]	22419
Elettricità [kWh _e]	23346

Tabella 50 - Consumi energetici annuali Stato di fatto

L'analisi dei costi relativa allo stato di fatto risulta essere caratterizzata da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a 800 €/m² e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,n-ren}$ pari a 115 kWh/m².

Stato di fatto	
Costo globale [€/m ²]	800
$EP_{gl,n-ren}$ [kWh/m ²]	115

Tabella 51 - Costo Globale e indice di prestazione energetica non rinnovabile stato di fatto

La pianificazione degli interventi di efficienza energetica da prendere in considerazione è stata condotta partendo ovviamente con l'analizzare le principali criticità presentate dall'edificio allo stato di fatto.

Per quanto concerne il fabbricato allo stato di fatto, come riportato in figura 60, questo presenta una potenza invernale di progetto pari a 181 kW dei quali 156 kW per trasmissione e i restanti 24 kW per ventilazione naturale.

Risultati					
Dettaglio dispersioni		Totali			
Potenza dispersa per trasmissione	Φ_{tr}	156757 W	Volume totale	V	7276,0 m ³
Potenza dispersa per ventilazione	Φ_{ve}	24507 W	Potenza totale	Φ_{hl}	181264 W

Figura 60 – Dispersioni termiche riferite all'intero edificio

Analizzando le dispersioni per trasmissione è stato possibile ripartirle per componente, in modo tale da avere una visione più chiara dei contributi allo scambio termico offerti dai vari elementi di chiusura.

Le dispersioni attraverso le strutture opache costituiscono circa il 54 % (84 kW) della potenza dispersa per trasmissione, i contributi dei singoli elementi opachi sono riportati in tabella 52.

Cod.	Tipo	Descrizione	U [W/m ² K]	θ _e [°C]	Sup. Tot [m ²]	Φ _T [W]	%
M1	T	laterizio 40	0,789	0,0	1682,82	20160	19,9
M3	U	cls 25_clim-unclim_scala1	2,601	10,0	118,08	3084	2,0
M4	U	cls 25_clim-unclim_scala2	2,601	9,1	113,35	3201	2,0
M8	U	cls 30_clim-unclim	2,472	9,1	30,15	809	0,5
M12	U	tufo_25_clim_unclim	1,415	2,5	20,25	502	0,3
P1	G	pavimento controterra	0,362	0,0	1382,64	10015	6,4
S2	T	soffitto p1	1,288	0,0	1381,15	35589	22,7
Totale						84353	53,8

Tabella 52 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi opachi verticali

Questa analisi dei contributi allo scambio termico offerti dai diversi elementi opachi ha messo in chiara evidenza l'incidenza sullo scambio termico totale per trasmissione dell'elemento di copertura "S2"(22.7%) e delle pareti perimetrali esterne del fabbricato "M1"(19.9%).

L'involucro trasparente, come dettagliatamente descritto nell'apposito capitolo, risulta caratterizzato da infissi in alluminio senza taglio termico e vetro semplice e, come riportato in tabella 53, è causa del 34,5% (54 kW) delle totali dispersioni per trasmissione, motivo per il quale è stato inserito tra gli interventi presi in considerazione nei prossimi paragrafi.

Cod.	Descrizione	U [W/m ² K]	θ _e [°C]	Sup. Tot [m ²]	Φ _T [W]	%
W3	PF_120_245	6,183	0,0	8,82	1182	0,8
W4	F_100_100	6,285	0,0	7,00	980	0,6
W5	F_100_110	6,268	0,0	4,40	607	0,4
W6	F100_155	6,221	0,0	3,10	424	0,3
W8	F_105_145	6,220	0,0	3,04	397	0,3
W9	F_105_155	6,212	0,0	6,52	932	0,6
W10	F_110_155	6,204	0,0	3,41	465	0,3
W13	F_125_155	6,182	0,0	3,88	528	0,3
W14	F_155_125	6,182	0,0	3,88	504	0,3
W15	F_190_155	6,129	0,0	8,83	1227	0,8
W17	F_200_155	6,173	0,0	133,30	18465	11,8
W18	F_200_260	6,160	0,0	104,00	14414	9,2
W19	F_210_155	6,166	0,0	74,91	10643	6,8
W20	F_285_155	6,163	0,0	8,84	1199	0,8
W21	F_310_100	6,250	0,0	12,40	1783	1,1
W23	F_90_110	6,289	0,0	1,98	274	0,2
Totale					54022	34,5

Tabella 53 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi finestrati

Il restante l'11,7% delle totali dispersioni per trasmissione risulta essere associato ai ponti termici caratterizzanti la struttura per un totale di circa 18 kW. In tabella 54 è possibile notare come i principali

contributi siano offerti da ponti termici “Z5_Parete/telaio” (3.1%), “Z8_Parete/solaio contro-terra” (2,5%) e “Z12_Parete/solaio interpiano” (3.1%).

Cod.	Descrizione	Ψ [W/mK]	Lungh. Tot [m]	ΦT [W]	%
Z3	IF - Parete - Solaio interpiano	0,394	170,57	1476	0,9
Z5	W - Parete - Telaio_40	0,250	877,14	4937	3,1
Z6	P - Parete - Pilastro	0,315	258,00	1813	1,2
Z8	GF - Parete - Solaio controterra(40)	0,212	901,55	3866	2,5
Z9	GF - Parete - Solaio controterra(30)	0,284	156,72	933	0,6
Z12	IF - Parete - Solaio interpiano_40	0,374	475,24	3708	2,4
Z16	P - Parete - Pilastro	0,335	174,00	1326	0,8
Totale				18382	11,7

Tabella 54 - Dispersioni termiche per trasmissione relative ai ponti termici

Il diagramma a torta riportato in figura 61 indica graficamente la ripartizione del totale scambio termico per trasmissione tra i vari elementi costituenti l’involucro dell’edificio

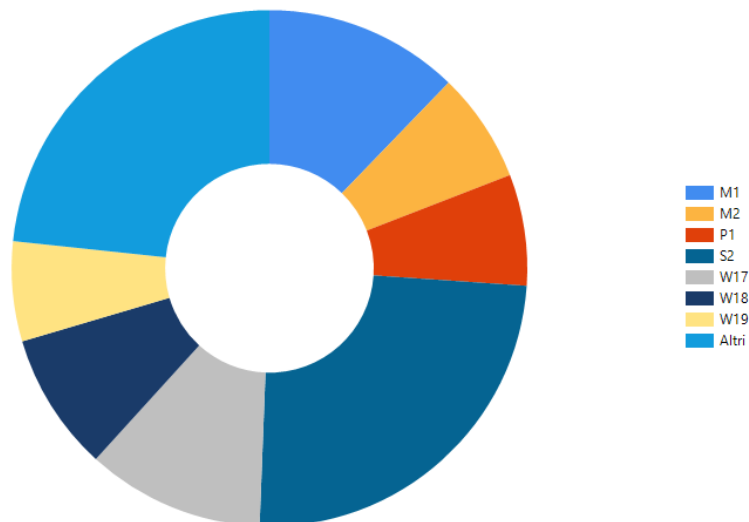


Figura 61 - Ripartizione contributi allo scambio termico per trasmissione totale

Dopo aver analizzato il comportamento e le principali criticità caratterizzanti il fabbricato si è passati ad esaminare le caratteristiche e i deficit relativi all’impianto dedicato al servizio di riscaldamento percorrendo a ritroso rispetto al verso dell’energia le caratteristiche e i rendimenti dei vari sottosistemi.

Il sottosistema di emissione, come precedentemente indicato, risulta essere caratterizzato da radiatori in ghisa funzionanti ad alta temperatura, si è assunto un rendimento pari $h_{H,em}$ del 93%.

L’edificio è costituito da un’unica zona termica e il sottosistema di regolazione è costituito da un termostato a diretto comando del generatore di calore e presenta un rendimento $h_{H,rg}$ del 77%.

Il sottosistema di distribuzione è costituito da una rete di distribuzione a due tubi in ferro senza coibentazione posati a vista all'interno del volume riscaldato e risulta essere caratterizzato da un rendimento $h_{H,du}$ pari a 93%.

Il generatore di calore è costituito da caldaia a basamento in ghisa di potenza utile nominale pari a 258 kW (anno di Installazione 1995), alimentata a gas metano, presenta un rendimento rispetto all'energia utile $h_{H,gen,ut}$, all'energia primaria non rinnovabile $h_{H,gen,p,n-ren}$ e primaria totale $h_{H,gen,p,tot}$ pari rispettivamente a 86,9%, 86,3% e 86,2%.

I rendimenti globali medi stagionali rispetto all'energia primaria non rinnovabile $h_{H,gl,p,n-ren}$ e all'energia primaria totale $h_{H,gl,p,tot}$ si attestano entrambi attorno al 54% .

A valle dell'analisi energetica condotta sullo stato di fatto, i risultati hanno evidenziato un'elevata dipendenza energetica da fonti non rinnovabili, riscontrabile analizzando le quote rinnovabili e non rinnovabili che caratterizzano i fabbisogni energetici e gli indici di prestazione energetica riportati rispettivamente in figura 62 e 63.

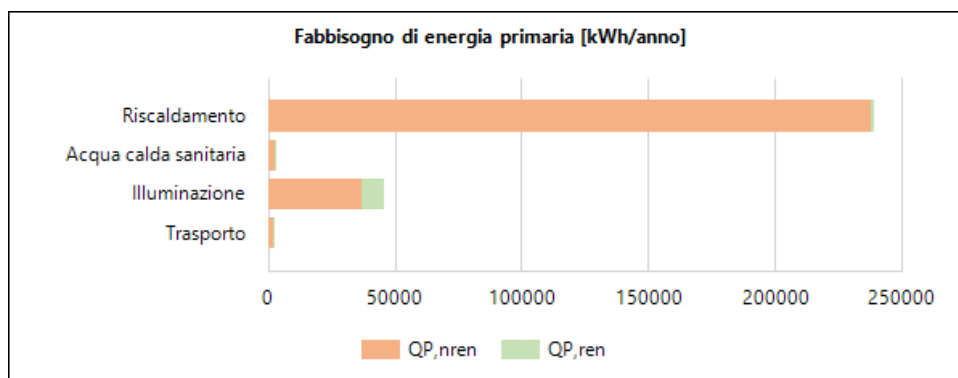


Figura 62 - Fabbisogni energia primaria _Stato di fatto

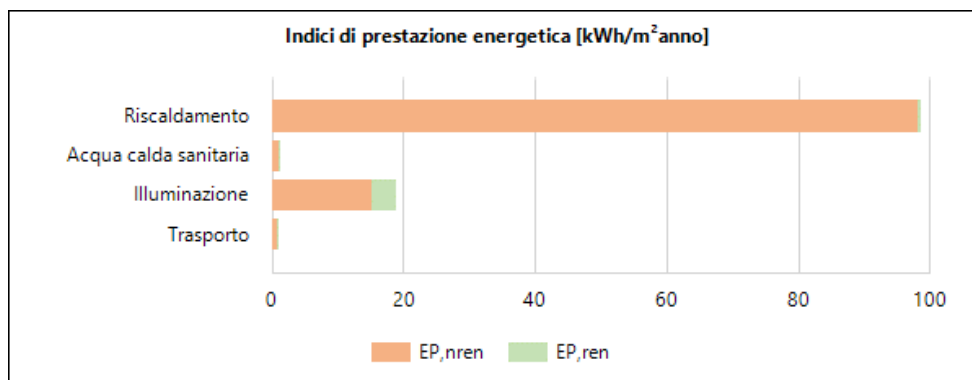


Figura 63 - Indici di prestazione energetica _Stato di fatto

Questa dipendenza da fonti non rinnovabile risulta avere delle ripercussioni sull'emissione di biossido di carbonio in atmosfera le quali, come riportato in tabella 55, si attestano a 57 tonnellate/anno.

Vettore energetico	Consumo	U.M.	CO ₂ [kg/anno]
Metano	22419	Nm ³ /anno	46796
Energia elettrica	23346	kWhel/anno	10739
		Totale	57535

Tabella 55 – Consumi ed emissioni CO₂_Stato di fatto

8.4 Intervento_1_isolamento copertura

La copertura presenta un'estensione di 1381 m² ed è correlata a circa il 23% delle totali dispersioni termiche dell'edificio, per tale motivazione è stato preso in considerazione l'intervento di efficienza energetica relativo all'isolamento termico dell'elemento.

L'intervento, come riportato in tabella 57, prevede la rimozione del lastricato solare esistente in "lastre di Corsi" tipica soluzione adottata nelle costruzioni del basso Salento, rimozione dello strato di allettamento, livellamento del massetto mediante massetto generico a sabbia umida, posizionamento di lastre isolanti con bordi di accoppiamento maschio-femmina, stesura di massetto con alleggerimento in argilla espansa, tufina di allettamento dallo spessore di 5 cm, riposizionamento delle lastre precedentemente rimosse, ipotizzando uno sfrido pari al 25%, e successiva sigillatura dei giunti mediante boiaccia di cemento attivata con additivo aggrappante e impermeabilizzante.

S_2_Copertura_Stato_di_Fatto					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mk]	Resistenza Termica [m ² k/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Calciare semiduro in Pietra di Corsi	40	1.40	0.029	2000	1.00
Sabbia secca (um. <1%)	100	0.60	0.167	1700	1.00
C.l.s.	50	0.94	0.053	1800	1.00
Membrana bituminosa	4	0.17	0.024	1200	0.92
Blocco da solaio	260	0.74	0.350	1146	0.84
Intonaco di calce e gesso	10	0.70	0.014	1400	1.00

Tabella 56 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi finestrati

S_2_Copertura_Post_Intervento					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mk]	Resistenza Termica [m ² k/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Calciare semiduro in Pietra di Corsi	40	1.40	0.029	2000	1.00
Polistirene espanso sinterizzato (EPS 100)	100	0,036	0,028	17	1,45
Sabbia secca (um. <1%)	100	0.60	0.167	1700	1.00
C.l.s.	50	0.94	0.053	1800	1.00
Membrana bituminosa	4	0.17	0.024	1200	0.92
Blocco da solaio	260	0.74	0.350	1146	0.84
Intonaco di calce e gesso	10	0.70	0.014	1400	1.00

Tabella 57 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi finestrati

Il costo dell'intervento è stato calcolato mediante computo metrico riportato in Appendice è ammonta a circa 180'000 €.

Come riportato in tabella 58 l'intervento considerato comporta una riduzione dei consumi relativi a vettori energetici di metano ed elettricità rispettivamente del 8.9% e 0.1%. L'intervento considerato risulta essere caratterizzato da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a 834 €/m² e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ pari a 107 kWh/m².

Intervento_1_Isolamento copertura		Variazione [%]
Metano [Nm ³]	20418	-8,9
Elettricità [kWh]	23330	-0,1
Costo globale [€/m ²]	834	+4,3
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	107	-6,9
Pay Back Period [anni]	-	

Tabella 58 - Caratterizzazione intervento 1

8.5 Intervento_2_sostituzione infissi

I componenti finestrati della struttura presentano una superficie complessiva di 388 m² e sono causa del 24% della totale dispersione termica dell'edificio. Gli elementi, come descritto nel capitolo dedicato, sono caratterizzati da telaio in alluminio senza taglio termico di trasmittanza U_f pari a 7 W/m²K e vetri singoli da 6 mm aventi trasmittanza U_g pari a 6 W/m²K.

Oltre ad essere energeticamente poco performanti, gli infissi installati presentano un particolare stato di degrado che in molti casi ne impossibilita il normale utilizzo, per queste ragioni si è optato per una rimozione e sostituzione degli infissi con elementi caratterizzati da telaio con profili da 70 mm in pvc a 5 camere cave, riportato in figura 64, con trasmittanza U_f pari a 2 W/m²K e doppio vetro contraddistinto da una trasmittanza U_g pari a 1,8 W/m²K e un fattore di trasmittanza solare $g_{gl,n}$ di 0.75.



Figura 65 - foto rappresentativa infissi _ Stato di fatto

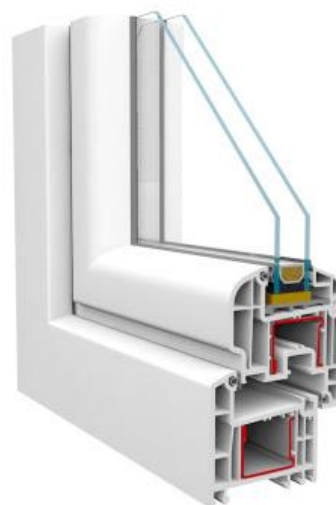


Figura 64 - Sezione profilo pvc_Post intervento

L'importo complessivo dell'intervento relativo alla rimozione dei serramenti esistenti e all'installazione dei nuovi componenti è stato calcolato mediante computo metrico riportato nell'apposita appendice e risulta ammontare a circa 153'000 €.

I consumi energetici annuali relativi ai vettori di energia elettrica e gas metano e i risultati dell'analisi in termini di costo globale e indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ sono riassunti in tabella 59.

Intervento_2_Sostituzione infissi		Variazione [%]
Metano [Nm ³]	17617	-11,2
Elettricità [kWh]	23258	-0,5
Costo globale [€ /m ²]	834	+3,9
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	94,5	-17,8
Pay Back Period [anni]	-	

Tabella 59 - Caratterizzazione intervento 2

L'intervento considerato risulta essere caratterizzato da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a 834 €/m² e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ pari a 94,5 kWh/m²

8.6 Intervento_3_isolamento pareti perimetrali esterne

Come precedentemente descritto nel capitolo dedicato alla caratterizzazione dell'involucro opaco verticale, la muratura che delimita gli ambienti riscaldati dall'esterno è costituita dai muri M1 la cui stratigrafia viene riportata in tabella 60, l'elemento verticale risulta estendersi per una superficie complessiva di circa 1800 m² ed essere associato al 19 % delle totali dispersioni per trasmissione.

M_1_Stato_di_fatto					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mk]	Resistenza Termica [m ² k/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco forato	370	0.349	1.060	670	0.84
Intonaco di calce e cemento	20	0.9	0.22	1800	1.00

Tabella 60 - Stratigrafia muratura M1_Stato di fatto

Per tali motivazioni tra le varie misure di efficienza energetica considerate è stato inserito l'isolamento delle pareti perimetrali esterne. Tale soluzione, la cui stratigrafia è riportata in tabella 61, prevede un isolamento esterno dei muri di tipo M1 mediante lastre isolanti in fibra di canapa dallo spessore di 10 cm.

M_1_Post_Intervento					
Descrizione (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [mm]	Conduttività [W/mk]	Resistenza Termica [m ² k/W]	Massa Volumica [kg/m ³]	Capacità Termica Specifica [kJ/kgK]
Intonaco di calce e gesso	10	0.7	0.014	1400	1.00
Blocco forato	370	0.349	1.060	670	0.84
Fibra di canapa-kenaf	100	0,04	2,000	30	2.00
Intonaco di calce e cemento	20	0.9	0.22	1800	1.00

Tabella 61 - Stratigrafia muratura M1_Post intervento

Il costo dell'intervento è stato calcolato mediante computo metrico riportato nell'apposita appendice è ammonta a circa 221'000 €.

I consumi energetici annuali relativi ai vettori di energia elettrica e gas metano e i risultati dell'analisi in termini di costo globale e indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ sono riassunti in tabella .

Intervento_3_Isolamento pareti perimetrali		Variazione [%]
Metano [Nm ³]	19905	-11,2
Elettricità [kWhe]	23233	-0,4
Costo globale [€/m ²]	834	+7,1
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	106,2	-7,8
Pay Back Period [anni]	-	

Tabella 62 - Caratterizzazione intervento 3

L'intervento considerato, come riportato in tabella 62, risulta essere caratterizzato da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a 834 €/m² e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ a 106 kWh/m²

8.7 Intervento_4_sostituzione generatore

Per quanto concerne i singoli interventi di sostituzione dell'esistente generatore di calore per il servizio di riscaldamento sono state condotte le analisi dei costi considerando le due opzioni riportate di seguito.

8.7.1 Intervento_4a_sostituzione generatore

Il primo intervento considerato consiste della sostituzione del generatore di calore esistente costituito da una caldaia a basamento in acciaio di potenza nominale pari a 258 kW con due caldaie a condensazione modulari di potenza utile pari a 90 kW cadauna. E' contestuale il rifacimento della centrale termica e l'installazione di dispositivi di regolazione della temperatura ambiente con valvole termostatiche.

Il costo complessivo dell'intervento è stato ottenuto mediante consultazione del "Listino Prezzi Regione Puglia 2023" e "Prezziario Dei" e ammonta a circa 43.000 €. I costi di manutenzione ed il ciclo di vita del componente, determinati in accordo con i valori indicati nella norma EN 15459-1:2017.

Intervento_4a_Sostituzione del generatore di calore con caldaia a condensazione		Variazione [%]
Metano [Nm ³]	15343	-31,5
Elettricità [kWh]	24282	+4,0
Costo globale [€/m ²]	647	-19,1
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	85,55	-25,6
Pay Back Period [anni]	4	

Tabella 63 - Caratterizzazione intervento 4a

L'intervento considerato, come riportato in tabella 63, risulta essere caratterizzato da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a 647 €/m² e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ pari a 85.55 kWh/m².

Come è possibile notare dall'andamento dei flussi di cassa cumulati riportato in figura 66 il tempo di ritorno dell'investimento è pari a 4 anni.

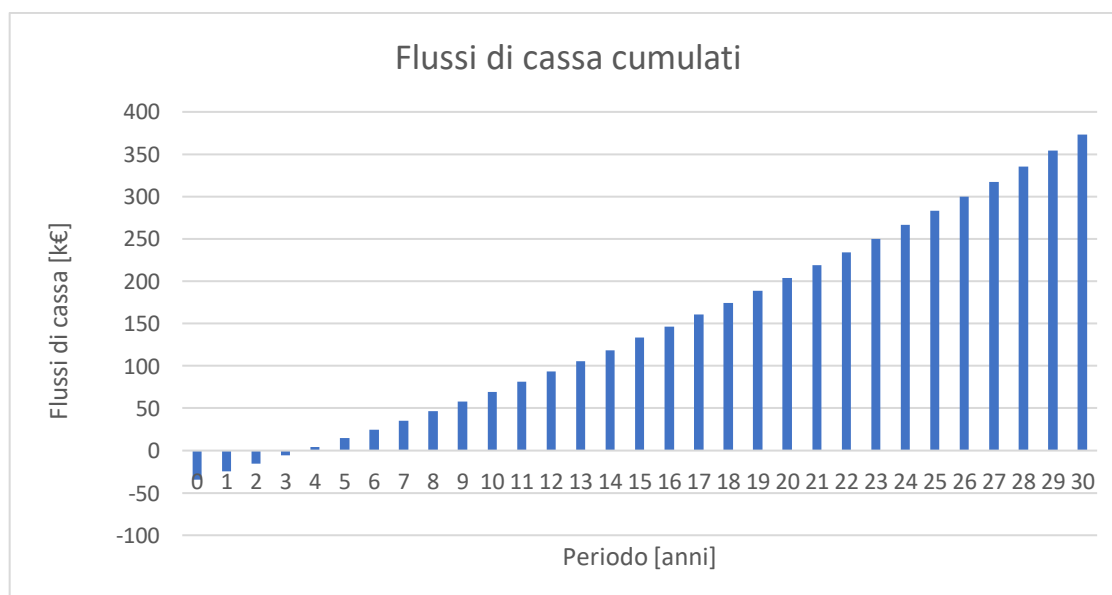


Figura 66 - Andamento flussi di cassa cumulati _intervento 4°

8.7.2 Intervento_4b_sostituzione generatore

Per poter diminuire la dipendenza dell'edificio da fonti non rinnovabili è stato considerato una seconda ipotesi di intervento di sostituzione dell'esistente generatore di calore relativo al servizio di riscaldamento costituito da una caldaia a basamento a metano.

La scelta sulla tipologia di impianto è ricaduta su una pompa di calore elettrica aria-acqua integrata con due caldaie a condensazione per aumentarne l'efficienza alle basse temperature dell'aria esterna. Tale intervento di sostituzione del generatore è valutato assieme al rifacimento della centrale termica e all'installazione sui terminali di emissione di sistemi di regolazione costituiti di valvole termostatiche.

Il punto di partenza per un corretto dimensionamento dei due generatori è stato quello di avvalersi del rilievo dei corpi scaldanti per calcolare le potenze relative ai terminali di emissione.

Poiché le pompe di calore lavorano con temperature di mandata più basse rispetto ai sistemi a caldaia tradizionali è stato condotto un calcolo accurato della potenza emessa dai corpi scaldanti esistenti in funzione della temperatura di mandata relativa al fluido termovettore.

Si è proceduto dunque analizzando le dispersioni di progetto associate a ciascun locale dell'edificio e le relative emissioni dei corpi scaldanti. Le dispersioni di progetto associate all'intero complesso risultano essere pari a 180 kW.

Il sistema di generazione è costituito da due generatori che lavorano in modo alternato in funzione della temperatura dell'aria esterna costituiti da una pompa di calore elettrica aria-acqua da 60 kW e due caldaie a condensazione da 90 kW ciascuna riportate rispettivamente in figura 68 e 67.



Figura 68 - pompa di calore Jodo airp-hp



Figura 67 - Caldaie a condensazione Baltur

La pompa di calore sarà attiva quando la temperatura dell'aria esterna è superiore alla temperatura bivalente fissata a 12 °C esterni, in funzione della centralina climatica, mediante troncamento a tale valore della temperatura di cut-off minima, per temperature inferiori a 12°C entreranno in funzione le due caldaie a condensazione.

Per poter avere una misura dell'efficacia relativa all'installazione della pompa di calore elettrica aria-acqua è stata calcolata la potenza emessa dai corpi scaldanti dell'edificio per una temperatura di mandata e di ritorno pari rispettivamente a 50 °C e 40°C, ossia per un delta termico aria –acqua di 25°C.

L'intervento, come riportato in tabella 64, considerato risulta essere caratterizzato da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a 693 €/m² e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ pari a circa 73 kWh/m².

Intervento_4b_Sostituzione del generatore di calore con pompa di calore e caldaia ad integrazione		Variazione [%]
Metano [Nm ³]	10017	-55,3
Elettricità [kWh/e]	38011	+62,8
Costo globale [€/m ²]	693	-13,4
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	73,7	-35,9
Pay Back Period [anni]	8	

Tabella 64 - Caratterizzazione intervento 4b

Come è possibile notare dall'andamento dei flussi di cassa cumulati riportato in figura 69 il tempo di ritorno dell'investimento risulta essere pari a 8 anni.

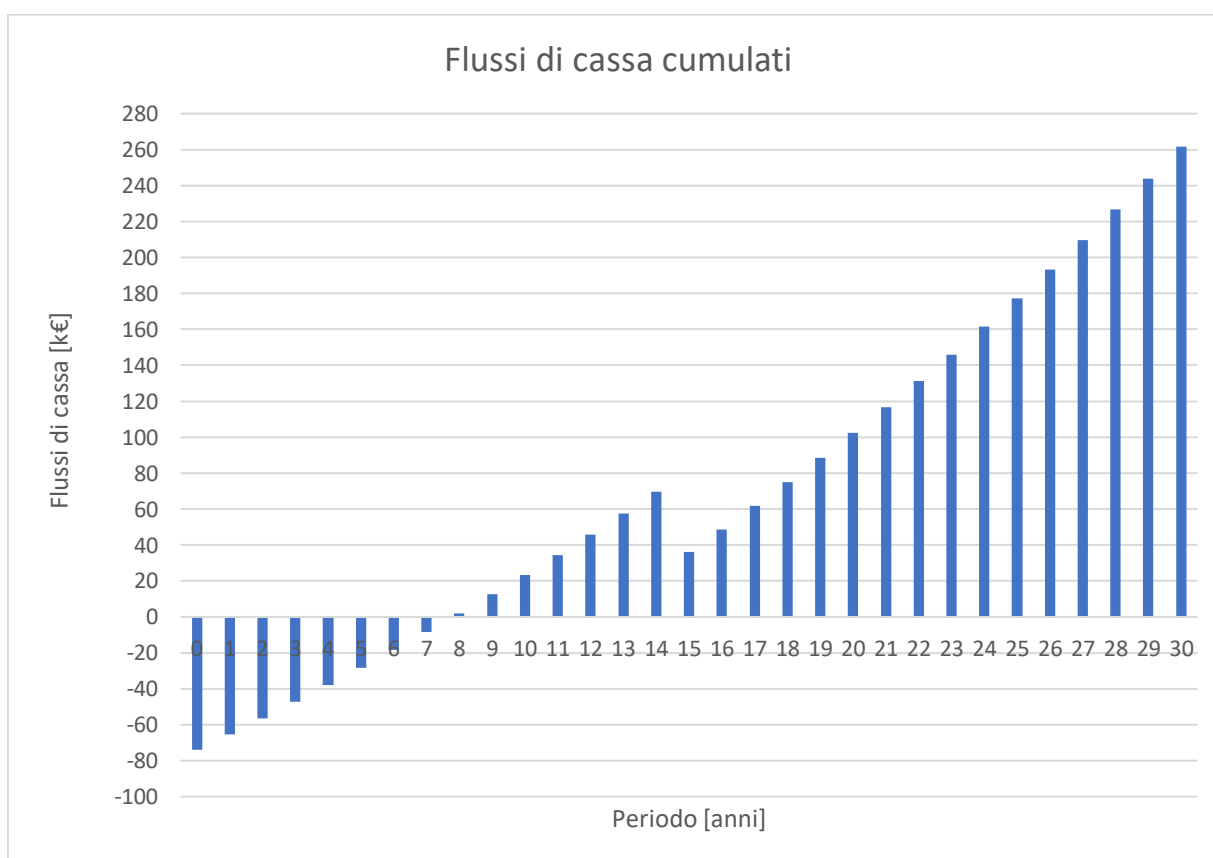


Figura 69 - Andamento flussi di cassa cumulati _intervento 4b

8.8 Intervento_5_Installazione impianto fotovoltaico

In questo scenario viene considerata l'intervento di installazione di un impianto fotovoltaico. L'impianto è caratterizzato da una potenza di picco (W_p) pari a 20 kW e risulta essere costituito da 56 pannelli fotovoltaici di tipo monocristallino di potenza pari a 350 W cadauno, modello "ATAG Italia srl/FV/FV" aventi una superficie utile di $1,58\text{ m}^2$ per modulo.

L'installazione dell'impianto è prevista sulla copertura del fabbricato avente superficie calpestabile pari a circa 1330 m^2 (luogo moderatamente ventilato), a debita distanza dall'unica possibile fonte di ombreggiamento costituita dal parapetto in muratura, con esposizione a sud e inclinazione di 20° sul piano orizzontale.

Il costo di installazione dell'impianto ammonta a $36'000\text{ €}$.

Intervento_5_Installazione impianto fotovoltaico		Variazione [%]
Metano [Nm^3]	22419	0
Elettricità [kWhe]	6744	-71,1
Costo globale [$\text{€}/\text{m}^2$]	714	-10,7
EP _{gl,nren} [kWh/m^2]	106	-7,8
Pay Back Period [anni]	6	

Tabella 65 - Caratterizzazione intervento 5

L'intervento considerato, come riportato in tabella 65, risulta essere caratterizzato da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a $714\text{ €}/\text{m}^2$ e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ di $106\text{ kWh}/\text{m}^2$.

Come è possibile notare dall'andamento dei flussi di cassa cumulati riportato in figura 70 il tempo di ritorno dell'investimento è pari a 6 anni.

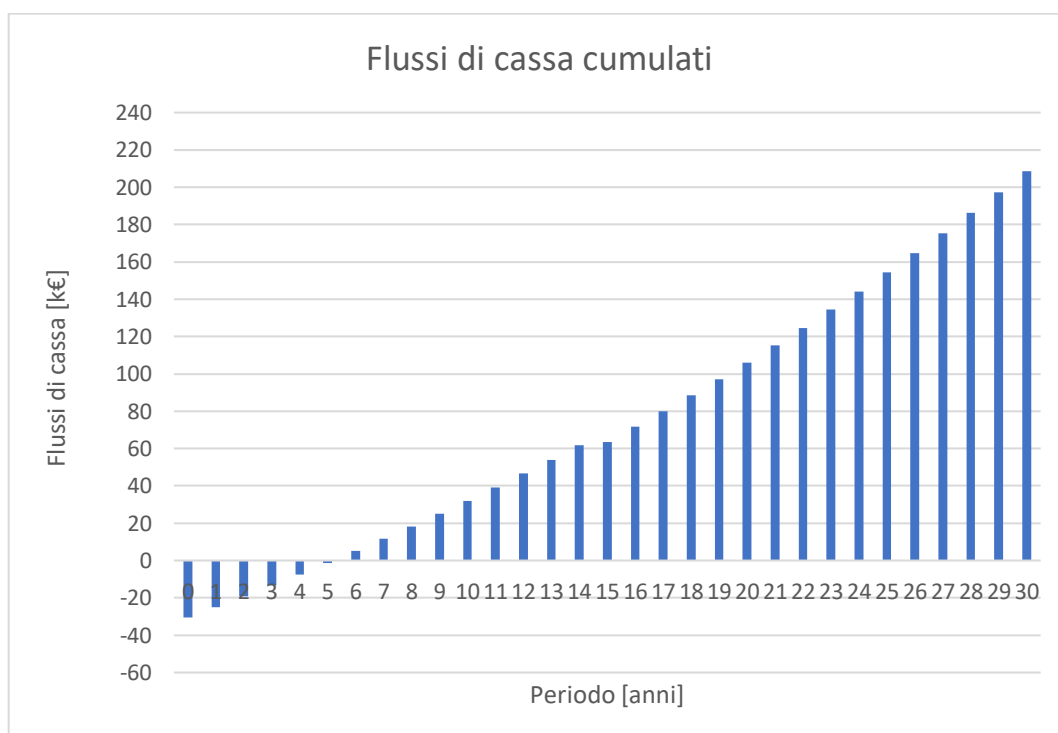


Figura 70 - Andamento flussi di cassa cumulati_intervento 4a

8.9 Intervento_6_Installazione impianto solare termico

In questo intervento si prevede la sola installazione di un impianto solare termico a servizio esclusivo del sistema di produzione di acqua calda sanitaria.

L'intervento prevede l'installazione di impianto solare termico costituito da due pannelli collettori piani vetrati a circolazione naturale (Costruttore "ATAG" Modello "SOLDFP10T") e serbatoi d'accumulo da 300 l, di seguito si riporta in figura 71 la caratterizzazione dell'impianto.

Orientamento rispetto al Sud Inclinazione rispetto al piano orizzontale

Y ° β °

Ombreggiamento: - (nessuno)

Coefficiente di riflettanza (albedo): Superficie disponibile: m²

Valori mensili:

Dati collettore solare

Collettore solare utilizzato (*): ATAG Italia srl/SOLDFP/SOLDFP10T

Numero dei collettori solari: Superficie apertura singolo collettore (*): m²

Superficie lorda singolo collettore (*): m²

Caratteristiche: Note da costruttore o misurate

Coefficiente di perdita lineare (*): a1 W/m²K Rendimento a perdite nulle (*): η0

Coefficiente di perdita quadratico (*): a2 W/m²K² Coefficiente angolo di incidenza (*): IAM

Figura 71 - Caratterizzazione impianto solare termico

Il costo di installazione complessivo dell'intervento ammonta a 5'000 €, ed in tabella 66 è possibile notare che, dato il basso fabbisogno energetico correlato all'utilizzo di acqua calda sanitaria che caratterizza l'edificio scolastico considerato, l'intervento risulta avere un impatto sui consumi elettrici e sull'indice di prestazione globale non rinnovabile poco rilevante.

Intervento_6_Installazione impianto solare termico		Variazione [%]
Metano [Nm ³]	22419	0
Elettricità [kWh]	22220	-4,8
Costo globale [€/m ²]	799,8	0
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	114,3	-0,9
Pay Back Period [anni]	-	

Tabella 66 - Caratterizzazione intervento 6

L'intervento considerato risulta essere caratterizzato da un costo globale normalizzato rispetto alla superficie utile pari a 799 €/m² e da un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile EP_{gl,nren} pari a 114,3 kWh/m².

8.10 Scenari collettivi

Dopo aver trattato ed analizzato separatamente i singoli interventi di efficienza energetica e valutato il singolo impatto in termini di consumi energetici, costo globale, tempo di ritorno e indice di prestazione globale non rinnovabile, si è proceduto combinando i singoli interventi tra di loro, creando degli scenari di intervento collettivi in accordo con le tipologie di intervento previste dal Decreto Ministeriale Requisiti Minimi DM 26 Giugno 2015, nel quale, come riportato in figura 72, vengo classificati in:

- Riqualficazione energetica: intervento sull'involucro disperdente per un'area minore del 25% della totale superficie disperdente dell'edificio e può contemplare anche la sostituzione degli impianti;
- Ristrutturazione importante di secondo livello: intervento sull'involucro disperdente per un'area compresa tra il 25% e 50% della totale superficie disperdente dell'edificio con o senza interventi sull'impianto, mentre per interventi riguardanti più del 50% della totale superficie disperdente;
- Ristrutturazione importante di primo livello: interventi su più del 50% della totale superficie disperdente del fabbricato e anche sugli impianti.

DM Requisiti Minimi

	Superficie disp > 50%	Superficie disp > 25%	Superficie disp < 25%
Cambio IMPIANTO? Sì	Primo Livello	Secondo Livello	Riqualficazione involucro
Cambio IMPIANTO? No	Secondo Livello	Secondo Livello	Riqualficazione involucro

Figura 72 - Classificazione interventi secondo DM 26 Giugno 2015

Al fine di rendere più chiara la visualizzazione degli scenari collettivi considerati si riporta in tabella 67 un'apposita legenda riepilogativa dei singoli interventi considerati:

INTERVENTO	DESCRIZIONE
1	Isolamento copertura
2	Sostituzione infissi
3	Isolamento muratura esterna
4a	Sostituzione dell'esistente generatore con due caldaie a condensazione da 90 kW cad.
4b	Sostituzione dell'esistente generatore con una pompa di calore elettrica aria-acqua da 60 kW e due caldaie a condensazione da 90 kW cad.
5	Installazione impianto fotovoltaico
6	Installazione impianto solare termico

Tabella 67 - Legenda interventi singoli

Di seguito sono riportate gli scenari collettivi considerati raggruppati rispettivamente in interventi di riqualificazione energetica, ristrutturazione importante di primo e ristrutturazione importante di secondo livello rispettivamente nelle tabelle 68,70 e 69.

	SCENARI	INTERVENTI CONSIDERATI
Riqualificazione Energetica	RiqA	2
	RiqB	4a
	Riq3	4b
	Riq4	5
	Riq5	6
	Riq6	2+4a
	Riq7	2+4b

Tabella 68 - Interventi Riqualificazione Energetica

	SCENARI	INTERVENTI CONSIDERATI
Ristrutturazione Importante di Secondo Livello	II_A	1+2
	II_B	1+2+3
	II_C	1+2+4a
	II_D	1+2+4b
	II_E	1+2+4a+5
	II_F	1+2+4b+5

Tabella 69 - - Interventi di Ristrutturazione Importante di Secondo Livello

	SCENARI	INTERVENTI CONSIDERATI
Ristrutturazione Importante di Primo Livello	I_A	1+2+3+4+5+6

Tabella 70 - Interventi di Ristrutturazione Importante di Primo Livello

8.11 Risultati analisi dei costi

Nel presente paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti mediante analisi dei costi relativa ai singoli interventi e agli scenari collettivi considerati.

Di seguito si riportano in tabella 71,72 e 73 i risultati relativi rispettivamente agli scenari di riqualificazione energetica e ristrutturazione importante di secondo e primo livello in termini di costo globale e indice di prestazione energetica globale non rinnovabile.

	SCENARI	INTERVENTI CONSIDERATI	Costo globale [€/m ²]	EP _{gl,nren} [kWh/m ²]
Riqualificazione Energetica	Riq_A	2	834	107,0
	Riq_B	4a	647	85,5
	Riq_C	4b	693	73,7
	Riq_D	5	714	106,0
	Riq_E	6	799	114,0
	Riq_F	2+4a	724	72,0
	Riq7_G	2+4b	706	57,9

Tabella 71 – Costo globale normalizzato e indici di prestazione energetica globale non rinnovabile-interventi di riqualificazione energetica

	SCENARI	INTERVENTI CONSIDERATI	Costo globale [€/m ²]	EP _{gl,nren} [kWh/m ²]
Ristrutturazione Importante di Secondo Livello	II_A	1+2	862	85,2
	II_B	1+2+3	884	68,88
	II_C	1+2+4a	724	57,01
	II_D	1+2+4b	704	47,63
	II_E	1+2+4a+5	748	43
	II_F	1+2+4b+5	637	33,61

Tabella 72 - Costo globale normalizzato e indici di prestazione energetica globale non rinnovabile-interventi di ristrutturazione importante di secondo livello

	SCENARI	INTERVENTI CONSIDERATI	Costo globale [€/m ²]	EP _{gl,nren} [kWh/m ²]
Ristrutturazione Importante di Primo Livello	I_A	1+2+3+4+5+6	706	24,32

Tabella 73 - Costo globale normalizzato e indici di prestazione energetica globale non rinnovabile-interventi di ristrutturazione importante di secondo livello

Per avere una visione di insieme dei diversi scenari di intervento considerati e per facilitare l'interpretazione dei risultati ottenuti a valle dell'analisi dei costi è utile fare ricorso ad una presentazione grafica dei risultati. Infatti in figura 73 viene riportato un grafico avente lungo l'asse delle ascisse l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile e lungo l'asse delle ordinate il costo globale normalizzato. Innanzi tutto è possibile dividere la totalità degli scenari considerati in due macro categorie in funzione della convenienza economica o meno degli interventi. La retta tratteggiata orizzontale di colore rosso riportata in figura 58, passante per il punto del grafico rappresentativo dello stato di fatto, intercetta l'asse delle ordinate nel valore pari a 800 €/m^2 e costituisce la linea di demarcazione tra interventi ritenuti economicamente convenienti e non convenienti.

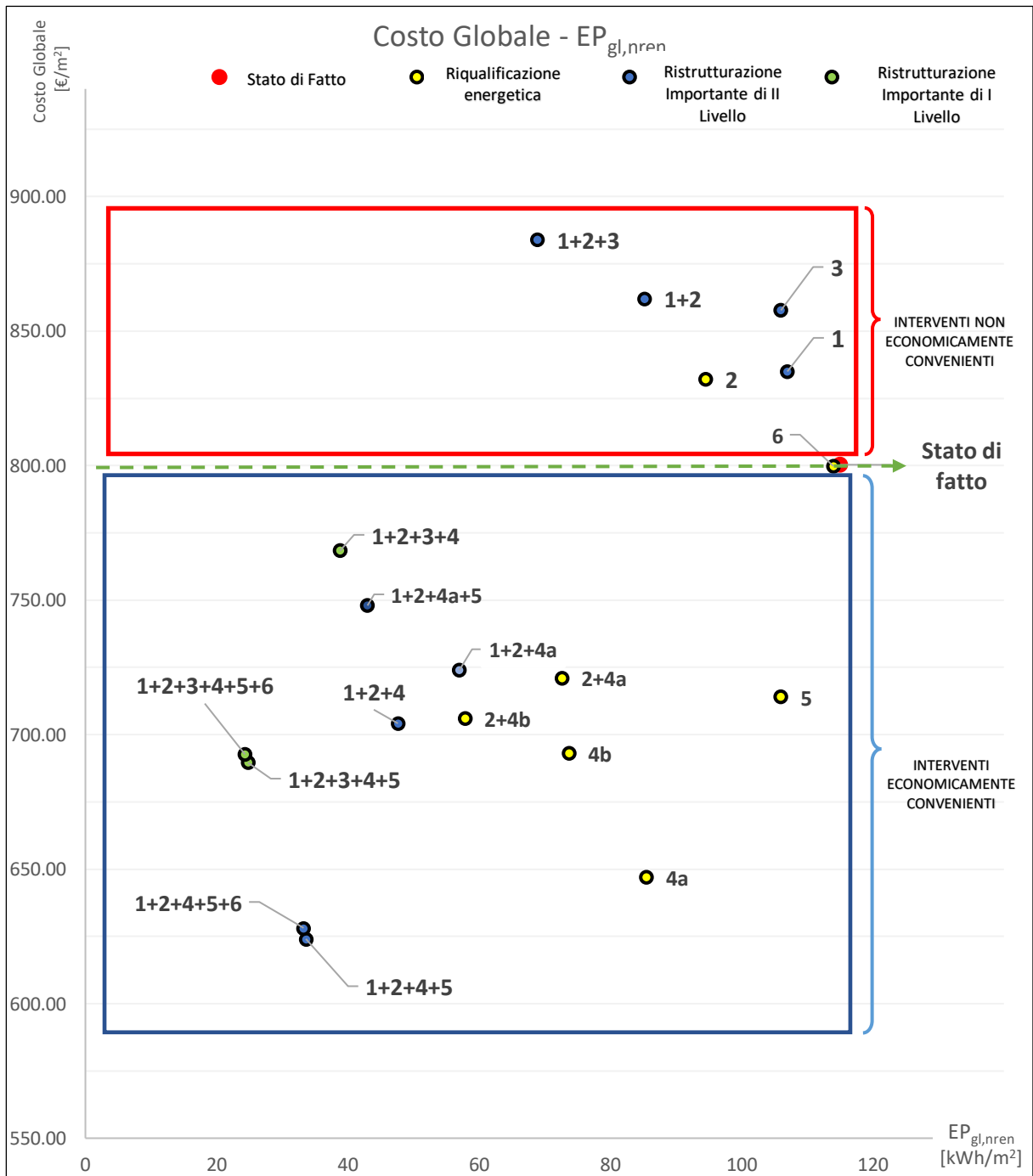


Figura 73 - Interventi economicamente convenienti e non convenienti

Un'ulteriore informazione ricavabile per via grafica è rappresentata dalla funzione in arancione riportata in figura 74, tale funzione viene definita “*Pareto Front*” e rappresenta per ogni valore di indice di prestazione energetica globale non rinnovabile il relativo minimo valore di costo globale normalizzato raggiungibile.

Soffermandoci sull'andamento delineato dalla curva di *pareto front* è possibile notare come questa presenti un punto di minimo che costituisce l'intervento economicamente più conveniente. Per tale punto dunque la funzione presenta un cambio di pendenza, infatti, per valori di $EP_{gl,nren}$ inferiori al valore corrispondente al minimo della funzione, l'andamento della *pareto front* presenta un'elevata pendenza. Questo a dimostrazione del fatto che il minimo costituisce il punto di optimum ossia il punto oltre il quale un ulteriore incremento del costo globale dell'intervento non è correlato ad un proporzionale incremento della performance energetica dell'edificio.

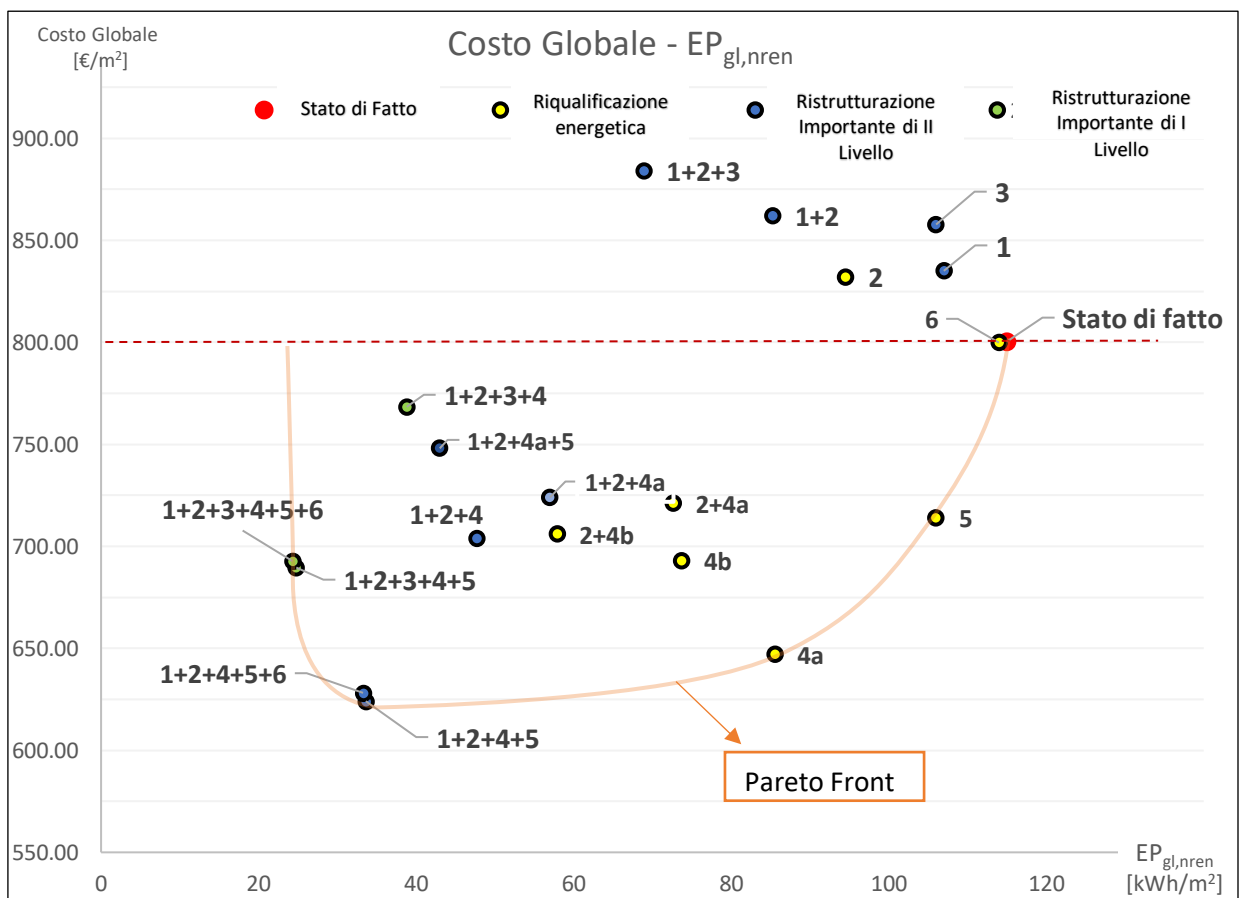


Figura 74 - Individuazione *pareto front* analisi dei costi

La scelta finale è stata condotta sulla base dei seguenti parametri:

- tempo di ritorno dell'intervento T_R [anni];
- costo globale normalizzato GC [€/m²];
- indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ [kWh/m²] ;
- emissioni CO_2 [kg/(anno m²)] ;

Tra i diversi scenari derivanti dalla mutua combinazione dei singoli interventi la scelta è ricaduta sull'intervento di ristrutturazione importante di secondo livello denominato (1+2+4+5) comprendente l'isolamento dell'elemento di copertura, la rimozione e la sostituzione degli infissi, la sostituzione del generatore esistente con una pompa di calore aria acqua ad integrazione con due caldaie a condensazione e l'installazione di un impianto fotovoltaico.

Dal punto di vista dei consumi il modello energetico relativo allo scenario selezionato, come riportato in tabella 74, è associato ad una riduzione dei consumi relativa ad entrambi i vettori energetici.

consumi		Variazione [%]
metano	3230	-86
elettricità	13542	-42

Tabella 74 - Consumi energetici scenario selezionato

Infatti per quanto concerne il consumo di metano questo è drasticamente ridotto in misura dell'85,6%, passando da circa 21000 *smc* a 3230 *smc* di consumo annuo.

Anche il consumo di energia elettrica relativo all'intervento selezionato, sebbene lo scenario preveda l'utilizzo di una pompa di calore aria- acqua di tipo elettrico, risulta ridotto rispetto allo stato di fatto del 42 % passando da 22500 a 13542 *kWhel*.

Queste riduzioni nei consumi e nella dipendenza energetica dell'edificio da fonti di origine non rinnovabile comportano una riduzione rispetto allo stato di fatto dei fabbisogni energetici di energia primaria e quindi degli indici di prestazione energetica come riportano le tabelle 75 e 76.

Fabbisogni energia primaria						
Servizio	Stato di fatto			Scenario selezionato		
	Qp,nren [kWh]	Qp,ren [kWh]	Qp,tot [kWh]	Qp,nren [kWh]	Qp,ren [kWh]	Qp,tot [kWh]
Riscaldamento	238254	1030	239283	66884	37600	104484
Acqua calda sanitaria	2490	600	3091	789	1063	1852
Illuminazione	36770	8862	45632	13210	15266	28476
Trasporto	1993	480	2473	632	850	1482
Globale	279507	10973	290479	81515	54779	136294

Tabella 75 - Fabbisogni energia primaria stato di fatto e post intervento

Indici prestazione energetica						
Servizio	Stato di fatto			Scenario selezionato		
	EPnren [kWh/m ²]	EPren [kWh/m ²]	EPtot [kWh/m ²]	EPnren [kWh/m ²]	EPren [kWh/m ²]	EPtot [kWh/m ²]
Riscaldamento	98,24	0,42	98,66	27,58	15,50	43,08
Acqua calda sanitaria	1,03	0,25	1,27	0,33	0,44	0,76
Illuminazione	15,16	3,65	18,81	5,45	6,29	11,74
Trasporto	0,82	0,20	1,02	0,26	0,35	0,61
Globale	115,24	4,52	119,77	33,61	22,59	56,20

Tabella 76 – Indici di prestazione energetica stato di fatto e post intervento

Dal punto di vista dell'impatto ambientale, per quanto concerne le emissioni in atmosfera relative biossido di carbonio, riportate in tabella 77, la riduzione totale si attesta al 69%, passando da circa 57'000 a circa 17'000 *kg/anno*. La ripartizione delle emissioni di *CO₂* tra i servizi energetici di riscaldamento, acqua calda sanitaria, illuminazione e trasporto relative allo scenario selezionato è riportata in figura 75.

Vettore energetico	Emissioni di CO ₂ [kg/anno]		
	Stato di fatto	Scenario selezionato	Variazione [%]
Metano	46796	9319	-80
Energia elettrica	10739	8237	-23
Totale	57535	17556	-69

Tabella 77 - Emissioni CO₂ stato di fatto e post intervento

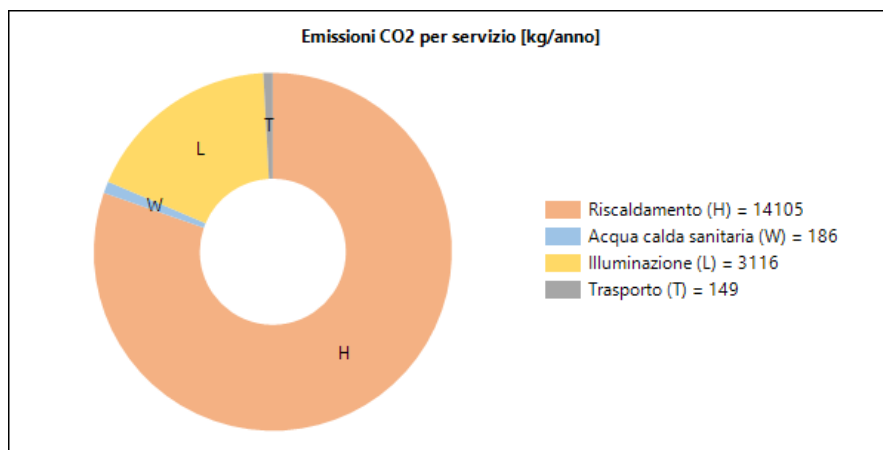


Figura 75 - Ripartizione emissioni di CO₂ tra i diversi servizi energetici

Dal punto di vista economico l'intervento prevede un costo iniziale di 430'000 € e, come si evince dall'andamento dei flussi di cassa cumulati riportato in figura 76, risulta essere caratterizzato da un tempo di rientro pari a 14 anni.

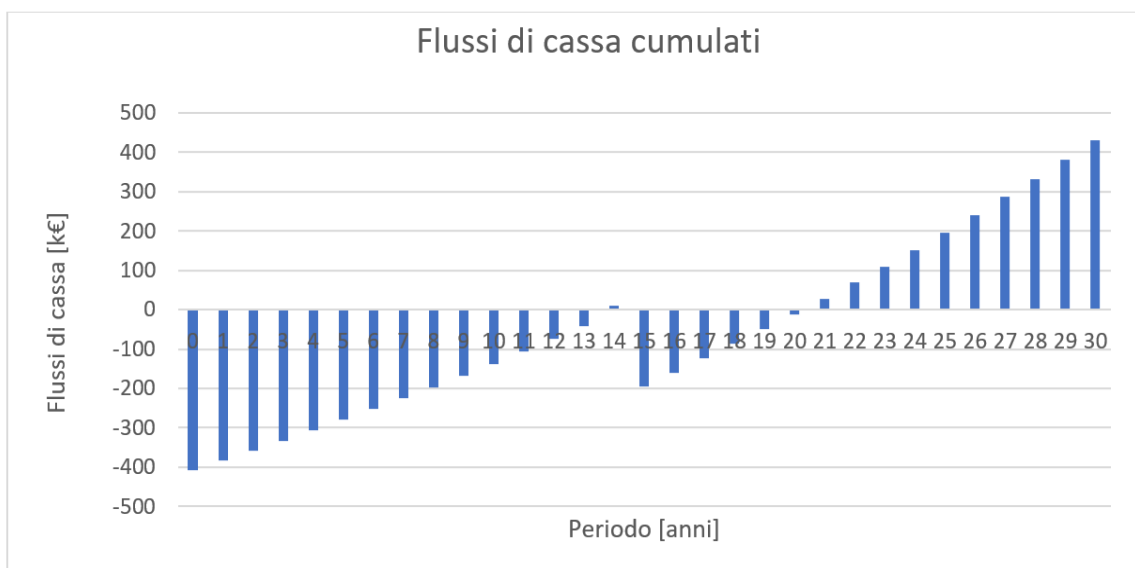


Figura 76 - Flussi di cassa cumulati scenario selezionato

Di seguito si riporta in tabella 78 un quadro riepilogativo e riassuntivo degli interventi di efficienza energetica considerati, mentre in figura 77 e tabella 79 si riportano i principali risultati derivanti dell'analisi dei costi condotta sull'edificio in esame.

INTERVENTO	DESCRIZIONE
1	Isolamento copertura
2	Sostituzione infissi
3	Isolamento muratura esterna
4a	Sostituzione dell'esistente generatore con due caldaie a condensazione da 90 kW
4b	Sostituzione dell'esistente generatore con una pompa di calore elettrica aria-acqua da 60 kW e due caldaie a condensazione da 90 Kw cadauna
5	Installazione impianto fotovoltaico
6	Installazione impianto solare termico

Tabella 78 – Leggenda riepilogativa interventi di efficienza energetica

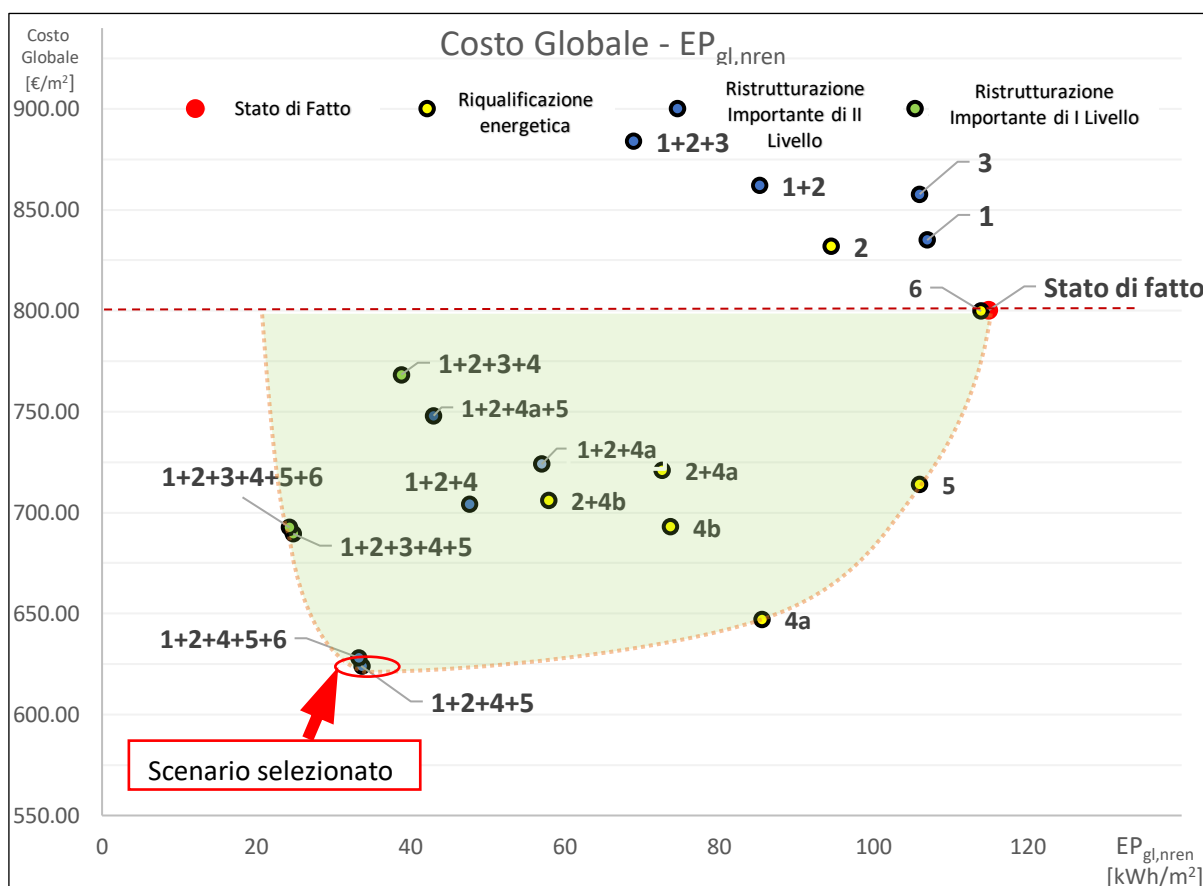



Figura 77 - Scenario selezionato analisi dei costi

	Scenario selezionato	Stato di fatto	Variazione [%]
Costo globale [€ /m²]	624	800	-22%
EPgl,nren [kWh/m²]	33,6	115	-70%
Pay Back Period [anni]	14		
Net Present Value [€ /m²]	179		

Tabella 79 - Risultati analisi economica intervento selezionato


9 Risultati valutazione energetica standard (*standard energy performance assessment*)

9.1 Attestato di prestazione energetica stato di fatto



ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

CODICE IDENTIFICATIVO: VALIDO FINO AL: 27/04/2033



DATI GENERALI

Destinazione d'uso

Residenziale

Non residenziale

Classificazione D.P.R. 412/93:

Oggetto dell'attestato

Intero edificio

Unità immobiliare

Gruppo di unità immobiliari

Numero di unità immobiliari di cui è composto l'edificio:

Nuova costruzione

Passaggio di proprietà

Locazione

Ristrutturazione importante

Riqualificazione energetica

Altro:

Dati identificativi

Regione :

Comune :

Indirizzo :

Piano :

Interno :

Coord. GIS : N E

Zona climatica :

Anno di costruzione :

Superficie utile riscaldata (m²) :

Superficie utile raffrescata (m²) :

Volume lordo riscaldato (m³) :

Volume lordo raffrescato (m³) :

Comune catastale	L383			Sezione		Foglio		Particella	
Subalterni	da		a	da		a	da		a
Altri subalterni									

Servizi energetici presenti

Climatizzazione invernale

Climatizzazione estiva

Ventilazione meccanica

Prod. acqua calda sanitaria









Illuminazione

Trasporto di persone o cose

PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

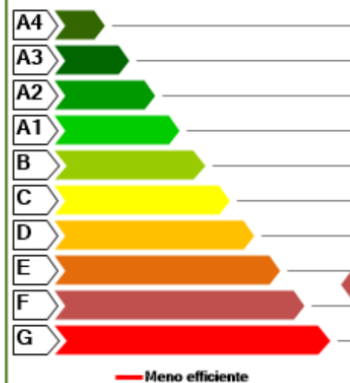
La sezione riporta l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile in funzione del fabbricato e dei servizi energetici presenti nonché la prestazione energetica del fabbricato, al netto del rendimento degli impianti presenti.

Prestazione energetica del fabbricato

INVERNO	ESTATE
	
  	  

Prestazione energetica globale

+ Più efficiente



- Meno efficiente

EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO

CLASSE ENERGETICA

F

156,43 kWh/m²anno

Riferimenti

Gli immobili simili avrebbero in media la seguente classificazione:

Se nuovi:


B (53,14)

Se esistenti:

-


Figura 78 - Attestato di Prestazione Energetica Stato di fatto

9.2 Attestato di prestazione energetica post-intervento



ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

CODICE IDENTIFICATIVO: VALIDO FINO AL: 15/06/2033



DATI GENERALI

Destinazione d'uso

Residenziale

Non residenziale

Classificazione D.P.R. 412/93:

Oggetto dell'attestato

Intero edificio

Unità immobiliare

Gruppo di unità immobiliari

Numero di unità immobiliari di cui è composto l'edificio:

Nuova costruzione

Passaggio di proprietà

Locazione

Ristrutturazione importante

Riqualificazione energetica

Altro:

Dati identificativi

Regione :

Comune :

Indirizzo :

Piano :

Interno :

Coord. GIS : N E

Zona climatica :

Anno di costruzione :

Superficie utile riscaldata (m²) :

Superficie utile raffrescata (m²) :

Volume lordo riscaldato (m³) :

Volume lordo raffrescato (m³) :

FOTO EDIFICIO

Comune catastale				<input type="text" value="L383"/>				Sezione				Foglio				Particella				
Subalterni	da		a		da		a		da		a		da		a		da		a	
Altri subalterni																				

Servizi energetici presenti

Climatizzazione invernale

Climatizzazione estiva

Ventilazione meccanica

Prod. acqua calda sanitaria









Illuminazione

Trasporto di persone o cose

PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

La sezione riporta l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile in funzione del fabbricato e dei servizi energetici presenti nonché la prestazione energetica del fabbricato, al netto del rendimento degli impianti presenti.

Prestazione energetica del fabbricato

INVERNO	ESTATE
	
  	  

Prestazione energetica globale

+ Più efficiente

A4

A3

A2

A1

B

C

D

E

F

G

- Meno efficiente

EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO

CLASSE ENERGETICA

A1

42,64 kWh/m²anno

Riferimenti

Gli immobili simili avrebbero in media la seguente classificazione:

Se nuovi:

A2 (34,44)

Se esistenti:

-

Figura 79 – Attestato di prestazione energetica_Post intervento

10 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è proposto l'obiettivo di redigere una diagnosi energetica utilizzando il metodo di calcolo orario proposto dalla norma UNI EN ISO 52016 rivolta ad un edificio pubblico di tipo scolastico e finalizzata alla pianificazione degli interventi di efficienza energetica mediante analisi costi-benefici dei singoli interventi e degli scenari collettivi risultanti dalla loro combinazione in modo tale da selezionare lo scenario di intervento da presentare come soluzione ottimale alla committenza in termini economici, energetici ed ambientali.

Il lavoro svolto ha messo in luce le potenzialità e i reali benefici derivanti dalla redazione di una diagnosi energetica all'interno di una procedura di pianificazione degli interventi di efficienza energetica sull'esistente. Infatti il ventaglio di soluzioni ed interventi presi in considerazione a valle delle analisi energetiche e analisi dei costi, i cui risultati sono riportati e commentati nel capitolo dedicato, fornisce un quadro completo dei reali benefici derivanti dai diversi scenari di interventi considerati, a favore di una maggiore consapevolezza lato committenza riguardo la scelta finale.

Nello specifico l'intervento selezionato consente un salto di prestazione energetica rispetto allo stato di fatto di ben 5 classi passando dalla classe F alla classe A1, tale miglioramento di prestazione energetica comporta una riduzione dei costi annui in esercizio della struttura di circa il 70% passando da circa 43'000 € a poco meno di 13'000 €, garantendo un tempo di rientro economico dell'investimento pari a 14 anni.

Parallelamente alla riduzione dei consumi, dal punto di vista dell'impatto ambientale, l'utilizzo di una pompa di calore ad alimentazione elettrica associata all'installazione di un impianto fotovoltaico comporta una riduzione del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile in misura del 71%, passando da circa 280 kWh a circa 80 kWh. L'utilizzo di energia proveniente da fonti rinnovabili garantisce anche una drastica riduzione delle emissioni di biossido di carbonio in atmosfera in misura del 69%, consentendo una diminuzione annua pari a circa 30 tonnellate.

Nonostante all'interno del presente lavoro non sia stata tratta in dettaglio l'analisi del comfort, risulta comunque opportuno sottolineare come l'insieme di interventi caratterizzanti lo scenario finale selezionato sia correlato, oltre che alla riduzione dei consumi, anche ad un miglioramento del comfort relativo agli occupanti dell'edificio in termini termici ed acustici.

Appendici

Appendice A_ Rilievo fotografico

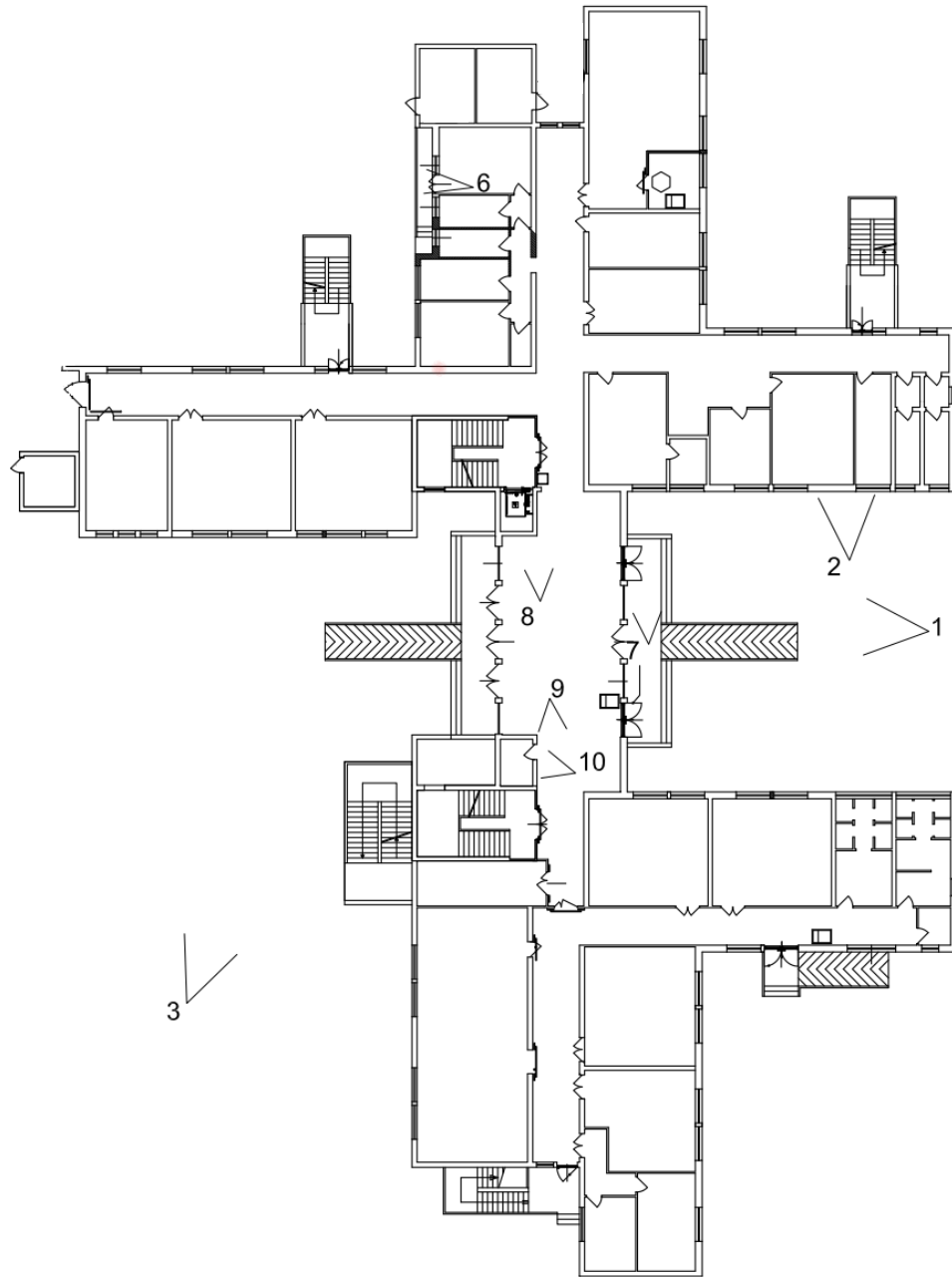


Figura 80 - Rilievo fotografico piano terra

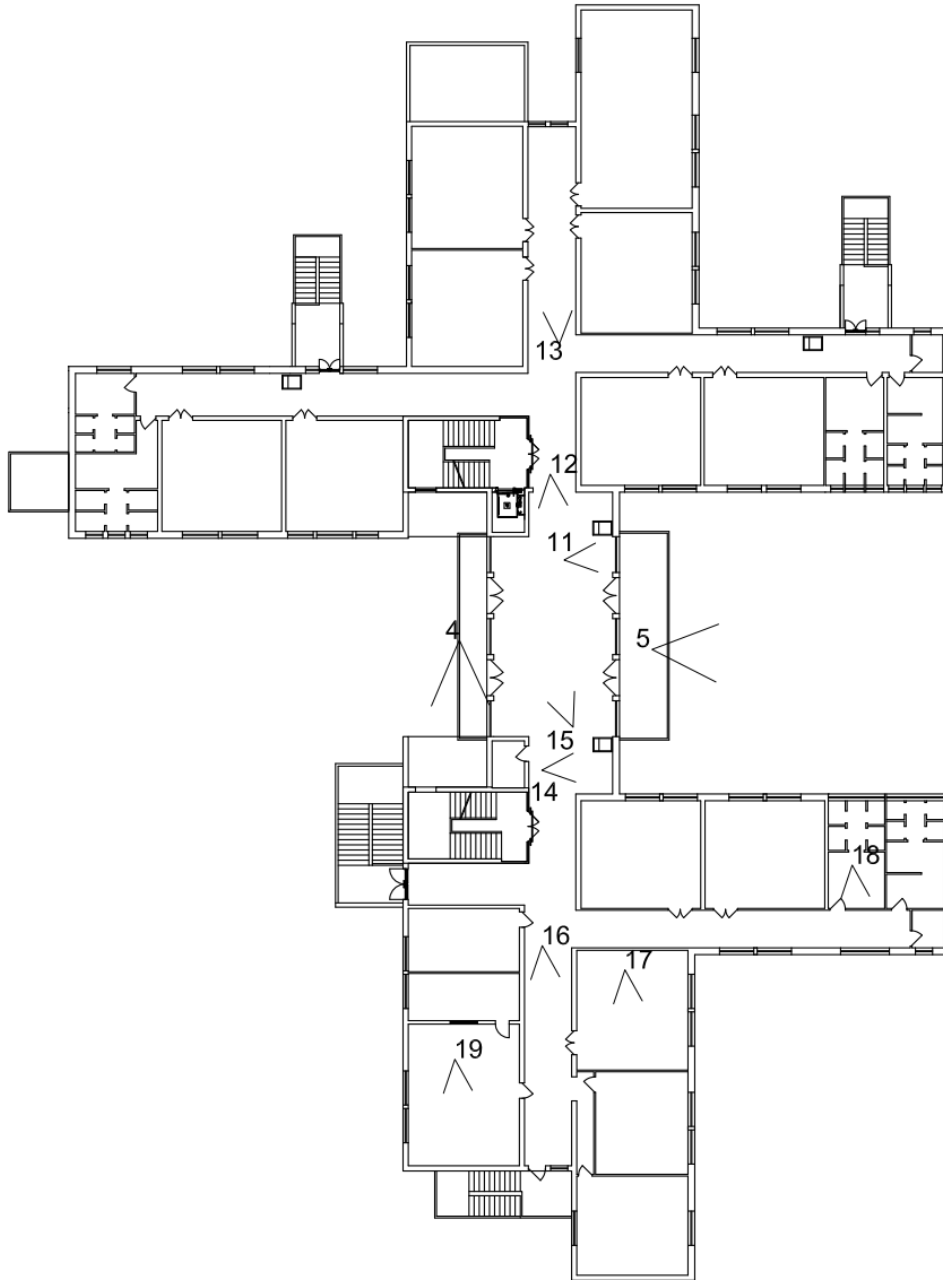


Figura 81 - Rilievo fotografico primo piano



Figura 82 - Foto esterno ed interno

Appendice B_ Rilievo corpi scaldanti

LOCALE	PIANO	TIPOLOGIA	Dimensione
Deposito cucina	terra	radiatore in ghisa	0
Sala pasti pronti	terra	radiatore in ghisa	12 6 65
Laboratorio	terra	radiatore in ghisa	13 6 65
Aula1	terra	radiatore in ghisa	7 6 65
Aula attività ricreative	terra	radiatore in ghisa	10 6 65
Corridoio	terra	radiatore in ghisa	10 6 65
Corridoio	terra	radiatore in ghisa	10 6 65
Ripostiglio	terra	radiatore in ghisa	-
Aula2	terra	radiatore in ghisa	8 6 65
Aula3	terra	radiatore in ghisa	8 6 65
Bagno maschetti	terra	radiatore in ghisa	5 4 85
Bagno femminucce	terra	radiatore in ghisa	7 4 85
Bagno insegnanti	terra	radiatore in ghisa	3 4 65
Scala1	terra	radiatore in ghisa	-
Corridoio	terra	radiatore in ghisa	5 4 50
Corridoio	terra	radiatore in ghisa	8 4 45
Ingresso principale	terra	radiatore in ghisa	13 4 45
Ingresso cortile	terra	radiatore in ghisa	6 4 45
scala2	terra	radiatore in ghisa	-
Lab. Multimediale	terra	radiatore in ghisa	6 4 45
Sala docenti	terra	radiatore in ghisa	14 4 65
Archivio	terra	radiatore in ghisa	14 4 65
Percorso 6	terra	radiatore in ghisa	2 4 65
Presidenza	terra	radiatore in ghisa	20 4 65
Bagno presidenza	terra	radiatore in ghisa	5 4 50
Ufficio	terra	radiatore in ghisa	8 4 45
Segreteria	terra	radiatore in ghisa	13 4 45
Ufficio	terra	radiatore in ghisa	6 4 45
Bagno donne	terra	radiatore in ghisa	6 4 45
Bagno uomini	terra	radiatore in ghisa	6 4 45
Amministrazione	terra	radiatore in ghisa	14 4 65
Aula clarinetto	terra	radiatore in ghisa	14 4 65
Archivio	terra	radiatore in ghisa	2 4 65
Lab. Musicale	terra	radiatore in ghisa	17 4 65
Ufficio	terra	radiatore in ghisa	13 4 65
Ufficio	terra	radiatore in ghisa	9 4 65
Bagno	terra	radiatore in ghisa	5 4 65
Bagno	terra	radiatore in ghisa	9 4 65
Aula di sostegno	terra	radiatore in ghisa	14 4 65
Lab.scientifico	primo	radiatore in ghisa	5 4 50
Lab. Artistico	primo	radiatore in ghisa	8 4 45
Aula 4	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Lab.musicale	primo	radiatore in ghisa	6 4 45
Sala registrazione	primo	radiatore in ghisa	6 4 45
Aula di pianoforte	primo	radiatore in ghisa	6 4 45
Aula 5	primo	radiatore in ghisa	14 4 65
Aula 6	primo	radiatore in ghisa	14 4 65
Bagno donne	primo	radiatore in ghisa	2 4 65
Bagno uomini	primo	radiatore in ghisa	5 4 50
Bagno docenti	primo	radiatore in ghisa	8 4 45
Corridoio sx	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Corridoio centrale	primo	radiatore in ghisa	6 4 45
Corridoio dx	primo	radiatore in ghisa	6 4 45
Aula 7	primo	radiatore in ghisa	6 4 45
Aula 8	primo	radiatore in ghisa	14 4 65
Bagno donne	primo	radiatore in ghisa	2 4 65
Bagno uomini	primo	radiatore in ghisa	2 4 65
Aula 9	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Aula magna	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Aula 10	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Aula 11	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Aula 12	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Aula 13	primo	radiatore in ghisa	13 4 45
Bagno donne	primo	radiatore in ghisa	14 4 65
Bagno uomini	primo	radiatore in ghisa	14 4 65

Tabella 80 - Rilievo corpi scaldanti

Appendice C_ Rilievo corpi illuminanti e dispositivi elettronici

LOCALE	PIANO	Lampada tubolare 2x28 W	Lampada tubolare 1x56 W	Plafoniere 60 W	Dispositivi	Descrizione	Potenza elettrica [W]	Potenza elettrica totale [W]
Deposito cucina	terra	1		0				56
Sala pasti pronti	terra	1		0				56
Laboratorio	terra	2		0				112
Aula1	terra	6		0				336
Aula attività ricreativ	terra	8		0	1	proiettore	100	548
Corridoio	terra	3		0				168
Corridoio	terra	3		0				168
Ripostiglio	terra	1		0				56
Aula2	terra	6		0				336
Aula3	terra	6		0				336
Bagno maschetti	terra			2				120
Bagno femminucce	terra			3				180
Bagno insegnanti	terra			1				60
Scala1	terra	1		0				56
Corridoio	terra	10		0				560
Corridoio	terra	10		0				560
Ingresso principale	terra	3		0				168
Ingresso cortile	terra			3				180
scala2	terra	1		0				56
Lab. Multimediale	terra	4		0				224
Sala docenti	terra	4		0				224
Archivio	terra	2		0				112
Percorso 6	terra	5		0	2	caffè	150	580
Presidenza	terra	2		0	1	pc	100	212
Bagno presidenza	terra			1				60
Ufficio	terra	1		0	4	pc	100	456
Segreteria	terra	2		0				112
Ufficio	terra	1		0	1	pc	100	156
Bagno donne	terra			2				120
Bagno uomini	terra			2				120
Amministrazione	terra	2		0	2	pc	100	312
Aula clarinetto	terra	2		0				112
Archivio	terra	1		0				56
Lab. Musicale	terra	7		0				392
Ufficio	terra	1		0				56
Ufficio	terra	1		0	1	pc	100	156
Bagno	terra			1				60
Bagno	terra			1				60
Aula di sostegno	terra	1						56
							TOTALE_PT	7748
Lab.scientifico	primo	4						224
Lab. Artistico	primo	4						224
Aula 4	primo	6						336
Lab.musicale	primo	6						336
Sala registrazione	primo	2						112
Aula di pianoforte	primo	0			2			120
Aula 5	primo	6						336
Aula 6	primo	6						336
Bagno donne	primo				2			120
Bagno uomini	primo				3			180
Bagno docenti	primo				1			60
Corridoio sx	primo	8						448
Corridoio centrale	primo	9						504
Corridoio dx	primo	12						672
Aula 7	primo	4	1					280
Aula 8	primo	4	1					280
Bagno donne	primo			3				168
Bagno uomini	primo			4				224
Aula 9	primo	4						224
Aula magna	primo	6	1					392
Aula 10	primo	4						224
Aula 11	primo	4						224
Aula 12	primo	4						224
Aula 13	primo	4						224
Bagno donne	primo			3				168
Bagno uomini	primo			3				168
							TOTALE_PT	6808
							TOTALE EDIFICIO	14556

Tabella 81 - Rilievo corpi illuminanti e dispositivi elettronici

FIBRA DI CANAPA

Pannelli isolanti 40 kg/m³
Spessore: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14,
16, 18, 20, 22 cm



Pannelli in fibra di canapa e kenaf per isolamento termico e acustico di tetti e solai: una scelta ecologica e innovativa. La fibra di Canapa è sana, riciclabile e traspirante.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Isolante in fibra di canapa e kenaf

Struttura: fibre vegetali termolegate

Materia prima: fibre naturali di Kenaf e Canapa

Dimensioni: 1200 x 580 mm (600 mm pannelli da 4, 5, 6 cm)

Spessore pannello: 40 - 220 mm

Densità: 40 Kg/m³

Conducibilità termica λ : 0,035 W/mK (40 kg/m³ a 10°C)

Calore Specifico: 2050 j/Kg K

Reazione al fuoco: Euroclasse F

Umidità di assorbimento: 5% - 6%

Resistenza alla compressione 10%: 4,02 KPa

Rigidità dinamica: 3,0 MN/m³

Traspirabilità al vapore μ : 1,59

Resistenza al flusso d'aria: 2,8 Kg Pa s/m²

Coefficiente di assorbimento acustico α : 0,82

Indice di valutazione isolamento acustico Rw: 63,5 dB

bioedilizia

IMPIEGHI

Per isolamento termico

I pannelli in fibra di canapa e kenaf vengono impiegati per l'isolamento termico in solai, sottotetto, tetto, intercapedini dei muri, cappotto interno e cappotto esterno.

Ottimi inoltre per proteggere dal caldo estivo proveniente dal tetto e dalle pareti esterne, soprattutto quelle esposte al sole. I pannelli in canapa isolante possiedono una capacità termica doppia rispetto alle fibre minerali. Questo significa che, anche se d'inverno la fibra di canapa e kenaf ripara dal freddo come la lana di roccia, d'estate c'è una differenza enorme nel riparare dal caldo. Mentre la lana di roccia non offre molto riparo, la fibra di canapa, grazie alla capacità termica doppia, permette lo sfasamento termico e rallenta la penetrazione del calore. Questo tipo di pannello è fortemente consigliato in caso di tetti leggeri, come i tetti in legno e tegole.

Per isolamento acustico

Per le ottime proprietà fonoassorbenti vengono impiegati nel trattamento acustico degli ambienti, eliminando rimbombo e riverbero, e per l'isolamento acustico dell'pareti e soffitti.

Ad esempio, una parete di 8 centimetri in mattoni forati, intonacata su ambo i lati, ha un abbattimento acustico di circa 40 dB. Aggiungendo un pannello di canapa e kenaf dello spessore di 10 cm, e una finitura in normale cartongesso, si arriva ad un abbattimento di 63 dB.

Per migliorare invece l'acustica degli ambienti, l'elevato coefficiente di assorbimento permette di abbattere di 10 dB il riverbero e il rumore interno agli ambienti con soltanto 4 cm di spessore.

Dati Tecnici JODO AIRP-HP

CARATTERISTICHE TECNICHE UNITÀ ESTERNE		Unità di misura	MODELLO AIRP-HP				
			AIRP-25HP circolatore integrato	AIRP-35HP circolatore integrato	AIRP-50HP circolatore integrato	AIRP-60HP circolatore integrato	AIRP-70HP circolatore integrato
Dati elettrici	Alimentazione		400V/3P+N+T/50Hz				
	Potenza massima assorbita	kW	14,83	19,16	28,62	31,19	34,12
	Corrente massima assorbita	A	21,4	27,7	41,4	45,1	48,2
Raffreddamento	Potenza frigorifera (1)	kW	30,50 (33,5*)	36,21 (39,3*)	49,11 (52,1*)	57,20 (60,6*)	70,11 (71,5*)
	Potenza assorbita (1)	kW	6,77	8,90	12,27	14,01	18,47
	EER (1)	W/W	4,51	4,07	4,00	4,08	3,80
	Potenza frigorifera (2)	kW	21,02 (23,1*)	26,90 (29,0*)	36,21 (38,4*)	43,00 (45,6*)	53,30 (54,9*)
	Potenza assorbita (2)	kW	6,48	9,1	12,49	13,72	17,20
	EER (2)	W/W	3,24	2,96	2,90	3,14	3,10
	SEER (5)	W/W	3,98	4,00	3,95	4,16	4,05
Riscaldamento	Potenza termica (3)	kW	24,57 (27,2*)	32,50 (35,1*)	48,46 (51,4*)	52,00 (55,1*)	65,10 (66,4*)
	Potenza assorbita (3)	kW	5,62	7,98	11,63	12,60	16,09
	COP (3)	W/W	4,40	4,07	4,17	4,13	4,05
	Potenza termica (4)	kW	22,18 (24,4*)	32,20 (34,9*)	41,26 (43,7*)	49,30 (52,3*)	60,34 (62,15*)
	Potenza assorbita (4)	kW	6,46	9,89	12,2	15,12	18,86
	COP (4)	W/W	3,43	3,26	3,37	3,26	3,20
	SCOP (6)	W/W	3,83	3,82	3,82	4,00	3,82
Compressore	Efficienza energetica acqua 35°C / 55°C	Classe	A+ / A++				
	Marchio		Mitsubishi				
	Tipo		Scroll DC Inverter		Mitsubishi Scroll DC inverter+ on/off	Scroll DC inverter	Scroll DC inverter
	Numero		1	1	1 + 1	2	2
Olio refrigerante (tipo, quantità)	mL	FV50S, 2300 totale	FV50S, 2300 totale	FV50S, 4600 totale	FVC68D, 4600 totale	FVC68D, 4600 totale	
Motore ventilatore	Tipo		Motore DC Brushless	Motore DC Brushless	Motore DC Brushless	Motore DC Brushless	Motore DC Brushless
	Numero		1	1	1	1	1
	Potenza nominale (2)	kW	0,60	0,72	1,10	1,58	1,78
	Potenza massima assorbita	kW	0,72	0,84	1,78	1,95	2,11
	Corrente massima assorbita	A	1,22	1,42	2,57	2,85	3,08
	Velocità	r/min	540	580	670	770	830
	Portata d'aria nominale	m3/s	3,90	4,10	6,94	7,72	8,28
Refrigerante	Tipo		R410A	R410A	R410A	R410A	R410A
	Quantità refrigerante	kg	9,5	10	15,5	16,7	18
	Tonnellate di CO2 equivalente	ton	19,84	20,88	32,36	34,87	37,58
	Pressione di progetto (alta/bassa)	MPa	4,15/2,7	4,15/2,7	4,15/2,7	4,15/2,7	4,15/2,7
Circuito idraulico	Portata acqua (2)	L/s	1,00	1,28	1,72	2,06	2,55
	Perdita di carico interna (2)	kPa	30	34	48	60	80
	Attacchi idraulici	inch	2" F	2" F	2" F	2" F	2" F
	Minimo volume acqua (7)	L	84	108	145	173	214
Rumorosità	Potenza sonora (8)	dB(A)	70,1/SL 68,3/SSL 67,4	73,6/SL 71,8/SSL 70,9	76,5/SL 74,5/SSL 73,6	78,3/SL 76,5/SSL 75,6	78,9/SL 77,1/SSL 76,3
	Pressione sonora (9)	dB(A)	54,4/SL 52,4/SSL 50,7	56,5/SL 54,7/SSL 53,0	59,7/SL 58,7/SSL 56,5	61,6/SL 60,8/SSL 58,6	63,4/SL 62,6/SSL 60,4
Dimensioni e pesi	Dimensioni (LxAxP)	mm	1198x1673x1198			1198x1745x1198	
	Dimensioni imballo (LxAxP) (10)	mm	1200x1765x1200			1200x1890x1200	
	Peso in esercizio	kg	357	384	422	438	449
	Peso netto/lordo	kg	349/369	376/396	414/434	430/450	441/461

(1) Raffreddamento: temperatura aria esterna 35°C; temperatura acqua ing./usc. 23/18°C.

(2) Raffreddamento: temperatura aria esterna 35°C; temperatura acqua ing./usc. 12/7°C.

(3) Riscaldamento: temperatura aria esterna 7°C b.s. 6°C b.u.; temp.acqua ing./usc. 30/35°C.

(4) Riscaldamento: temperatura aria esterna 7°C b.s. 6°C b.u.; temp.acqua ing./usc. 40/45°C.

(5) Raffreddamento: temperatura acqua ing./usc. 12/7°C

(6) Riscaldamento: condizioni climatiche medie; T_{biv}=-7°C; temp.acqua ing./usc. 30/35°C

(7) Calcolato per una diminuzione della temperatura dell'acqua dell'impianto di 15°C con un ciclo di sbrinamento di 6 minuti

(8) condizione (3); valore determinato sulla base di misure effettuate in accordo con la normativa UNI EN ISO 9614-2, nel rispetto di quanto richiesto dalla certificazione Eurovent.

(9) Livello di pressione sonora ottenuto da misurazioni interne effettuate in campo libero a 1m dall'unità, secondo norma ISO 3744. Riportati i valori anche per accessori SL e SSL installati.

(10) altezza dell'imballo comprensiva di pallet

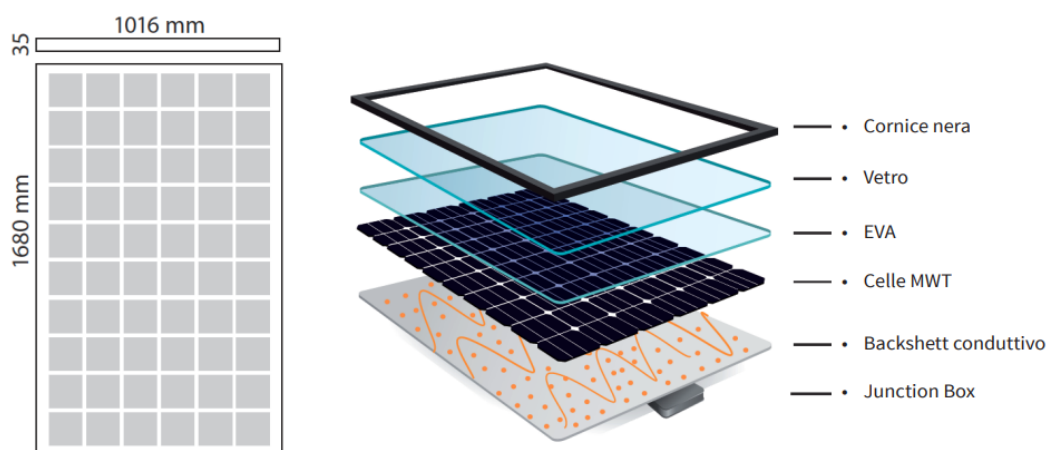
(*) Con funzionamento Hz max, abilitabile da utente.

N.B. i dati prestazionali riportati sono indicativi e possono essere soggetti a variazione. Inoltre Le rese dichiarate ai punti (1), (2), (3) e (4) sono da intendersi riferite alla potenza istantanea secondo la EN 14511. Il dato dichiarato al punto (5) e (6) è determinato secondo la UNI EN 14825.

Scheda tecnica 2_Pompa di calore aria-acqua JODO AIRP-HP 50

Dati Tecnici modulo JODO FV

Caratteristiche elettriche		
Potenza nominale	Wp	350
Tolleranza	%	0/+3
Tensione di massima potenza (Vmp)	V	33,30
Corrente di massima potenza (Imp)	A	10,51
Tensione a circuito aperto (Voc)	V	40,70
Corrente di corto circuito (Isc)	A	10,69
Tensione di sistema	V	1000
Capacità massima del fusibile	A	15
Efficienza modulo	%	20,51
Caratteristiche tecniche		
Fronte		3,2 mm vetro rinforzato
Retro		Conductive Backsheet
Incapsulate		EVA
Diodi		3 diodi di Bypass
Connettori		MC4 compatibili
Cavi		1000 mm L -4,0 mm 2 sezioni
Carico Max 5		400 Pa
Caratteristiche di temperatura		
NOCT	°C	343 +/-2
Coef (Pmax)	%/°C	-0,36
Coef (Voc)	%/°C	-0,28
Coef (Isc)	%/°C	0,06
Temperatura di funzionamento	°C	-40/+85°C



Scheda tecnica3_Moduli fotovoltaici JODO



JODO SOLDFP

Collettori solari sottovuoto a flusso diretto con parabola posteriore CPC

Caratteristiche principali:

- Collettore solare sottovuoto preassemblato, ideale per ogni tipologia d'impianto residenziale/plurifamiliare/settore terziario e industriale
- Collettore solare CPC con parabola posteriore captante per l'utilizzo ottimale dell'irraggiamento solare da diverse angolazioni per una ottima efficienza annuale e giornaliera
- Collettore con terzo tubo integrato per il bilanciamento delle portate in caso di installazione in batteria con un incremento di resa fino al +15% rispetto alle soluzioni standard
- Configurabile con kit antistagnazione per la limitazione delle sovratemperature, tramite accessori
- Elevate prestazioni e ridotte dispersioni termiche
- Specifico per impianti sia per la produzione sanitaria e/o integrazione riscaldamento
- Superfici d'assorbimento a 360° estese da: 2,5 mq (10 tubi) / 3,8 mq (15 tubi) / 5,3 mq (21 tubi)
- Possibilità di collegare fino a 10 collettori (100 tubi) in parallelo
- Sistema di ottimizzazione delle portate idrauliche in caso di collegamento in batteria di più collettori solari grazie al "terzo tubo" inserito nella testata: grazie a questa soluzione si ottiene un incremento della resa fino al +15% rispetto ai prodotti standard presenti nel mercato
- Collegamento idraulico dei collettori alle tubazioni solari reversibili, collegamento sul lato destro o sinistro
- Collettori rispondenti ai requisiti richiesti dai sistemi d'incentivazione fiscale (elevato contributo su detrazioni Fiscali e C.T. 2.0)



		SOLDFP10T	SOLDFP15T	SOLDFP21T
Dimensioni (L x H x P)	mm	1106x1921x114	1656x1921x114	2316x1921x114
Peso a vuoto	Kg	40	58	104
Superficie lorda	m ²	2,12	3,18	4,45
Superficie di apertura	m ²	1,91	2,87	4,02
Superficie netta di captazione a 360°	m ²	2,57	3,85	5,39
Pressione massima di esercizio	bar	10		
Contenuto liquido	l	1,78	2,68	3,75
Portata idrica nominale	l/h m ²	1,5	2,3	3,1
Potenza di picco del collettore	W	1272	1955	2710
Temperatura massima di esercizio	°C	300		
Inclinazione collettori minima/massima	gradi	15/75		
Rendimento annuo del collettore solare SOLAR KEY-MARK (Misurato nella sede di Würzburg 50 °C (T _m))	kW/anno x collettore	1231	1974	2884
Rendimento riferito alla sup. assorbimento $\eta_{s,0}$	%	60	61,5	60,9
Coefficiente di dispersione a_1	W/m ² K ²	0,910	0,850	0,69
Coefficiente di dispersione a_2	W/m ² K ²	0,013	0,009	0,005
Coefficiente IAM (K50°)	K50°	1,05	1,05	1,14

Scheda tecnica 4_Collettori solari JODO SOLDFP10T

Appendice E_ Computi metrici

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI		
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE	
RIPORTO									
LAVORI A CORPO									
1 PUGLIA E.001.034.a	Oneri per esecuzione di analisi dei rifiuti. materiale edile inerte in genere Analisi pavimentazione di copertura esistente					1,00			
	SOMMANO cad					1,00	470,00	470,00	
2 PUGLIA E.002.034.a	Rimozione di pavimenti in ceramica o marmette di marmo di qualsiasi dimensione e natura, compresa la demolizione del sottostante massetto di allettamento. Eseguita a qualsiasi pian ... fino a m 50 e quant'altro occorre per dare il lavoro finito in opera a perfetta regola d'arte. rimozione senza recupero Copertura					1'381,00			
	SOMMANO mq					1'381,00	12,60	17'400,60	
3 PUGLIA E.001.031	Trasporto con qualunque mezzo a discarica autorizzata di materiale di risulta di qualunque natura e specie purché esente da amianto, anche se bagnato, fino ad una distanza di km 10 ... pianamento e l'eventuale configurazione del materiale scaricato, con esclusione degli oneri di conferimento a discarica. Rimozione di pavimentazione e relativo massetto di sottofondo Rimozione di lastricato solare	1381,00 1382,00			0,060 0,110	82,86 152,02			
	SOMMANO mc					234,88	12,50	2'936,00	
4 PUGLIA E.001.033.c	Smaltimento di materiale da demolizioni e rimozioni privo di ulteriori scorie e frammenti diversi. Il prezzo comprende tutti gli oneri, tasse e contributi da conferire alla discari ... ire. Il trasportatore è pienamente responsabile della classificazione dichiarata. macerie edili con impurità fino al 30% Rimozione di pavimentazione e relativo massetto di sottofondo (incidenza 14qli a m3) Rimozione di lastricato solare (incidenza 14qli a m3)	1381,00 1381,00	14,00 14,00		0,060 0,110	1'160,04 2'126,74			
	SOMMANO q.li					3'286,78	5,15	16'926,92	
5 DEI RRM B15010a	Isolamento termico in estradosso di coperture piane a terrazzo, eseguito mediante pannelli rigidi di materiale isolante, rispondente ai requisiti CAM (Criteri Ambientali Minimi), s ... o dritti, conducibilità termica lambdaD 0,035 W/mK, resistenza a compressione >= 500 kPa secondo EN 826: spessore 80 mm Copertura					1'381,00			
	SOMMANO mq					1'381,00	37,05	51'166,05	
6 DEI RRM B15010b	Isolamento termico in estradosso di coperture piane a terrazzo, eseguito mediante pannelli rigidi di materiale isolante, rispondente ai requisiti CAM (Criteri Ambientali Minimi), s ... 035 W/mK, resistenza a compressione >= 500 kPa secondo EN 826: sovrapprezzo per ogni cm in più di spessore fino a 100 mm Copertura	1381,00			2,000	2'762,00			
	SOMMANO mq					2'762,00	4,25	11'738,50	
7 PUGLIA E.008.007.a	Fornitura e posa in opera di massetto formato da sabbia e cemento nelle proporzioni di q.li 2,5 di cemento tipo 325 per m³ di sabbia, in opera ben pistonato e livellato, per sottof ... altro occorre per dare il lavoro finito in opera a perfetta regola d'arte. Massetto di sottofondo dello spessore di cm 5 Copertura					1'381,00			
	SOMMANO mq					1'381,00	13,20	18'229,20	
8 PUGLIA E.004.037.a	Fornitura e posa in opera di rete metallica elettrosaldata da utilizzare in opere con calcestruzzo armato ordinario secondo i disposti del D.M. 14/01/2008, tagliata a misura e post ... gomatura, la legatura e le eventuali saldature per giunzioni e lo sfrido. diametri da 5 mm a 10 mm, classe tecnica B450A Massetto armato sopra i pannelli (rete diametro 6 maglia 20cmx20cm) incidenza 4kg/m2	1381,00			4,000	5'524,00			
	SOMMANO kg					5'524,00	2,10	11'600,40	
9 PUGLIA E.011.051	Fornitura e posa in opera di pavimentazione solare in lastre di pietra di Corsi o di Cavallino dello spessore di cm 4, in opera con idoneo sottofondo di tuffina dello spessore sino ... , eventuali tagli, sfridi ed ogni altro onere e magistero occorrente per dare il lavoro finito a perfetta regola d'arte. Copertura					1'381,00			
	SOMMANO mq					1'381,00	36,75	50'751,75	
Parziale LAVORI A CORPO euro									181'219,42
T O T A L E euro									181'219,42
Data, 06/05/2023									

Computo metrico 1 – Isolamento copertura

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
RIPORTO								
LAVORI A CORPO								
1 DEI RRM B15090b	Polistirene espanso sinterizzato EPS bianco conforme alla norma UNI EN 13163, avente valore di conducibilità termica lambdaD compreso tra 0,035 e 0,037 W/mK, resistenza a trazione ... mento di finitura adeguato all'ETA del produttore del sistema da pagarsi a parte: pannelli con superficie liscia: 100 mm Prospetto principale (vuoto per pieno) maggiorazione per correzioni pontii termici a detrarre (infissi)	1,00	1682,00			1'682,00		
		1,00	1682,00		0,150	252,30		
		1,00	388,00			-388,00		
	Sommano positivi mq					1'934,30		
	Sommano negativi mq					-388,00		
	SOMMANO mq					1'546,30	90,56	
2 DEI RRM B65034b	Rivestimento a spessore a base di resine silossaniche con particelle di nano-quarzo, ad elevata brillantezza e stabilità del colore, specifico per sistemi a cappotto, granulometria: 2,0 mm Prospetto principale (vuoto per pieno) a detrarre (infissi)	1,00	1682,00			1'682,00		
		1,00	388,00			-388,00		
	Sommano positivi mq					1'682,00		
	Sommano negativi mq					-388,00		
	SOMMANO mq					1'294,00	29,25	
	Parziale LAVORI A CORPO euro						177'882,43	
LAVORI A MISURA								
3 PUGLIA S.03.12a	Ponteggio o incastellatura metallica di facciate interne o esterne della larghezza sino a m 1,10 ed altezza sino a 20 m, realizzato con elementi sovrapponibili in ferro o comunque ... o ed ogni altro onere e magistero di manovra e di manutenzione. Ponteggio o incastellatura per i primi 6 mesi o frazione ponteggio esterno *(lung.=280*8)	1,00	2240,00			2'240,00		
	SOMMANO mq					2'240,00	12,50	
4 PUGLIA E.03.18a	Schermatura antipolveri o antisabbia di ponteggi o di armature di sostegno, con teli di polietilene, juta e simili, in opera compresi gli oneri per il trasporto, il montaggio i ris ... i sfridi e quant'altro occorre per dare il lavoro compiuto a perfetta regola d'arte. Schermatura con teli di polietilene ponteggio esterno *(lung.=280*8)	1,00	2240,00			2'240,00		
	SOMMANO mq					2'240,00	4,50	
	Parziale LAVORI A MISURA euro						38'080,00	
	TOTALE euro						215'962,43	
	Data, 06/05/2023							

Computo metrico 2 – Isolamento pareti perimetrali esterne

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
R I P O R T O								
LAVORI A CORPO								
1 DEI RRM A25118	Smontaggio di infissi in ferro o alluminio, calcolato sulla superficie, inclusa l'eventuale parte vetrata, compreso telaio, controtelaio, smuratura delle grappe o dei tasselli di tenuta ed eventuale taglio a sezione degli elementi 1 Soggiorno Corridoio	1,00	388,00			388,00		
	SOMMANO mq					388,00	22,95 8'904,60	
2 DEI RRM C25076c	Serramento realizzato con profili estrusi di pvc prodotti secondo la norma DIN 7748, esenti da cadmio, autoestinguenti, classe 1 di reazione al fuoco; sistema caratterizzato da pro ... o ai piani ed eventuali assistenze murarie: portafinestra 2 ante, a battente, telaio su 4 lati, con traverso orizzontale porte-finestre	1,00	188,00			188,00		
	SOMMANO mq					188,00	380,31 71'498,28	
3 DEI RRM C25076c	Serramento realizzato con profili estrusi di pvc prodotti secondo la norma DIN 7748, esenti da cadmio, autoestinguenti, classe 1 di reazione al fuoco; sistema caratterizzato da pro ... o il trasporto, esclusi il controtelaio, il tiro ai piani ed eventuali assistenze murarie: finestra a 2 ante, a battente finestre	1,00	200,00			200,00		
	SOMMANO mq					200,00	360,40 72'080,00	
Parziale LAVORI A CORPO euro							152'482,88	
T O T A L E euro							152'482,88	
Data, 06/05/2023								

Computo metrico 3 - Rimozione e sostituzione infissi

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug.	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
R I P O R T O								
LAVORI A MISURA								
1 T.007.014.f	Refrigeratore / pompa di calore d'acqua con condensazione ad aria con ventilatori centrifughi ad alta prevalenza canalizzabile, funzionante con refrigerante R410A; struttura in acc ... rcolazione, vaso d'espansione, filtro acqua meccanico e serbatoio d'accumulo); resa frigorifera 44kW, resa termica 55 kW Pompa di calore elettrica aria-acqua					1,00		
	SOMMANO cad					1,00	24'241,99 24'241,99	
2 T.001	Rifacimento di centrale termica esistente secondo gli schemi idraulici necessari a consentire l'alimentazione dell'impianto di riscaldamento da due generatori di calore (caldaia e pompa di calore), comprensivo dello smontaggio e rimozione della circuiteria esistente					1,00		
	SOMMANO l					1,00	15'000,00 15'000,00	
3 T.002	Installazione valvole termostatiche su apparecchi scaldanti previa rimozione delle valvole di intercettazione di comprensiva di testina termostatica	1,00		100,000		100,00		
	SOMMANO cadauno					100,00	100,00 10'000,00	
4 T.001.007.e	Generatore termico premiscelato a condensazione funzionante a metano (possibilità di funzionamento anche a gpl), marcato CE, camera di combustione stagna e scambiatore di calore a p ... fumaria, gli accessori per il trattamento acque ed eventuali comandi remoti evoluti, delle seguenti potenzialità: 115 kW CALDAIA A CONDENSAZIONE					1,00		
	SOMMANO cad					1,00	11'320,00 11'320,00	
Parziale LAVORI A MISURA euro							60'561,99	
T O T A L E euro							60'561,99	
Data, 06/05/2023								

Computo metrico 4 - Rifacimento centrale termica e sostituzioni generatori di calore

Indice figure

Figura 1- Ripartizione del consumo energetico finale per vettore energetico 2021 (fonte Eurostat [1])	1
Figura 2 - Ripartizione dell'energia primaria prodotta per vettore energetico in Europa e in Italia nel 2021(fonte Eurostat [1])	2
Figura 3- Prima pagina Corriere della Sera del 1973	3
Figura 4 – Evoluzione delle Direttive Europee legate al tema dell'efficienza degli edifici [2]	6
Figura 5 - Standard richiamati dallo Standard ISO 52016-1.....	9
Figura 6 - Calcolo carichi termici sensibili di riscaldamento/raffrescamento e temperature UNI EN ISO 52016-112	
Figura 7 – Schematizzazione nodale.....	13
Figura 8-Modellizzazione a parametri concentrati di un componente opaco di involucro (UNI EN ISO 52016-1)[5]	15
Figura 9 - Classificazione in funziona della distribuzione della massa	16
Figura 10 - Modellizzazione a parametri concentrati di un componente opaco di involucro (UNI EN ISO 52016-1_Appendice Nazionale)[5].....	18
Figura 11 -Diagramma di flusso Diagnosi Energetica (Rielaborato da Manuale per la diagnosi energetica degli edifici pubblici, ENEA, 2019) [3]	21
Figura 12- Inquadramento territoriale Comune di Trepuzzi.....	24
Figura 13- Prospetto ingresso - Viale Europa	25
Figura 14 – Immagine aerea del lotto di intervento tratta da Google Maps	25
Figura 15 - Ombreggiamento relativo alle ore 14:00 del solstizio estivo	26
Figura 16- Ombreggiamento relativo alle ore 14:00 del solstizio invernale.....	26
Figura 17- Prospetto Nord-Est.....	27
Figura 18- Prospetto Nord-Ovest.....	27
Figura 19- Pianta Piano Terra	27
Figura 20 – Pianta Piano Primo.....	28
Figura 21 - Sezione A-A.....	28
Figura 22 - Sezione B-B	28
Figura 23 – Visione assonometrica edificio 3d lato nord-est.....	29
Figura 24 - Individuazione locali climatizzati e non climatizzati	31
Figura 25 – Foto rappresentativa degli infissi	35
Figura 26 - Caratterizzazione dimensionale ed energetica dell'elemento finestrato W2.....	36
Figura 27 – Schematizzazione ponti termici.....	37
Figura 28- Caratterizzazione ponte termico d'angolo tra pareti sporgente con pilastro	38
Figura 29- Caratterizzazione ponte termico d'angolo tra pareti rientrante con pilastro	38
Figura 30- Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – pilastro	39
Figura 31- Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – solaio contro terra.....	39
Figura 32 - Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – solaio interpiano	40
Figura 33- Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – copertura.....	40
Figura 34 - Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – balcone	41
Figura 35 - Caratterizzazione ponte termico di giunzione parete – tela	41
Figura 36 - Visualizzazione tridimensionale termografica dell'edificio lato ingresso.....	42
Figura 37 - Visualizzazione tridimensionale termografica dell'edificio affaccio cortile posteriore.....	42
Figura 38 - Posizionamento locale adibito a Centrale Termica	43
Figura 39 – Foto rappresentativa dei corpi scaldanti costituenti il sottosistema di emissione	44
Figura 40 – Foto rappresentativa dei boiler elettrici installati.....	45
Figura 41 – Targa dei boiler installati	45
Figura 42 - Collocazione ascensore.....	47
Figura 43 – Andamento consumi di gas naturale relativi alle annate 2018, 2019 e 2020	48
Figura 44 – Andamento consumi elettrici relativi alle annate 2018, 2019 e 2020	48
Figura 45 – Profilo apporti interni dovuti agli occupanti	53
Figura 46 - Profilo apporti interni dovuti ai dispositivi di illuminazione e alle apparecchiature elettriche.....	53
Figura 47 – Zonizzazione Piano Terra	54

Figura 48 – Zonizzazione Piano Primo	55
Figura 49 - Schema procedura di calibrazione	57
Figura 50 - Step di calibrazione intermedio_2018	57
Figura 51 - Step di caslibrazione intermedio_2018.....	58
Figura 52 - Step di calibrazione intermedio_2020.....	58
Figura 53 - Step di calibrazione intermedio_2020.....	59
Figura 54 – Firma Energetica 2018.....	59
Figura 55- Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2019.....	60
Figura 56- Firma Energetica_2020	60
Figura 57 - Andamento valori orari standard di temperatura.....	63
Figura 58- Fabbisogno di energia primaria	64
Figura 59- Indici di prestazione energetica	64
Figura 60 – Dispersioni termiche riferite all’intero edificio	67
Figura 61 - Ripartizione contributi allo scambio termico per trasmissione totale	69
Figura 62 - Fabbisogni energia primaria _Stato di fatto	70
Figura 63 - Indici di prestazione energetica _Stato di fatto	70
Figura 65 - foto rappresentativa infissi _ Stato di fatto	72
Figura 64 - Sezione profilo pvc_Post intervento	72
Figura 66 - Andamento flussi di cassa cumulati _intervento 4°.....	74
Figura 67 - Caldaie a condensazione Baltur.....	75
Figura 68 - pompa di calore Jodo airp-hp	75
Figura 69 - Andamento flussi di cassa cumulati _intervento 4b.....	76
Figura 70 - Andamento flussi di cassa cumulati _intervento 4a.....	77
Figura 71 - Caratterizzazione impianto solare termico.....	78
Figura 72 - Classificazione interventi secondo DM 26 Giugno 2015	79
Figura 73 - Interventi economicamente convenienti e non convenienti	82
Figura 74 - Individuazione pareto front analisi dei costi	83
Figura 75 - Ripartizione emissioni di CO2 tra i diversi servizi energetici	85
Figura 76 - Flussi di cassa cumulati scenario selezionato	85
Figura 77 - Scenario selezionato analisi dei costi	86
Figura 78 - Attestato di Prestazione Energetica_Stato di fatto	87
Figura 79 – Attestato di prestazione energetica_Post intervento	88
Figura 80 - Rilievo fotografico piano terra.....	90
Figura 81 - Rilievo fotografico primo piano.....	91
Figura 82 - Foto esterno ed interno	92

Indice tabelle

Tabella 1 - Norme abolite dalla norma UNI EN ISO 52016-1.....	10
Tabella 2 – Caratteristiche calcolo carico e fabbisogno di riscaldamento/raffrescamento in condizioni ideali e con impianto specifico	11
Tabella 3 - Classificazione degli elementi di involucro in funzione della capacità termica areica	17
Tabella 4 - Distribuzione della capacità termica in funzione del posizionamento della massa	17
Tabella 5 - Caratterizzazione geometrica del fabbricato	29
Tabella 6 - Stratigrafia elemento opaco verticale M1	30
Tabella 7 - Stratigrafia tramezzo interno M9.....	30
Tabella 8 - Stratigrafia tramezzo interno M10.....	30
Tabella 9 - Stratigrafia tramezzo interno M11.....	30
Tabella 10 - Stratigrafia tramezzo interno M14.....	31
Tabella 11 - Stratigrafia tramezzo interno M15.....	31
Tabella 12 - Stratigrafia tramezzo interno M16.....	31
Tabella 13 - Stratigrafia elementi opachi verticali M3 ed M4.....	32
Tabella 14 - Stratigrafia elemento opaco verticale M8.....	32
Tabella 15 - Stratigrafia elemento opaco verticale M12.....	32
Tabella 16 - Stratigrafie elementi opachi verticali M5 ed M6.....	32
Tabella 17 - Stratigrafie elementi opachi verticali M7 ed M13	32
Tabella 18 - Tabella riepilogativa elementi verticali opachi.....	33
Tabella 19 - Stratigrafia pavimento contro terra P1.....	33
Tabella 20 - Stratigrafia solaio interpiano P2.....	34
Tabella 21 - Stratigrafia elemento di copertura S2.....	34
Tabella 22 - Riepilogo componenti finestrati	36
Tabella 23 - Riepilogo ponti termici.....	37
Tabella 24 - Caratteristiche generatore di calore per riscaldamento	44
Tabella 25 - Dati generatore di calore per ACS.....	45
Tabella 26 - Rilievo corpi illuminanti.....	46
Tabella 27 - Categorizzazione d'uso ascensore	47
Tabella 28 - Tabella riepilogativa consumi.....	48
Tabella 29 - Rilievo consumi metano 2018.....	49
Tabella 30 - Rilievo consumi metano 2019.....	49
Tabella 31 - Rilievo consumi metano 2020.....	49
Tabella 32 - Rilievo consumi elettrici 2018.....	50
Tabella 33 - Rilievo consumi elettrici 2019.....	50
Tabella 34 - Rilievo consumi elettrici 2020.....	50
Tabella 35 - Caratterizzazione climatica esemplificativa	51
Tabella 36 - Profilo orario esemplificativo locale "aula 1"	52
Tabella 37 - Tabella riepilogativa zone termiche.....	55
Tabella 38 - Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2018.....	60
Tabella 39 - Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2019.....	60
Tabella 40 - Discostamento mensile tra consumi misurati e calcolati_2020.....	61
Tabella 41 - Valori limite per MBE e CV(RMSE) per dati mensili e orari.....	62
Tabella 42 - Validazione della procedura di calibrazione_2018	62
Tabella 43 - Validazione della procedura di calibrazione_2019	62
Tabella 44 - Validazione della procedura di calibrazione_2020	62
Tabella 45 - Andamento dei gradi giorno relativo al periodo di riscaldamento	63
Tabella 46 - Fabbisogni energia primaria	64
Tabella 47 - Indici di prestazione energetica	64
Tabella 48 - Consumi energetici modello adattato all'utenza con dati climatici di tipo standard.....	64

<i>Tabella 49 - Ciclo di vita e costi annuali di manutenzione distinti per componente impiantistico oggetto di intervento.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabella 50 - Consumi energetici annuali Stato di fatto.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabella 51 - Costo Globale e indice di prestazione energetica non rinnovabile stato di fatto.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabella 52 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi opachi verticali.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabella 53 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi finestrati.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabella 54 - Dispersioni termiche per trasmissione relative ai ponti termici.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabella 55 – Consumi ed emissioni CO₂_ Stato di fatto.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 56 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi finestrati.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 57 - Dispersioni termiche per trasmissione relative agli elementi finestrati.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 58 - Caratterizzazione intervento 1.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 59 - Caratterizzazione intervento 2.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabella 60 - Stratigrafia muratura M1_ Stato di fatto.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 61 - Stratigrafia muratura M1_ Post intervento.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 62 - Caratterizzazione intervento 3.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 63 - Caratterizzazione intervento 4a.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabella 64 - Caratterizzazione intervento 4b.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabella 65 - Caratterizzazione intervento 5.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabella 66 - Caratterizzazione intervento 6.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabella 67 - Legenda interventi singoli.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabella 68 - Interventi Riqualificazione Energetica.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabella 69 - - Interventi di Ristrutturazione Importante di Secondo Livello.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabella 70 - Interventi di Ristrutturazione Importante di Primo Livello.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabella 71 – Costo globale normalizzato e indici di prestazione energetica globale non rinnovabile-interventi di riqualificazione energetica.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 72 - Costo globale normalizzato e indici di prestazione energetica globale non rinnovabile-interventi di ristrutturazione importante di secondo livello.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 73 - Costo globale normalizzato e indici di prestazione energetica globale non rinnovabile-interventi di ristrutturazione importante di secondo livello.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 74 - Consumi energetici scenario selezionato.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabella 75 - Fabbisogni energia primaria stato di fatto e post intervento.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabella 76 – Indici di prestazione energetica stato di fatto e post intervento.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabella 77 - Emissioni CO₂ stato di fatto e post intervento.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabella 78 – Leggenda riepilogativa interventi di efficienza energetica.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabella 79 - Risultati analisi economica intervento selezionato.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabella 80 - Rilievo corpi scaldanti.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabella 81 - Rilievo corpi illuminanti e dispositivi elettronici.....</i>	<i>94</i>

Bibliografia

- [1] “Shedding light on energy in the EU”, Eurostat, 2023. Doi:10.2785/405482. (consultato il 21/03/2023)
- [2] Arch. Emanuele Meloni et al. “Storia della normativa energetica del settore edilizio: genesi e prospettive”, Infobuildenergia,10/11/2021. (consultato il 21/03/2023)
- [3] N. Calabrese, A. Carderi, C. Lavinia, F. Caffari, E. Passafaro et al “Linne Guida per la diagnosi energetica degli edifici pubblici” 2019. (consultato il 27/03/2023)
- [4] Approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato (UNI EN ISO 52016-1:2018) e applicazione al settore residenziale V. Corrado, I. Ballarini, G. De Luca, M.P. Tootkaboni (consultato il 27/03/2023)
- [5] Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 52016-1. Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti- Parte 1: Procedure di calcolo, marzo 2018.

Ringraziamenti