

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Tesi di Laurea Magistrale

Diagnosi energetica di un edificio di tipo scolastico e
progettazione degli interventi di riqualificazione energetica con
focus sull'impianto di generazione fotovoltaico

Candidato: Politi Marco – s306203

Relatore: Filippo Spertino

Correlatore: Alfonso Capozzoli

Anno accademico 2023/2024

PREFAZIONE

Il presente elaborato è volto all'approfondimento della metodologia di diagnosi energetica, intesa dal D. Lgs. 04/07/2014 n. 102 come procedura sistematica volta ad acquisire il profilo dei consumi di un edificio, all'identificazione e alla valutazione tecnico - economica delle opportunità di risparmio energetico nonché alla progettazione dei relativi interventi di riqualificazione.

Esponendo il percorso logico dei passaggi necessari alla diagnosi energetica di un reale edificio scolastico sito nel comune di Roma, lo scritto analizzerà la riqualificazione energetica dell'immobile, ottenendone il miglioramento di almeno una classe energetica attraverso la realizzazione di interventi di efficientamento e la riduzione del 20% delle emissioni di CO₂.

Il primo capitolo verterà sullo studio delle caratteristiche strutturali e impiantistiche dell'edificio oggetto d'indagine, dei rilievi effettuati, dell'estrazione e analisi dei consumi di energia elettrica e Gas Metano delle ultime annualità.

Il secondo capitolo descriverà il processo di modellazione energetica effettuato attraverso l'utilizzo del modulo EC 700 fornito in licenza da Edilclima. L'obiettivo della modellazione è la determinazione del fabbisogno energetico dell'immobile attraverso la caratterizzazione delle sue dispersioni, nonché la definizione di rendimenti di generazione in funzione del sistema impiantistico installato. Con l'ausilio del modulo aggiuntivo EC 720, il modello adattato all'utenza (approccio A3) verrà sottoposto a validazione: la calibrazione è stata ottenuta attraverso il raffronto dei consumi rilevati e quelli desunti, come indicati in fatturazione dal fornitore. Seguirà il calcolo della classe energetica attraverso l'applicazione del modulo EC 701 al modello con i parametri di progetto (approccio A1).

Il terzo capitolo proporrà il benchmarking, ossia il confronto delle pratiche e dei consumi dell'edificio oggetto di diagnosi rispetto ai best performers di settore, attraverso la definizione, il calcolo e il confronto degli Indici di Prestazione Energetica (IPE), ottenendo una visione generale delle aree di intervento e dei margini di efficientamento energetico dell'immobile.

Il quarto capitolo sarà incentrato sull'analisi degli interventi migliorativi scelti per il raggiungimento dell'obiettivo prefissato, ossia:

1. la sostituzione integrale dei serramenti;
2. l'installazione di caldaie a condensazione ad alta efficienza;
3. l'installazione di un impianto in PDC con integrazione di solare termico per l'ACS;
4. l'installazione del solare fotovoltaico;
5. il relamping;
6. la realizzazione dell'impianto di ventilazione meccanica.

Per ogni intervento vengono approfonditi:

- il dimensionamento e la progettazione preliminare;
- l'implementazione, attraverso il modulo EC 720, dello scenario sul software Edilclima;
- l'analisi economica attraverso gli indicatori economici principali.

Relativamente all'installazione del solare fotovoltaico sarà presente un'ulteriore approfondimento basato sulla realizzazione dei profili orari di consumo e di produzione fotovoltaica. L'obiettivo è la caratterizzazione giornaliera, per ogni mensilità dell'anno, delle percentuali di autoconsumo e immissione in rete dell'impianto e la realizzazione di un'analisi economica il più realistica possibile.

L'elaborato vuole evidenziare le potenzialità dell'applicazione della diagnosi energetica e degli interventi di riqualificazione ad essa seguenti nel settore edilizio. I risultati mostrano il possibile ottenimento di una riduzione dei consumi energetici e, conseguentemente, un minore impatto ambientale, un miglioramento della qualità della vita dei residenti, un aumento del valore complessivo del singolo immobile e del settore edile in generale.

ABSTRACT

This work has the objective to deepening the Energy Audit methodology, defined by means of the D. Lgs. 04/07/2014 n. 102 as the systematic procedure aimed at acquiring the consumption profile of the building, the identification and evaluation of technical-economic opportunities for energy saving, as well as the design of the related requalification interventions.

The script will explain the logic path which describes the main stages necessary for the energy diagnosis of a scholastic building in Rome. It will analyse the energy requalification of the school, aiming to the improvement of at least one energy class through the implementation of efficiency measures and the reduction of 20% of CO2 emissions.

The first chapter will focus on the study of the main structural and plant features, as well as the extraction and the analysis of consumption data related to electricity and natural gas carriers referred to the last years.

The second chapter will describe the energy modelling process carried out by means of the EC 700 software licensed by Edilclima. The objective is the determination of the building energy demand through the characterization of its losses, as well as the definition of generation efficiency as function of the generation system installed. With the support of the additional module EC 720, the tailored rating model (A3 approach) will be validated: the calibration will be performed through the comparison between the consumption calculated by means of the energy model and those obtained from the utility bills. Then it will follow the calculation of the energy class by the usage of the EC 701 module on the design rating model (A1 approach).

The third chapter will propose benchmarking: the comparison of practices and consumption of the building subjected to diagnosis respect to the best performers in the sector. The process is carried out by means of the definition, calculation and comparison of Energy Performance Indicators (EPI) obtaining a general view of the intervention areas and the efficiency improvements margins.

The fourth chapter will focus on the analysis of the improvement measures chosen to achieve the target:

1. complete replacement of windows;
2. installation of high efficiency condensing boilers;
3. installation of a heat pump system with solar thermal integration for ACS;
4. installation of solar photovoltaic generation system;
5. relamping;
6. installation of a mechanical ventilation system.

For each intervention will be explored:

- sizing and preliminary design;
- implementation, by means of EC 720 module, of the scenario on Edilclima software;
- economic analysis using main economic indicators.

Regarding the installation of the solar photovoltaic system it will be present a further study based on the realization of hourly consumption and photovoltaic production profiles. The objective is the daily characterization, for each month of the year, of the percentages of self-consumption and grid injection of the plant and the realization of a realistic economic analysis.

The thesis work aims to highlight the potential of the Energy Audit applications and the following redevelopment interventions in the construction sector. The results show the possible achievement of energy consumption reduction and consequently a lower environmental impact, an improvement in the residents quality of life, an increase in the value of the individual property and in the general construction sector.

SOMMARIO

INTRODUZIONE	9
LA CRISI ENERGETICA E LA RISPOSTA DELL'UNIONE EUROPEA.....	9
IL QUADRO NORMATIVO EUROPEO PER L'EFFICIENZA ENERGETICA.....	11
IL QUADRO NORMATIVO ITALIANO PER L'EFFICIENZA ENERGETICA	13
LA DIAGNOSI ENERGETICA.....	16
1 – CASO STUDIO: EDIFICIO DI TIPO SCOLASTICO	19
1.1 – LOCALIZZAZIONE TERRITORIALE.....	19
1.1.1 – INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	19
1.1.2 – VINCOLI URBANISTICI E PAESAGGISTICI	20
1.1.3 – DATI CLIMATICI.....	21
1.2 – ANALISI DEL FABBRICATO	23
1.3 – ANALISI DEL SISTEMA IMPIANTISTICO.....	28
1.3.1 – IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	28
1.3.2 – IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE.....	32
1.3.3 – TRASPORTO DI PERSONE E COSE.....	32
1.4 – ANALISI DEI CONSUMI.....	33
1.4.1 – CONSUMI DI GAS METANO	33
1.4.2 – CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA	39
2 – MODELLAZIONE ENERGETICA	43
2.1 – METODOLOGIA DI CALCOLO	43
2.2 – PROCEDURA DI UTILIZZO.....	44
2.3 – MODELLO DEL CASO STUDIO (EC 700)	47
2.3.1 – DATI GENERALI	47
2.3.2 – COMPONENTI INVOLUCRO.....	47
2.3.3 – INPUT GRAFICO E LOCALI CLIMATIZZATI	63
2.3.4 – SISTEMA IMPIANTISTICO	67
2.3.5 – RISULTATI DEL FABBRICATO E DI ENERGIA PRIMARIA	68
2.3.6 – DISAGGREGAZIONE DEI CONSUMI	71

2.4 – CLASSE ENERGETICA (EC 701)	72
2.5 – VALIDAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO (EC 720)	73
3 – BENCHMARKING DI SETTORE	74
3.1 – INDICATORI ENERGETICI NORMALIZZATI - RISCALDAMENTO	75
3.2 – INDICATORI ENERGETICI NORMALIZZATI – ENERGIA ELETTRICA	78
4 – INTERVENTI MIGLIORATIVI	80
4.1 – SOSTITUZIONE SERRAMENTI E CASSONETTI	82
4.1.1 – MODELLAZIONE COMPONENTI	82
4.1.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO	83
4.1.3 – ANALISI ECONOMICA.....	84
4.2 – CALDAIE A CONDENSAZIONE	85
4.2.1 – DIMENSIONAMENTO	85
4.2.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO	90
4.2.3 – ANALISI ECONOMICA.....	91
4.3 – ACS: POMPE DI CALORE E SOLARE TERMICO	92
4.3.1 – DIMENSIONAMENTO	92
4.3.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO	102
4.3.3 – ANALISI ECONOMICA.....	104
4.4 – SOLARE FOTOVOLTAICO	105
4.4.1 – DIMENSIONAMENTO	105
4.4.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO	114
4.4.3 – ANALISI ECONOMICA.....	115
4.5 – RELAMPING	116
4.5.1 – CALCOLO E VERIFICA ILLUMINOTECNICA	116
4.5.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO	121
4.5.3 – ANALISI ECONOMICA.....	122
4.6 – VENTILAZIONE MECCANICA (VMC)	123
4.6.1 – DIMENSIONAMENTO	123
4.6.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO	125

4.6.3 – ANALISI ECONOMICA.....	126
4.7 – SCENARIO COMPLESSIVO	127
5 – APPROFONDIMENTO SUL SOLARE FOTOVOLTAICO	130
5.1 – ANALISI CONSUMI E PRODUZIONE ISTITUTO SOCIALE	130
5.2 – ANALISI ISTITUTO MORVILLO (RIFERIMENTO SOCIALE).....	133
5.3 – ANALISI ISTITUTO MORVILLO (RIFERIMENTO PVGIS)	135
5.4 – ANALISI ECONOMICA	142
CONCLUSIONE.....	143
ELENCO DELLE FIGURE	144
ELENCO DELLE TABELLE.....	148
BIBLIOGRAFIA.....	154
SITOGRAFIA.....	154
SCHEDE TECNICHE.....	154

INTRODUZIONE

LA CRISI ENERGETICA E LA RISPOSTA DELL'UNIONE EUROPEA

Il termine crisi energetica individua una situazione prolungata in cui si registra una scarsa quantità delle fonti per l'approvvigionamento di un Paese o a livello globale. Le cause responsabili di una crisi energetica sono legate a risorse finite come i combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturale). Al contrario, le fonti energetiche rinnovabili essendo risorse sostanzialmente inesauribili, non sono direttamente collegabili a fenomeni di questo tipo. Una possibile causa è legata all'utilizzo intensivo di una specifica fonte: il sovraconsumo può portare a situazioni di scarsa reperibilità che nel lungo periodo possono provocare un forte innalzamento dei prezzi. Un'ulteriore causa strettamente legata a questo fenomeno è l'utilizzo non responsabile, e per questo inefficiente, delle risorse: per esempio la dipendenza da un unico fornitore o da una sola fonte energetica.

La crisi energetica attuale ha origine antecedente allo scoppio della guerra in Ucraina nel febbraio 2022. L'aumento dei prezzi iniziò a registrarsi già nel 2021. Tra le ragioni si possono citare le condizioni climatiche estreme e sempre più imprevedibili degli ultimi anni: ne sono un esempio le ondate di calore estive e la limitata disponibilità di risorse idriche. La congiuntura sfavorevole è peggiorata dopo l'invasione dell'Ucraina da parte della Russia: i prezzi relativi al Gas Metano sono aumentati esponenzialmente, toccando valori record in Europa, con effetti negativi anche sui prezzi medi dell'energia elettrica. Proprio l'Europa è stata duramente colpita: la sua vulnerabilità è rintracciabile nella sua storica dipendenza dalle fonti energetiche russe.

In risposta all'attuale scenario politico-economico, l'Europa ha accelerato la transizione verso l'energia pulita e la diversificazione delle forniture. Il piano REPowerEU, combinato ad una serie di misure di riforma strutturale dei sistemi energetici nazionali, ha permesso di scongiurare interruzioni dell'approvvigionamento e di allentare la pressione generatasi sui prezzi, sul mercato e quindi sui consumatori. Il piano REPowerEU prevede il raggiungimento della sicurezza energetica nazionale e in parallelo la realizzazione di azioni volte alla mitigazione della crisi climatica. I principali punti d'azione sono:

- Il risparmio energetico costituisce una delle misure più immediate ed efficaci per la riduzione dei consumi. La Commissione europea ha proposto un aumento dal 9% al 13% dell'obiettivo di efficienza energetica obbligatorio previsto dal Green Deal europeo. In aggiunta gli Stati membri sono stati invitati ad incentivare una politica di utilizzo responsabile dell'energia e a favorire l'utilizzo di sistemi energetici efficienti attraverso apposite misure fiscali.
- La diversificazione dell'approvvigionamento condotta dall'Europa ha garantito il raggiungimento di livelli record di importazione di GNL e un aumento delle forniture di gas via gasdotti. Per l'ottimizzazione di questo provvedimento è stata recentemente creata la piattaforma UE per l'energia che permette l'acquisto aggregato di gas, GNL e idrogeno rinnovabile. Questa politica garantirà partnership durature con i fornitori, nonché la cooperazione, sostenuta dal Global Gateway, in materia di idrogeno e tecnologie rinnovabili.

- La commissione ha proposto di aumentare dal 40% al 45% la copertura di energia elettrica attraverso fonti rinnovabili entro il 2030. Questo provvedimento punta ad aumentare l'indipendenza della generazione di energia elettrica al servizio dell'edilizia, dell'industria e dei trasporti, dando un grande impulso alla transizione.
- Una ambiziosa riduzione del consumo di combustibili fossili all'interno dei processi industriali e del settore dei trasporti attraverso l'aumento dell'efficienza di generazione, la sostituzione dei combustibili, l'elettrificazione e la diffusione di idrogeno rinnovabile.

I risultati derivanti delle politiche sopracitate sono stati riportati nella relazione dello stato dell'Unione dell'energia. Questi sottolineano:

la riduzione nel 2023 della dipendenza dai combustibili di origine russa, con l'eliminazione graduale delle importazioni di carbone e con la riduzione rispettivamente del 90% e del 75% delle importazioni di petrolio e gas naturale;

- la riduzione delle emissioni di CO₂ del 3% nel 2022 e del 32,5% rispetto ai livelli del 1990;
- la riduzione del fabbisogno di gas naturale del 18% rispetto alle cinque annualità precedenti;
- il riempimento degli impianti di stoccaggio del gas al 98% a inizio 2023;
- la piattaforma dell'UE per l'energia ha firmato tre cicli di aggregazione per la domanda di gas;
- incremento nel 2022 della capacità fotovoltaica del 60% rispetto al 2021;
- incremento nel 2022 della capacità eolica on-shore e off-shore del 45% rispetto al 2021;
- incremento nel 2022 dell'energia elettrica prodotta attraverso fonti rinnovabili del 39%;
- definizione del 42,5% come obiettivo minimo della quota di energia rinnovabile entro il 2030.

Appare evidente come l'UE debba necessariamente mantenere una politica adeguata per rafforzare la leadership industriale nel nuovo contesto globale, garantendo una produzione di energia economicamente conveniente e industrialmente competitiva, anche attraverso investimenti nel campo delle tecnologie pulite.

IL QUADRO NORMATIVO EUROPEO PER L'EFFICIENZA ENERGETICA

- L'Europa mosse il primo passo dal punto di vista normativo in materia di efficienza energetica nel settore edilizio a partire dal 1993, con la Direttiva 1993/76/CE, detta anche SAVE. L'obiettivo di tale direttiva era legato alla limitazione delle emissioni di CO₂ attraverso la realizzazione di una serie di provvedimenti legati all'efficientamento energetico. In particolare:
 - certificazione energetica degli edifici;
 - fatturazione delle spese in funzione del consumo effettivo;
 - finanziamento tramite terzi degli interventi di efficienza riguardanti il settore pubblico;
 - isolamento termico degli edifici di nuova costruzione;
 - diagnosi energetica di imprese energivore.
- In occasione del Protocollo di Kyoto nel 1997 si fecero evidenti le conseguenze dei cambiamenti climatici: questo portò i Paesi industrializzati ad impegnarsi nella riduzione delle emissioni di alcuni gas serra, responsabili del riscaldamento globale.
- Questa situazione spinse l'Europa ad intervenire attraverso l'emanazione della prima di una serie di direttive volte all'incremento dell'efficienza energetica nell'edilizia: la Direttiva Europea 2002/91/CE, nota anche come EPBD (Energy Performance of Building Directive). Le disposizioni contenute riguardavano:
 - la metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici, considerando i consumi legati al riscaldamento, al raffrescamento, all'ACS, alla ventilazione e all'illuminazione;
 - l'applicazione di requisiti minimi in termini di rendimento energetico a edifici di nuova costruzione o sottoposti a ristrutturazione importante;
 - la certificazione energetica;
 - l'ispezione delle caldaie e dei sistemi di condizionamento, nonché una perizia degli impianti.

La Direttiva comportava l'obbligo della compilazione dell'attestato di certificazione energetica (ACE) in caso di compravendita, locazione o nuova costruzione di un edificio.
- Nel 2010 venne pubblicata la Direttiva Europea 2010/31/UE, detta EPBD 2 "Recast", la quale integrò le precedenti disposizioni della Direttiva 2002/91/CE, tenendo in considerazione le condizioni meteo-climatiche e la zona climatica di riferimento. All'interno del provvedimento vi era l'affinamento della metodologia di calcolo prestazionale degli edifici: da quel momento sarebbero stati considerati, oltre alle proprietà termiche, l'orientamento dell'edificio, la presenza di sistemi solari passivi e di protezione solare, le condizioni climatiche interne e gli apporti interni. Il calcolo si differenzia in base alla categoria dell'edificio: per nuove costruzioni viene data importanza alla generazione decentrata basata su fonti rinnovabili. Si deve a questa direttiva l'obbligo del vincolo NZEB (edifici a energia quasi zero) per tutte le nuove costruzioni.

- Il 2012 vide la pubblicazione della Direttiva Europea 2012/27/UE nota come EED (Energy Efficiency Directive), intesa a stabilire un quadro per il conseguimento dell'obiettivo relativo al miglioramento dell'efficienza energetica del 20% entro il 2020. La direttiva prevedeva:
 - l'impegno degli Stati membri affinché i fornitori e distributori di energia riducessero progressivamente dell'1,5% entro il 31 dicembre 2020 il consumo di energia annuale
 - l'impegno degli Stati membri all'incremento annuo del 3%, a far data dal 1^a gennaio 2014, della superficie utile dell'intero patrimonio della pubblicazione amministrazione oggetto di ristrutturazione, nel rispetto dei requisiti minimi della Direttiva 2010/31/UE;
 - l'acquisto da parte degli Stati membri di prodotti, servizi ed edifici ad alta efficienza;
 - la mobilitazione da parte degli Stati membri degli investimenti nella ristrutturazione degli edifici residenziali e commerciali, pubblici e privati.
 - l'impegno degli Stati membri affinché i clienti finali di energia ricevano contatori individuali per la misurazione dei consumi effettivi.

- La Direttiva Europea 2018/844/UE, detta anche EPBD 3, risulta essere la più recente revisione della Direttiva EPBD 2, definendo un più completo quadro legislativo volto al raggiungimento dei nuovi obiettivi europei al 2030 e al 2050 in materia di energia e clima. Il testo punta a:
 - accelerare la ristrutturazione degli edifici esistenti;
 - integrare le strategie di ristrutturazione a lungo termine per favorire la realizzazione di edifici a emissioni zero entro il 2050;
 - promuovere l'uso di tecnologie informatiche intelligenti (ICT) per efficientare gli edifici;
 - dare impulso alla mobilità elettrica e alla realizzazione delle infrastrutture adeguate.

La direttiva aggiorna le misure di promozione dei sistemi di automazione e controllo degli impianti tecnologici, noti con l'acronimo BACS (Building Automation and Control System), con l'obiettivo di ottimizzare la gestione degli impianti e di ridurre i consumi di energia.

IL QUADRO NORMATIVO ITALIANO PER L'EFFICIENZA ENERGETICA

- L'interruzione degli approvvigionamenti di petrolio dai Paesi dell'OPEC causò la crisi energetica del 1973, generando una crescita incontrollata del prezzo del greggio. L'instabilità dei territori mediorientali, epicentro della guerra arabo-israeliana, favorì una profonda riflessione sulle fonti energetiche. La prima normativa energetica italiana nacque tre anni dopo: la Legge 373/76 prescrisse l'isolamento termico degli edifici, nuove norme sulla progettazione degli impianti termici e nuove sanzioni per l'inosservanza delle regole. Questa legge introdusse: il coefficiente di dispersione volumico; i Gradi Giorno; le zone climatiche; il rapporto S/V.
- La Legge 19/91 fu la prima normativa finalizzata alla regolamentazione delle modalità di progettazione e gestione degli edifici con i relativi impianti. Gli obiettivi principali erano:
 - l'uso consapevole dell'energia e il risparmio energetico;
 - la salvaguardia e la tutela dell'ambiente;
 - il benessere degli individui.

Per raggiungere gli obiettivi, la Legge 10 prevedeva la verifica del grado di isolamento termico delle pareti e dei solai per il contenimento delle dispersioni, prevedendo una valutazione del fabbisogno energetico e, per gli edifici pubblici l'obbligo del suo soddisfacimento attraverso una quota di fonti rinnovabili, salvo impedimenti tecnico-economici.

- Il DPR 412/93 regolamentò la Legge 10 attraverso norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici. Il decreto introduceva:
 - la classificazione del territorio in zone climatiche in funzione dei Gradi Giorno;
 - la classificazione degli edifici in base alla loro destinazione d'uso;
 - la definizione dei criteri di progettazione energetica attraverso la determinazione del FEN (Fabbisogno Energetico Normalizzato) e del rendimento globale stagionale.

Il FEN anticipava i moderni indici di prestazione e definiva la quantità di energia primaria necessaria a mantenere, per un anno, la temperatura degli ambienti riscaldati a 20°C, considerando un adeguato ricambio dei volumi d'aria in base alla destinazione d'uso del locale.

- L'Italia con il Dlgs 192/2005 recepì la Direttiva Europea SAVE identificando i criteri di efficientamento energetico degli edifici di nuova costruzione e di quelli già esistenti. Gli obiettivi del decreto prevedevano:
 - la definizione del metodo di calcolo e dei requisiti minimi delle prestazioni degli edifici;
 - la definizione dei criteri generali per la certificazione energetica;
 - ispezioni periodiche agli impianti;
 - criteri di qualificazione degli esperti;
 - la promozione dell'uso razionale dell'energia per la riduzione dei consumi.

- Il Dlgs 311/2006 si pose come integrazione al Dlgs 192/2005, apportando alcuni correttivi e rendendo i limiti da verificare più rigorosi. Il principale parametro introdotto fu l'Indice di Prestazione Energetica (EPI) in funzione della zona climatica e del fattore di forma dell'edificio. Il relativo Attestato di Qualificazione Energetica (AQE) riportava:
 - i fabbisogni di energia primaria;
 - la classe energetica di appartenenza dell'edificio.
- La Legge 90/2013 modificò il Dlgs 192/2005 attraverso il recepimento della Direttiva 2010/31/CE. La certificazione energetica cambiò denominazione in APE (Attestato di Prestazione Energetica), diventando rilasciabile dal professionista incaricato sotto forma di dichiarazione sostitutiva di atto notorio. Una delle normative tecniche più importanti per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici divenne la UNI/TS 11300, introducendo una metodologia di calcolo unica, suddivisa in 6 parti:
 1. determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva e invernale;
 2. determinazione del fabbisogno di energia primaria e rendimenti di climatizzazione invernale per l'ACS, l'illuminazione e la ventilazione;
 3. determinazione del fabbisogno di energia primaria e rendimenti di climatizzazione estiva;
 4. utilizzo di fonti di energia rinnovabile per la climatizzazione invernale e per l'ACS;
 5. calcolo dell'energia primaria da fonti di energia rinnovabile;
 6. determinazione del fabbisogno di energia per ascensori o scale mobili.
- In Italia la Direttiva Europea 2012/27/UE venne recepita attraverso il Dlgs 102/2014. Il decreto introdusse un programma di interventi migliorativi per gli edifici della pubblica amministrazione centrale, nonché il vincolo di acquisto di prodotti e servizi ad elevata efficienza energetica.

Per quanto concerne il settore industriale, le aziende energivore dal 5 dicembre 2015 sono sottoposte a diagnosi energetiche, oltretutto nella previsione di un potenziamento dei certificati bianchi, volti ad incentivare gli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica previsti dai rapporti di diagnosi.

La costruzione di impianti di generazione di energia elettrica o termica con potenza maggiore ai 20 MW venne subordinata alla preventiva analisi dei costi-benefici.

Venne dato avvio all'analisi per l'individuazione delle aree con maggiore potenziale per l'installazione del teleriscaldamento.

- Più recentemente, il Dlgs 192/2015 ha dato pienezza al quadro normativo in materia di efficienza energetica, definendo il campo di applicazione della Legge 90/2013 attraverso tre importanti provvedimenti:

- il D.M. Requisiti Minimi ha stabilito le prescrizioni e i requisiti minimi di efficienza degli edifici sottoposti a ristrutturazione importante o di nuova costruzione;
 - il D.M. Linee Guida APE ha stabilito le modalità di elaborazione dell'APE;
 - il D.M. Relazione Tecnica ha stabilito gli schemi e le modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica prevista dalla Legge 10.
-
- Il Dlgs 48/2020 ha dato attuazione alla Direttiva Europea 2018/844/UE modificando il Dlgs 192/2005, perseguendo l'obiettivo di definire i criteri per la strategia di ristrutturazione a lungo termine del parco immobiliare. Ulteriori obiettivi sono stati:
 - l'introduzione di novità per l'APE;
 - la modifica della definizione di impianto termico;
 - l'esclusione degli edifici inagibili dal campo di applicazione del Dlgs 192/2005;
 - l'introduzione degli obblighi per l'installazione di infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici.

 - Da ultimo, il Dlgs 73/2020 ha dato attuazione alla Direttiva Europea 2018/844/UE modificando il Dlgs 102/2014. Nel decreto sono presenti una serie di novità, facenti parte di una strategia a lungo termine, riguardanti il miglioramento dell'efficienza, al risparmio energetico nazionale e alla decarbonizzazione dell'economia.

LA DIAGNOSI ENERGETICA

La normativa vigente identifica la diagnosi energetica come la procedura più appropriata a caratterizzare la gestione energetica di un'attività (civile, industriale, dei settori primario e terziario), fornendo una visione precisa e sistematica di come venga sfruttata l'energia dal momento dell'acquisto fino all'utilizzo finale, identificando e quantificando le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo tecnico-economico. Viene preso in considerazione:

- come l'energia entra nel sistema oggetto di analisi;
- come viene ripartita ed utilizzata;
- come viene trasformata all'interno del processo di utilizzo;
- come può essere utilizzata in modo efficace ed efficiente.

Il processo di diagnosi non è prescrittivo: ogni soggetto è libero di redigere il rapporto seguendo i propri criteri, purché nel rispetto delle previsioni contenute nell'Allegato 2 del Dlgs 102/2014. Quest'ultimo definisce i criteri minimi che deve possedere un audit energetico di qualità:

- deve essere basato su dati operativi di consumo aggiornati, misurati e tracciabili;
- deve comprendere un'analisi dettagliata dei profili di consumo energetico;
- deve basarsi sull'analisi del costo del ciclo di vita, tenendo in considerazione i tassi di sconto, i benefici e i valori residuali degli investimenti a lungo termine;
- i dati e i valori devono essere sufficientemente precisi per tracciare un quadro fedele della prestazione energetica del caso studio, individuando le opportunità di miglioramento.

L'Articolo 8 del Dlgs 102/2014 prevede che i soggetti obbligati a svolgere la diagnosi energetica a far data dal 5 dicembre 2015 e successivamente ogni 4 anni) siano le grandi imprese e quelle a forte consumo di energia. L'obbligo non si applica alle Amministrazioni Pubbliche individuabili nell'elenco ISTAT redatto in accordo alla Legge 197/2009.

In seguito il Dlgs 73/2020 ha introdotto il Comma 3bis, esonerando dall'obbligo di diagnosi le grandi imprese con un consumo annuo, tendo conto di tutti i siti di pertinenza, inferiore a 50 tep.

La diagnosi costituisce il primo passo nello sviluppo del piano energetico aziendale, fornendo all'impresa l'opportunità di comprendere come viene utilizzata l'energia, individuando le aree di miglioramento e gli interventi da effettuare per ridurre i consumi e aumentare l'efficienza di processo. La diagnosi prevede inoltre il confronto dei consumi energetici dell'impresa con le prestazioni tipiche del settore merceologico di riferimento.

L'applicazione degli interventi di miglioramento energetico permette di:

- ridurre i consumi aumentando l'efficienza energetica;
- ridurre il peso della spesa energetica sul fatturato;
- ridurre le emissioni di CO₂ e gas serra.

La norma tecnica EN 16247 fornisce le caratteristiche di una diagnosi di buona qualità, caratterizzandone i requisiti, la metodologia e i risultati attesi, nonché la definizione delle principali fasi di analisi.

In primo luogo sono previsti dei contatti preliminari, cui viene fatto seguire un incontro di avvio per allineare i soggetti partecipanti in merito agli obiettivi da perseguire e all'esigenza di accuratezza della diagnosi. In questa fase vengono pianificate le attività e nominate le figure che faranno da interfaccia con l'auditor.

In seguito verranno raccolte le informazioni necessarie e ritenute utili a comprendere le fonti di approvvigionamento, il processo produttivo e l'organizzazione del lavoro. L'auditor si occuperà poi di ispezionare il campo oggetto di analisi, individuando i principali componenti, le modalità operative e l'atteggiamento degli utenti.

In fase di analisi l'auditor deve determinare la prestazione energetica dell'edificio, realizzando un quadro di riferimento su cui andranno pianificati gli interventi migliorativi. Questi verranno valutati sulla base di specifici parametri tecnico-economici e ordinati in una graduatoria secondo i criteri precedentemente concordati con l'organizzazione.

Nell'incontro finale l'auditor consegnerà il rapporto di diagnosi presentandone i risultati per agevolare il processo decisionale dell'organizzazione.

Come previsto dalla normativa di riferimento, la valutazione degli indici di prestazione energetica con i benchmark di settore, costituiscono una parte fondamentale del processo di diagnosi. Il benchmarking costituisce uno strumento di analisi utile per confrontare i propri consumi con quelli dei best performers di settore. Questo permette la valutazione delle prestazioni e delle possibilità di miglioramento tramite l'analisi delle tendenze di consumo, dei consumi specifici e dei costi dell'energia. Gli indici di prestazione energetica (IPE) sono valori che assumono solitamente la forma di un consumo specifico e vengono spesso utilizzati per il benchmarking prestazionale, permettendo il confronto con gli standard di settore.

Per identificare rigorosamente il consumo del sito oggetto di analisi e poterne definire gli indici di prestazione energetica, è necessario predisporre un modello energetico che ne evidenzi le criticità dal punto di vista del fabbricato e degli impianti. Grazie al modello è possibile definire i consumi dell'impianto in funzione delle condizioni operative, studiare le variabili che lo regolano e stimare i benefici degli interventi di efficientamento energetico sui costi e sugli indicatori.

L'obiettivo principale della diagnosi è l'individuazione degli interventi utili al miglioramento dell'efficienza e dei consumi energetici. Possono essere considerate quattro linee di intervento:

- valutazione di combustibili alternativi;
- miglioramento dell'efficienza dei sistemi di conversione dell'energia;
- miglioramento dell'efficienza della rete di distribuzione dell'energia;
- valutazione dell'introduzione di sistemi di recupero o integrazione.

La fattibilità tecnico-economica rappresenta il parametro fondamentale per la scelta degli interventi da effettuare. Dal punto di vista tecnico vengono presi in considerazione:

- la disponibilità di una tecnologia, l'affidabilità, la manutenzione e lo spazio d'installazione;
- l'impatto degli interventi migliorativi sulla sicurezza, sulla produzione e sulla qualità del processo.

L'analisi economica degli scenari preventivati può essere condotta prendendo in considerazione gli indicatori economici più importanti, ad esempio:

- Valore Attuale Netto (VAN);
- Tempo di Ritorno (PBT);
- Tasso Interno di Rendimento (TIR).
- Indice di Prestazione (IP).

Gli interventi verranno quindi classificati in base alle esigenze dei committenti e proposti all'interno del report di diagnosi.

1 – CASO STUDIO: EDIFICIO DI TIPO SCOLASTICO

1.1 – LOCALIZZAZIONE TERRITORIALE

1.1.1 – INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'edificio oggetto del progetto è la Scuola primaria "S. Biagio Platani", facente parte dell'Istituto Comprensivo "Francesca Morvillo", sita in Via San Biagio Platani 260-268, Municipio VI, Roma. In Figura 1, 2 e 3 è riportata la localizzazione aerea ottenuta con l'ausilio di Google Earth.

In riferimento al DPR n.412 del 26 Agosto 1993 il comune di Roma è classificato nella zona climatica D, con valore di gradi-giorno compreso tra 1400 e 2100, mentre l'immobile, in base alla destinazione d'uso definita nel medesimo decreto, rientra nella categoria E.7 (edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli assimilabili).

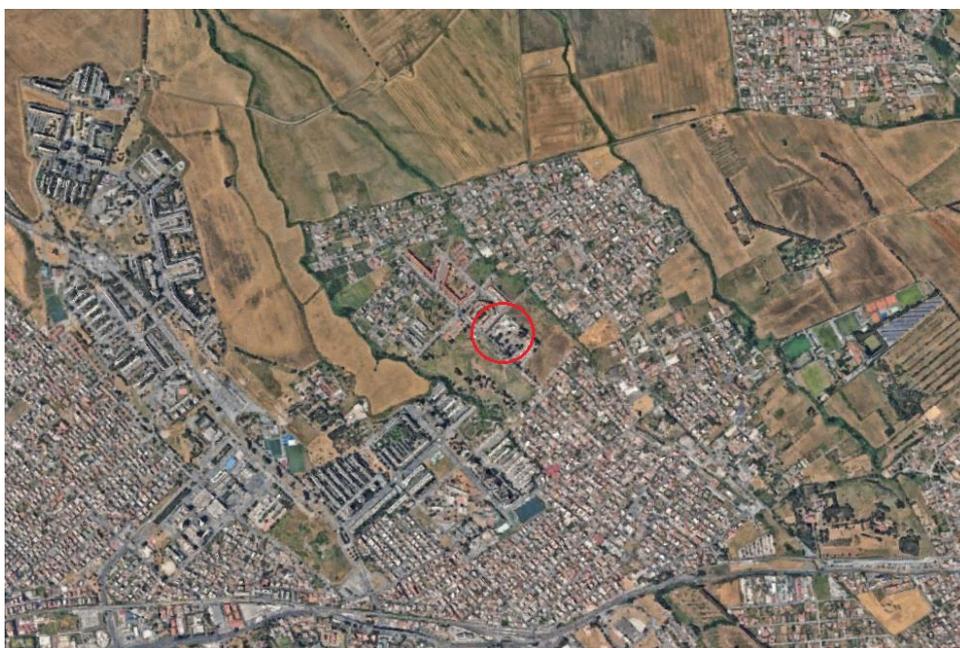


Figura 1 - Localizzazione dell'edificio (Fonte: Google Earth)



Figura 2 – Visione aerea dell'edificio n°1 (Fonte: Google Earth)

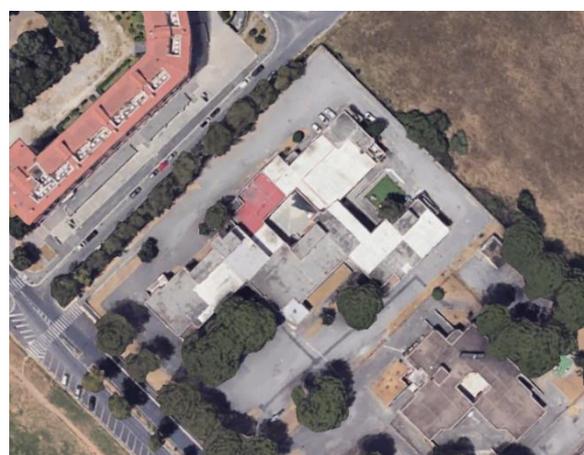


Figura 3 - Visione aerea dell'edificio n°2 (Fonte: Google Earth)

1.1.2 – VINCOLI URBANISTICI E PAESAGGISTICI

L'edificio non rientra nell' "Ambito di Programmazione Strategica", ovvero l'insieme di cinque zone territoriali che assumono rilievo all'interno del piano di riqualificazione urbana, definito attraverso l'allegato D7, raffigurato in Figura 4, del Piano Regolatore Generale del comune di Roma.

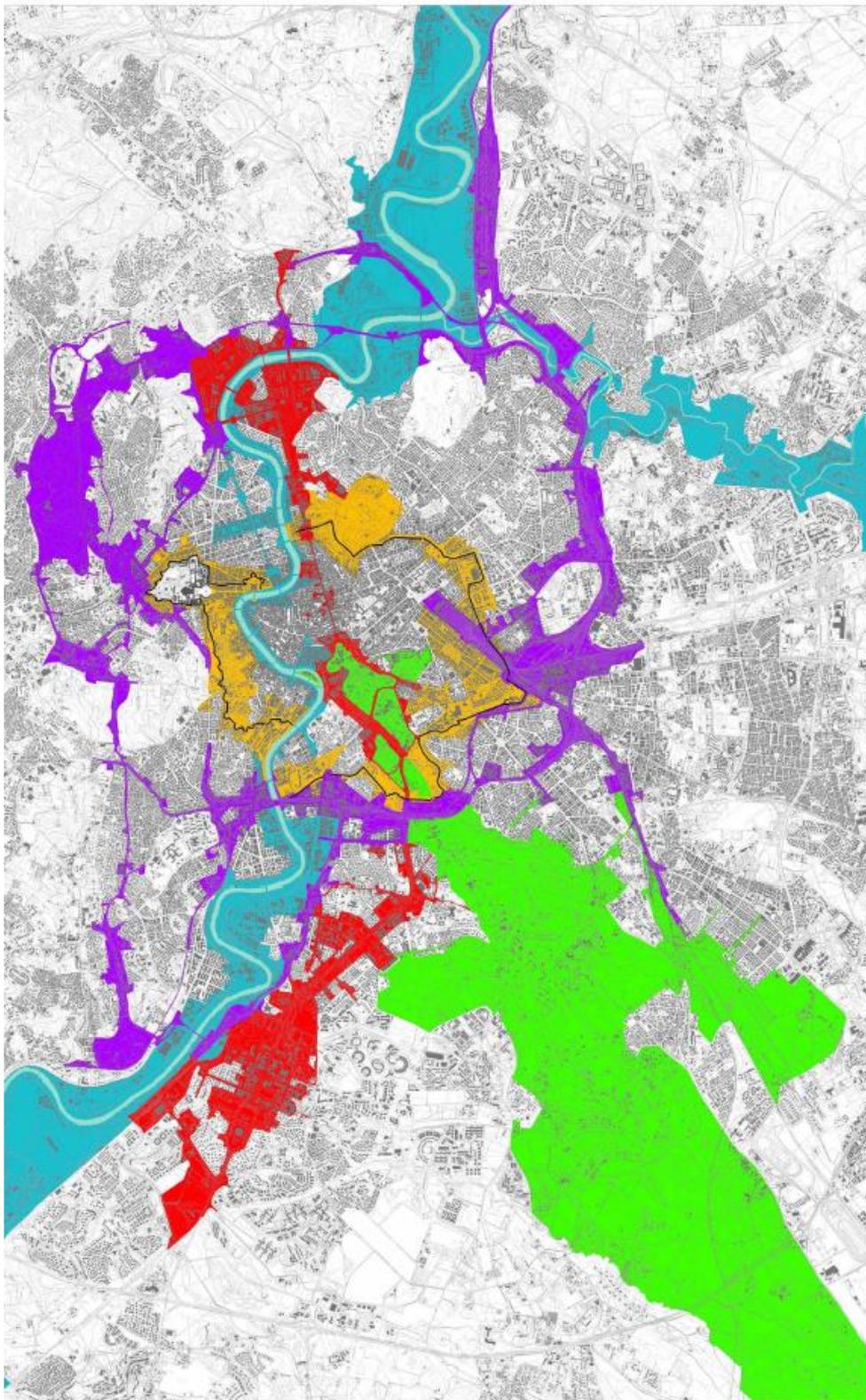


Figura 4 - Allegato D7 (scala 1:20.000) (Fonte: PRG Roma)

Analogamente, come mostrato dalla Figura 5, l'edificio non risulta legato ad alcun vincolo paesaggistico raffigurato nell'allegato B, Tavola 24-374, del Piano Territoriale Paesaggistico Regionale del Lazio, approvato con il DCR n.5 del 21 Aprile 2021.

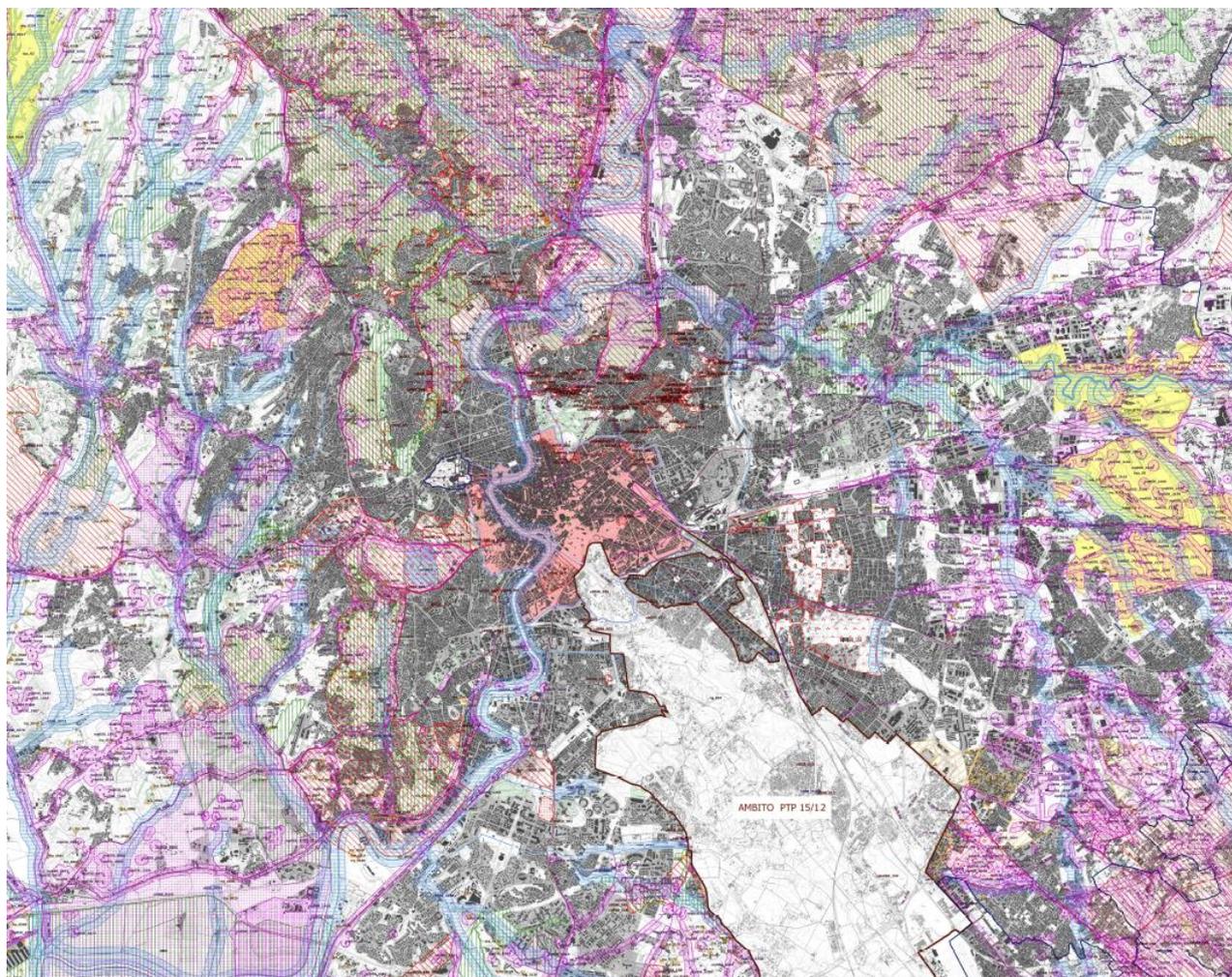


Figura 5 – Dettaglio della Tavola 24-374 (scala 1:25.000) (Fonte: PTPR Roma)

1.1.3 – DATI CLIMATICI

I dati climatici relativi all'area di analisi sono stati ottenuti attraverso il servizio di monitoraggio microclimatico di "ARPA Lazio" ed estratti dalla stazione "CNR – Tor Vergata". I dati collazionati su base quattoraria, sono stati mediati mensilmente per le annualità di riferimento 2020-21-22-23.

I dati estratti sono:

- Temperatura media esterna [°C];
- Radiazione solare globale sul piano orizzontale [W/m²].

Partendo dai valori di radiazione solare globale, sono state ricavate le relative grandezze di radiazione diretta e diffusa. I risultati sono stati ottenuti attraverso la proporzione con i corrispondenti valori standard previsti per la radiazione diretta e diffusa nella fascia climatica D.

Per l'analisi è stato necessario ricavare anche i valori dei gradi-giorno per ogni annualità. Secondo il DPR n.412 del 26 Agosto 1993, essi vengono definiti come “la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera; l'unità di misura utilizzata è il grado-giorno [GG]”.

In Tabella 1 sono riportati tutti i dati climatici (estratti e ricavati) utilizzati per l'analisi.

ANNO	MESE	T media (°C)	RG (W/m2)	RG diretta (W/m2)	RG diffusa (W/m2)	GG	Totale GG
2020	GENNAIO	8,4	215	119	95	358	1.456
2020	FEBBRAIO	11,0	303	182	121	253	
2020	MARZO	11,3	336	205	132	270	
2020	APRILE	14,2	412	251	161	86	
2020	MAGGIO	19,7	445	263	182	0	
2020	GIUGNO	21,7	480	303	177	0	
2020	LUGLIO	25,8	499	344	155	0	
2020	AGOSTO	26,5	451	297	154	0	
2020	SETTEMBRE	22,5	378	230	148	0	
2020	OTTOBRE	15,8	267	156	111	0	
2020	NOVEMBRE	13,6	225	124	102	192	
2020	DICEMBRE	10,4	154	86	68	297	
2021	GENNAIO	8,3	154	85	68	364	1.504
2021	FEBBRAIO	11,0	258	155	103	251	
2021	MARZO	10,6	337	205	132	291	
2021	APRILE	12,1	350	213	137	119	
2021	MAGGIO	17,6	463	273	189	0	
2021	GIUGNO	23,5	442	279	163	0	
2021	LUGLIO	26,2	445	307	138	0	
2021	AGOSTO	26,1	432	285	147	0	
2021	SETTEMBRE	22,8	372	226	146	0	
2021	OTTOBRE	16,0	287	168	119	0	
2021	NOVEMBRE	14,1	339	186	153	178	
2021	DICEMBRE	10,3	238	133	105	301	
2022	GENNAIO	7,8	205	114	91	379	1.511
2022	FEBBRAIO	10,2	273	164	109	275	
2022	MARZO	10,2	362	221	142	304	
2022	APRILE	13,9	403	246	157	92	
2022	MAGGIO	20,5	428	253	175	0	
2022	GIUGNO	25,9	454	287	167	0	
2022	LUGLIO	28,2	501	346	156	0	
2022	AGOSTO	26,7	456	301	155	0	
2022	SETTEMBRE	22,2	358	218	140	0	
2022	OTTOBRE	18,8	261	153	108	0	
2022	NOVEMBRE	13,2	125	69	56	205	
2022	DICEMBRE	11,7	105	58	46	256	
2023	GENNAIO	8,4	119	66	53	360	1.462
2023	FEBBRAIO	8,8	213	128	85	314	
2023	MARZO	12,2	296	180	116	240	
2023	APRILE	13,1	370	226	144	104	
2023	MAGGIO	17,3	321	190	131	0	
2023	GIUGNO	22,8	420	265	155	0	
2023	LUGLIO	27,3	410	283	127	0	
2023	AGOSTO	25,3	395	261	135	0	
2023	SETTEMBRE	23,2	366	223	144	0	
2023	OTTOBRE	20,6	266	156	111	0	
2023	NOVEMBRE	14,2	137	75	62	175	
2023	DICEMBRE	11,3	88	49	39	269	

Tabella 1- Dati climatici CNR – Tor Vergata 2020-21-22-23 (Fonte: ARPA Lazio)

1.2 – ANALISI DEL FABBRICATO



Figura 6 – Dettaglio facciata Sud-Ovest



Figura 7 – Dettaglio facciata Sud-Est



Figura 8 – Dettaglio facciata Nord e copertura

La scuola è stata edificata negli anni '80 e presenta una pianta a forma irregolare eretta su 3 piani fuori terra. La vista esterna è raffigurata in Figura 6, 7, 8. Internamente i locali sono così disposti:

- al piano terra (1^a p. f.t.) sono presenti l'ingresso principale ed alcuni accessi secondari provvisti di rampe, le aule, gli uffici, i servizi igienici, la palestra, gli spogliatoi, la cucina e la mensa;
- al primo piano (2^a p. f.t.) sono presenti le aule, una biblioteca ed i servizi igienici.

L'accesso ai piani è garantito attraverso la presenza di un ascensore e attraverso i vani scala, sia interni che esterni. La struttura dell'edificio è realizzata in calcestruzzo armato; le superfici opache verticali esterne sono realizzate in laterizio e presentano una finitura di intonaco; la copertura piana si articola su diversi livelli ed è in latero-cemento; i serramenti presentano un doppio vetro non trattato con telaio in acciaio privo di taglio termico. La scuola si trova in una posizione arretrata e leggermente rialzata rispetto alle strade limitrofe grazie alla presenza di un cortile interno, corredato da molteplici alberi, che si estende lungo il perimetro dell'edificio.

L'ingresso principale al cortile è posizionato lungo il lato Sud dell'edificio e si affaccia direttamente su Via S. Biagio Platani. Il prospetto è raffigurato in Figura 9.

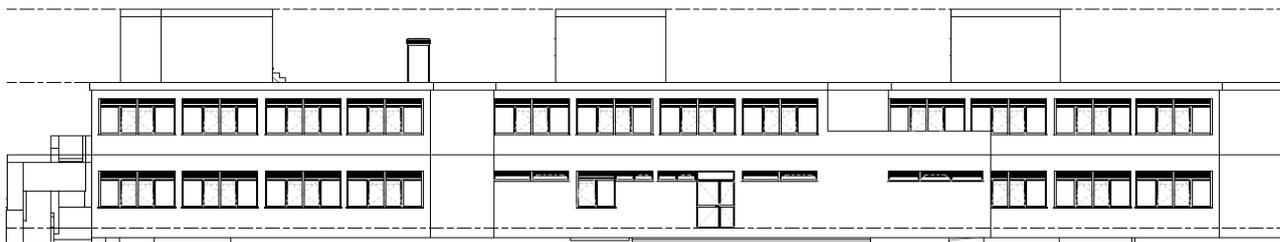


Figura 9 – Prospetto Sud

Dal lato Est la scuola affaccia direttamente sulla “Morvillo Succursale”, avente altezza di 3,5 m circa, raggiungibile attraverso un giardino di pertinenza. Il prospetto è raffigurato in Figura 10.

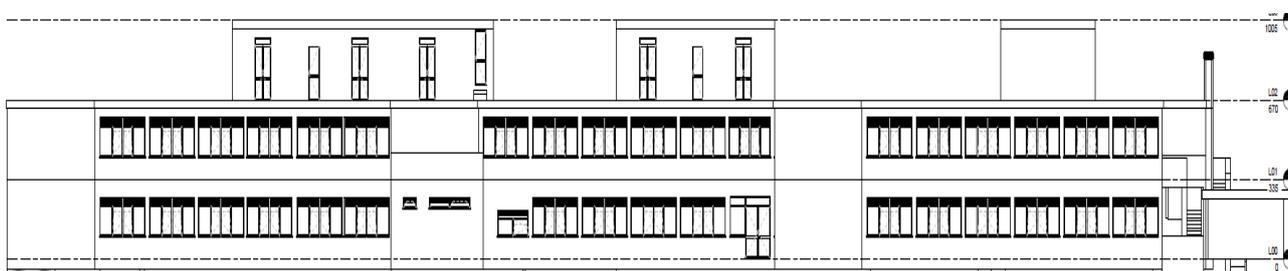


Figura 10 – Prospetto Est

Dal lato Nord il complesso confina con terreni non edificati. Il prospetto è raffigurato in Figura 11.



Figura 11 – Prospetto Nord

Nell'area limitrofa al cortile, nel lato Ovest della scuola, si affaccia una fila di alberi con altezza non trascurabile, posizionata immediatamente al di fuori della recinzione; dall'altra parte di Via Sant'Alfio è presente un condominio con 5 piani fuori terra.

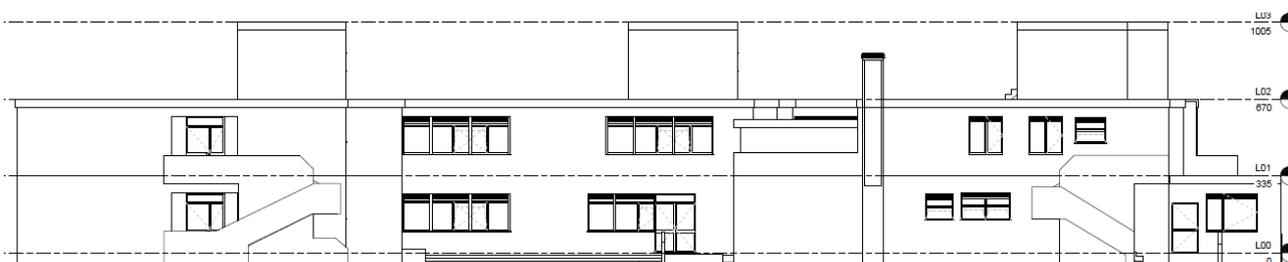


Figura 12 – Prospetto Ovest

Per completezza, in Figura 13, 14 e 15 vengono riportate le piante dell'edificio.

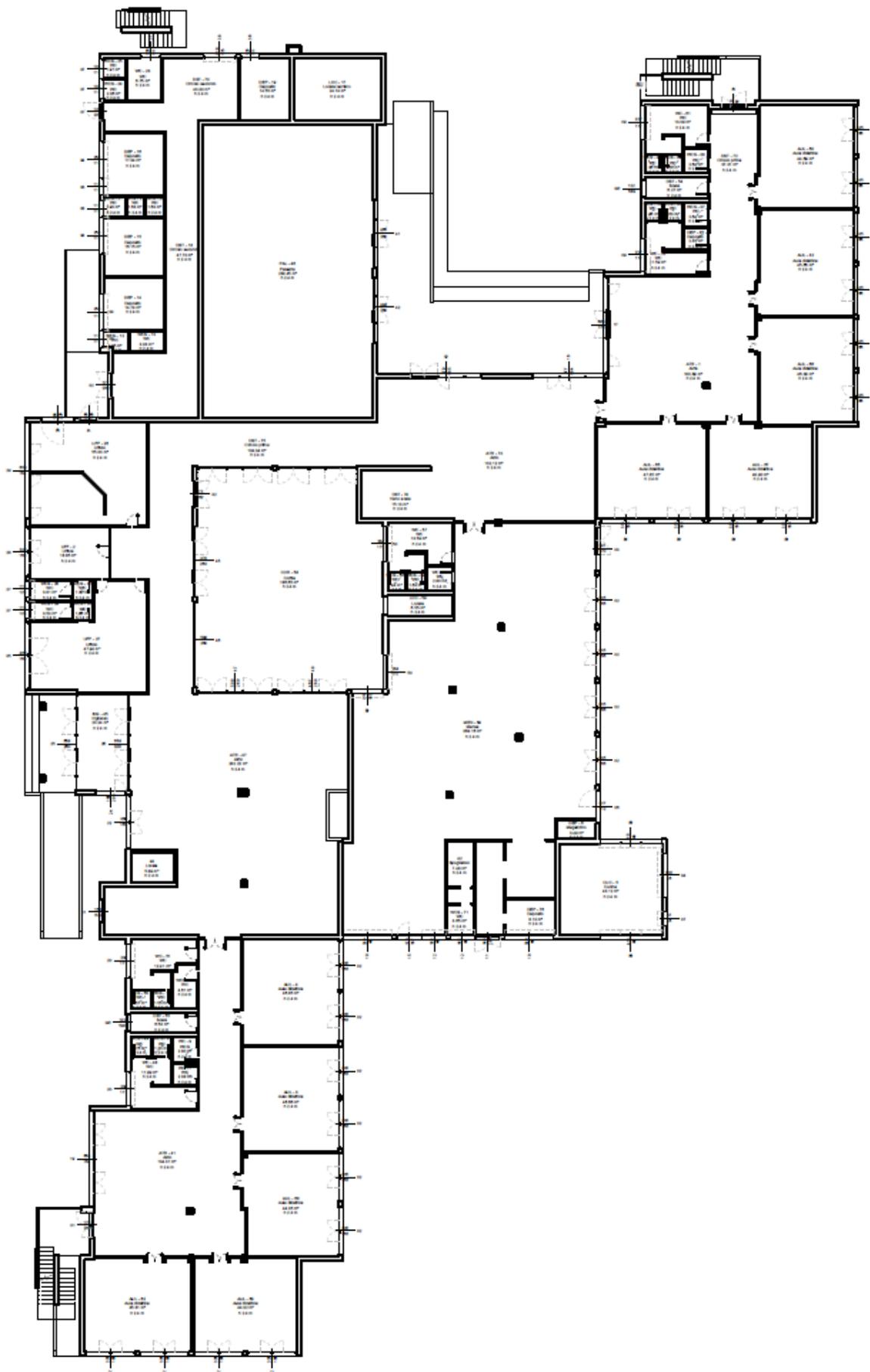


Figura 13 – Pianta piano terra (1^a p. f.t.)

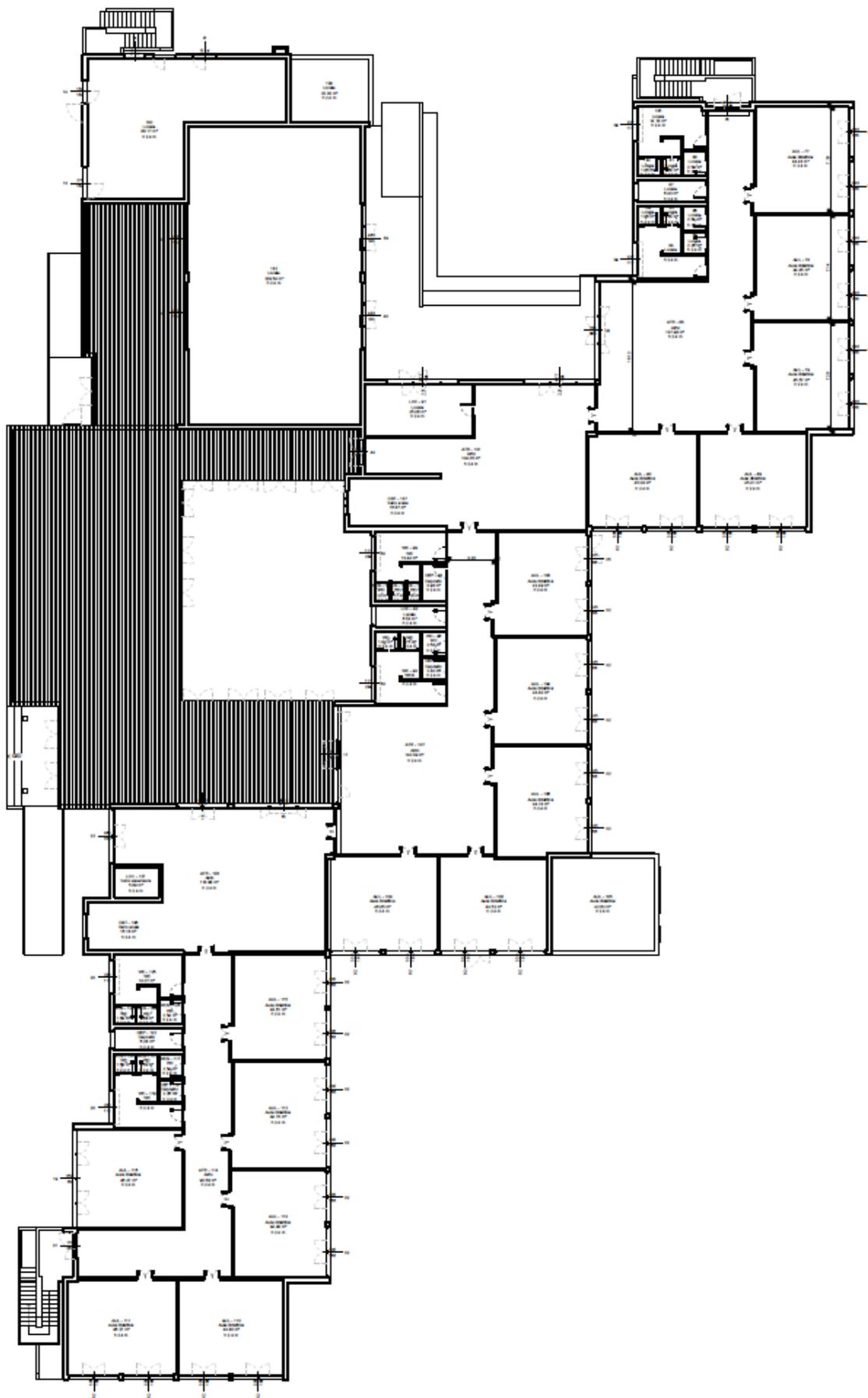


Figura 14 – Pianta primo piano (2^ p. f.t.)



Figura 15 – Pianta secondo piano (3^a p. f.t.)

1.3 – ANALISI DEL SISTEMA IMPIANTISTICO

La scuola risulta fornita dei seguenti servizi energetici:

- impianto di riscaldamento;
- illuminazione;
- trasporto di persone e cose.

Risultano assenti l'impianto di raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) e la ventilazione forzata (VDC).

1.3.1 – IMPIANTO DI RISCALDAMENTO

La centrale termica è situata in un locale al piano terra esterno al volume dell'edificio principale.

La produzione del calore è garantita da 3 caldaie standard di marca "UNICAL" riportate in Figura 16. La scuola è asservita da un modello "TZ AR 250" avente potenza nominale di 291 kW, mentre la palestra e gli uffici sono riscaldati rispettivamente da un modello "MONO 65" con potenza di 76 kW e "RECAL 38" con potenza di 44 kW. Ogni caldaia è provvista di un bruciatore di marca "Riello", ad aria soffiata, alimentato a Gas Metano. Le installazioni risultano essere contemporanee e risalenti al 1994.

L'impianto di distribuzione, raffigurato in Figura 17, si dirama per la mandata attraverso un collettore primario ed è provvisto di una valvola a tre vie sul ritorno; è presente anche un collettore secondario che alimenta i montanti verticali per il raggiungimento dei terminali. Sono presenti un totale di 9 pompe di circolazione, di cui 3 per l'anti-condensa.



Figura 16 – Caldaie tradizionali a gas Metano



Figura 17 – Pompe di circolazione

Sono presenti sistemi di regolazione e telecontrollo: la regolazione della temperatura di mandata è basata su una valvola a tre vie associata ad una sonda climatica esterna; è presente anche un sistema di regolazione di zona con termostato.

Il sistema di emissione è composto da radiatori ad acqua e da aerotermi raffigurati in Figura 18 e 19. Gli aerotermi contribuiscono unicamente al riscaldamento della palestra.



Figura 18 – Radiatori ad acqua



Figura 19 – Aerotermi

A seguire vengono riportate, per completezza, le principali caratteristiche tecniche dei componenti dell'impianto estrapolate dal libretto di impianto e le relative schede tecniche fornite dal produttore. In Tabella 2, 3 e 4 sono descritti i gruppi generatori; in Tabella 5 i circolatori e in Tabella 6 i componenti riscaldanti.

GRUPPO TERMICO 1	
Costruttore	UNICAL
Modello	RECAL 38
Installazione	01/01/1994
Potenza termica focolare (kW)	48
Potenza termica nominale (kW)	44
Rendimento termico nominale	91,67
Rendimento termico carico parziale (30%)	91,5
Perdite al manetello	0,6
Perdite al camino con bruciatore acceso	7,73
Perdite al camino con bruciatore spento	0,2

BRUCIATORE 1	
Costruttore	Riello
Modello	GS5
Installazione	01/01/1992
Tipologia	Bistadio
Portata termica nominale max (kW)	58
Portata termica nominale min (kW)	23

Tabella 2 - Caratteristiche tecniche gruppo termico 1

GRUPPO TERMICO 2	
Costruttore	UNICAL
Modello	TZ AR 250
Installazione	01/01/1994
Potenza termica focolare (kW)	322
Potenza termica nominale (kW)	291
Rendimento termico nominale	90,3
Rendimento termico carico parziale (30%)	87,5
Perdite al manetello	1,39
Perdite al camino con bruciatore acceso	7,61
Perdite al camino con bruciatore spento	0,1

BRUCIATORE 2	
Costruttore	Riello
Modello	RS28
Installazione	01/01/1995
Tipologia	Bistadio
Portata termica nominale max (kW)	349
Portata termica nominale min (kW)	169

Tabella 3 - Caratteristiche tecniche gruppo termico 2

GRUPPO TERMICO 3	
Costruttore	UNICAL
Modello	MONO 65
Installazione	01/01/1994
Potenza termica focolare (kW)	84
Potenza termica nominale (kW)	76
Rendimento termico nominale	90,5
Rendimento termico carico parziale (30%)	85,8
Perdite al manetello	0,7
Perdite al camino con bruciatore acceso	8,8
Perdite al camino con bruciatore spento	0,1

BRUCIATORE 3	
Costruttore	Riello
Modello	GS15
Installazione	-
Tipologia	Bistadio
Portata termica nominale max (kW)	175
Portata termica nominale min (kW)	81

Tabella 4 - Caratteristiche tecniche gruppo termico 3

POMPA DI CIRCOLAZIONE 1	
Costruttore:	Vergani
Modello:	T80-172
Potenza elettrica (kW)	0,75

POMPA DI CIRCOLAZIONE 6	
Costruttore:	Vergani
Modello:	T40-152
Potenza elettrica (kW)	0,26

POMPA DI CIRCOLAZIONE 2	
Costruttore:	Vergani
Modello:	T40-152
Potenza elettrica (kW)	0,26

POMPA DI CIRCOLAZIONE 7	
Costruttore:	Vergani
Modello:	T40-152
Potenza elettrica (kW)	0,26

POMPA DI CIRCOLAZIONE 3	
Costruttore:	Vergani
Modello:	T80-172
Potenza elettrica (kW)	0,75

POMPA DI CIRCOLAZIONE 8	
Costruttore:	LOWARA
Modello:	TLM3/2
Potenza elettrica (kW)	0,08

POMPA DI CIRCOLAZIONE 4	
Costruttore:	Vema
Modello:	va 40/145-n
Potenza elettrica (kW)	0,24

POMPA DI CIRCOLAZIONE 9	
Costruttore:	Grundfos
Modello:	ups 25-50 130
Potenza elettrica (kW)	0,08

POMPA DI CIRCOLAZIONE 5	
Costruttore:	Vergani
Modello:	T40-152
Potenza elettrica (kW)	0,26

Tabella 5 - Caratteristiche tecniche impianto di distribuzione

AEROTERMO	
Numero:	6

RADIATORE AD ACQUA	
Numero:	145

Tabella 6 - Caratteristiche tecniche impianto di emissione

1.3.2 – IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

L'illuminazione interna, rappresentata in Figura 20 e 21, è fornita da corpi illuminanti a fluorescenza; quella esterna è resa grazie all'impiego di lampioni a fluorescenza, fari alogeni posti sul tetto e alcune lampade a led poste sulla parete vicino all'ingresso.



Figura 20 – Impianto illuminazione atrio



Figura 21 – Impianto illuminazione palestra

1.3.3 – TRASPORTO DI PERSONE E COSE

Nella scuola è presente il servizio di trasporto, costituito da un ascensore che collega il piano terra al primo. L'ascensore è classificato nella categoria 3A per gli "Edifici scolastici e biblioteche fino a 260 utenti". Presenta una potenza di circa 3 kW ed è illuminato tramite lampade a incandescenza tradizionali. In Tabella 7 sono riportate le categorie in funzione della tipologia di edificio.

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 7 – Categorie di classificazione degli ascensori

1.4 – ANALISI DEI CONSUMI

Al fine del lavoro di tesi sono stati analizzati i consumi annuali di Gas Metano ed energia elettrica.

I consumi, organizzati su base mensile, sono stati adeguatamente rielaborati per ottenere profili annuali completi: le motivazioni e le modalità di rielaborazione per ogni vettore energetico sono riportate nei rispettivi sottoparagrafi.

1.4.1 – CONSUMI DI GAS METANO

I consumi di Gas Metano sono stati forniti per le stagioni termiche 2020-21, 2021-22, 2022-23.

Il comune di Roma (classe climatica D) prevede un periodo di riscaldamento tra il 1^a Novembre e il 15 Aprile. Per questo motivo i dati delle annualità 2020 e 2023 sono risultati incompleti delle mensilità appartenenti rispettivamente alla stagione termica precedente (2019-20) e successiva (2023-24). Per ovviare a questo problema le mensilità di Gennaio, Febbraio, Marzo e Aprile 2020, Novembre e Dicembre 2023 sono state stimate.

In particolare sono stati definiti due valori:

- il consumo mensile medio delle altre tre annualità;
- il consumo stimato, ottenuto tramite proporzionalità lineare rispetto alla mensilità corrispondente appartenente ad un'altra annata, scelta in funzione della temperatura media esterna con minor scostamento.

Di seguito viene riportata la proporzione utilizzata: $C : T_{media} = C_{rif} : T_{media,rif}$

C = consumo della mensilità da stimare

T_{media} = temperatura media esterna della mensilità da stimare

C_{rif} = consumo della mensilità presa come riferimento

$T_{media,rif}$ = temperatura media della mensilità presa come riferimento

Successivamente è stato eseguito un calcolo dell'errore tra i due valori di consumo: $Err = \frac{C - C_{rif}}{C_{rif}}$

- se l'errore è risultato minore o uguale al 7% è stato inserito il consumo stimato;
- se l'errore è risultato maggiore del 7% è stato assunto il valore medio.

CONSUMI 2020

In Tabella 8 sono riportati i consumi di Gas Metano mediati su base mensile per i mesi soggetti a riscaldamento dell'annualità 2020. Sono evidenziati in giallo le mensilità stimate.

ANNO	MESE	CONSUMI (sm3)	T media (°C)	GG
2020	GENNAIO	4.432	8,4	358
2020	FEBBRAIO	3.019	11,0	253
2020	MARZO	2.756	11,3	270
2020	APRILE	734	14,2	86
2020	MAGGIO	0	19,7	0
2020	GIUGNO	0	21,7	0
2020	LUGLIO	0	25,8	0
2020	AGOSTO	0	26,5	0
2020	SETTEMBRE	0	22,5	0
2020	OTTOBRE	0	15,8	0
2020	NOVEMBRE	2.007	13,6	192
2020	DICEMBRE	2.624	10,4	297
TOTALE		15.573	-	1.456
MEDIA		7.786	-	243

Tabella 8 - Consumo Gas Metano 2020

In Figura 22 sono rappresentati i consumi legati al servizio di riscaldamento e l'andamento delle temperature medie esterne. Il profilo risulta coerente, Gennaio corrisponde alla mensilità di picco.

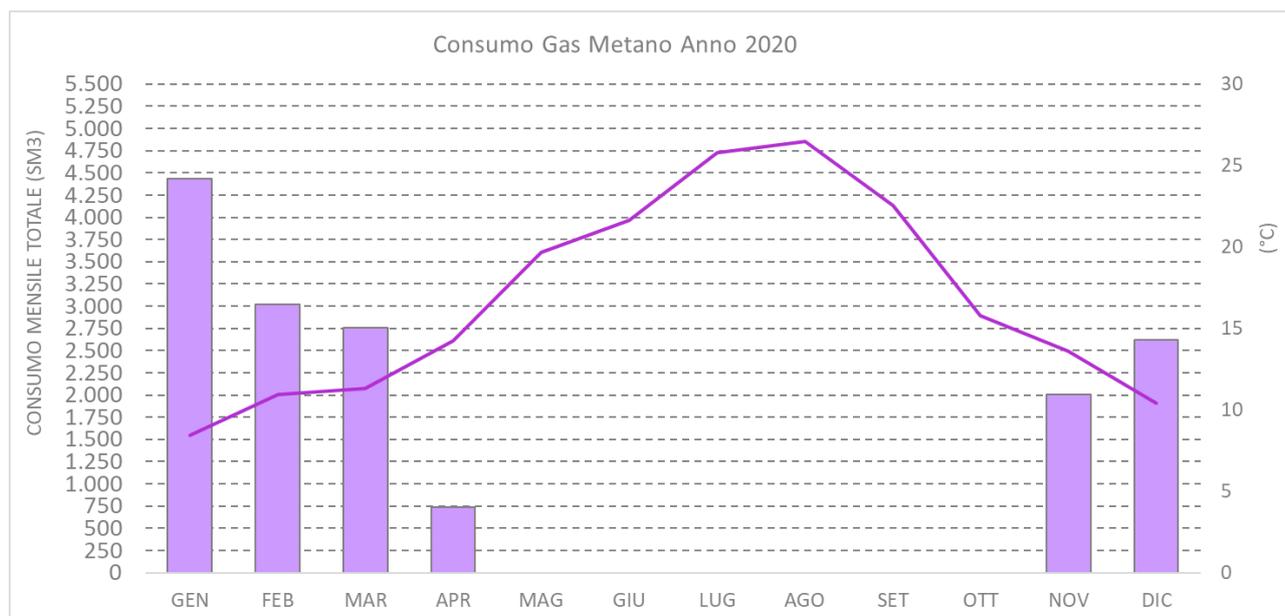


Figura 22 – Consumo Gas Metano e andamento temperature medie esterne 2020

CONSUMI 2021

In Tabella 9 sono riportati i consumi di Gas Metano mediati su base mensile per i mesi soggetti a riscaldamento dell'annualità 2021.

ANNO	MESE	CONSUMI (sm3)	T media (°C)	GG
2021	GENNAIO	5.013	8,3	364
2021	FEBBRAIO	3.307	11,0	251
2021	MARZO	2.875	10,6	291
2021	APRILE	1.127	12,1	119
2021	MAGGIO	0	17,6	0
2021	GIUGNO	0	23,5	0
2021	LUGLIO	0	26,2	0
2021	AGOSTO	0	26,1	0
2021	SETTEMBRE	0	22,8	0
2021	OTTOBRE	0	16,0	0
2021	NOVEMBRE	1.633	14,1	178
2021	DICEMBRE	2.942	10,3	301
TOTALE		16.897	-	1.504
MEDIA		2.816	-	251

Tabella 9 - Consumo Gas Metano 2021

In Figura 23 sono rappresentati i consumi legati al servizio di riscaldamento e l'andamento delle temperature medie esterne. Il profilo risulta coerente, Gennaio corrisponde alla mensilità di picco.

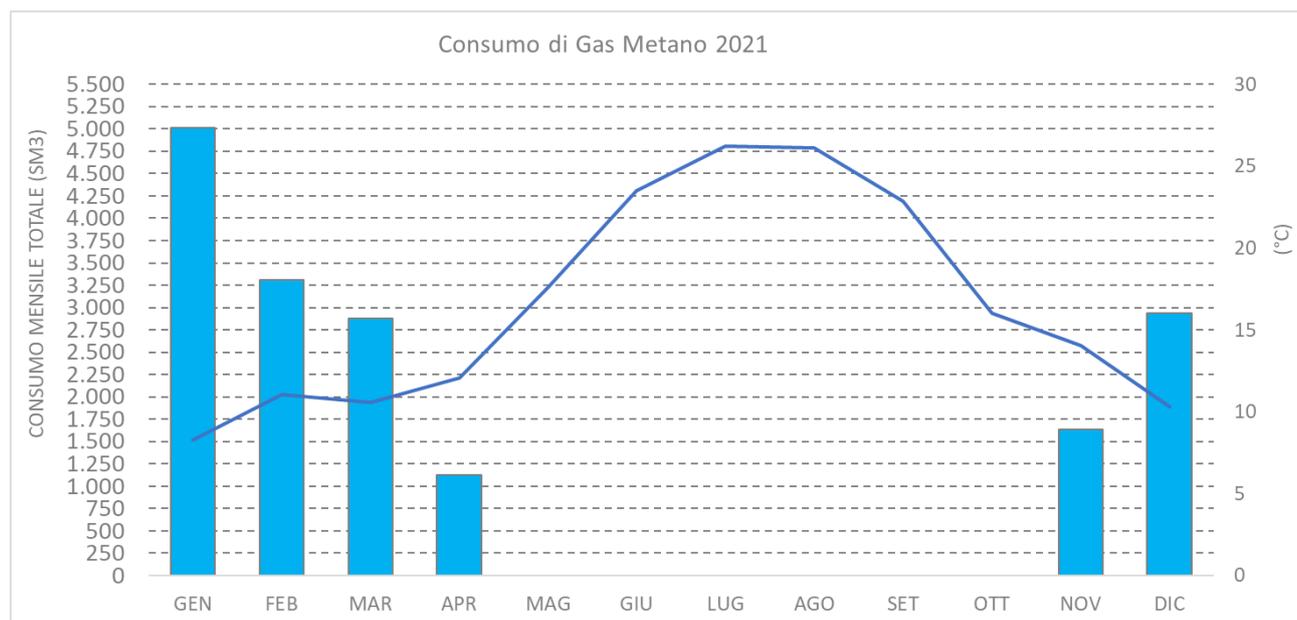


Figura 23 – Consumo Gas Metano e andamento temperature medie esterne 2021

CONSUMI 2022

In Tabella 10 sono riportati i consumi di Gas Metano mediati su base mensile per i mesi soggetti a riscaldamento dell'annualità 2022.

ANNO	MESE	CONSUMI (sm3)	T media (°C)	GG
2022	GENNAIO	5437	7,8	379
2022	FEBBRAIO	2564	10,2	275
2022	MARZO	2728	10,2	304
2022	APRILE	297	13,9	92
2022	MAGGIO	0	20,5	0
2022	GIUGNO	0	25,9	0
2022	LUGLIO	0	28,2	0
2022	AGOSTO	0	26,7	0
2022	SETTEMBRE	0	22,2	0
2022	OTTOBRE	0	18,8	0
2022	NOVEMBRE	886	13,2	205
2022	DICEMBRE	1691	11,7	256
TOTALE		13.603	-	1.511
MEDIA		2.267	-	-

Tabella 10 - Consumo Gas Metano 2022

In Figura 24 sono rappresentati i consumi legati al servizio di riscaldamento e l'andamento delle temperature medie esterne. Il profilo risulta coerente, Gennaio corrisponde alla mensilità di picco.

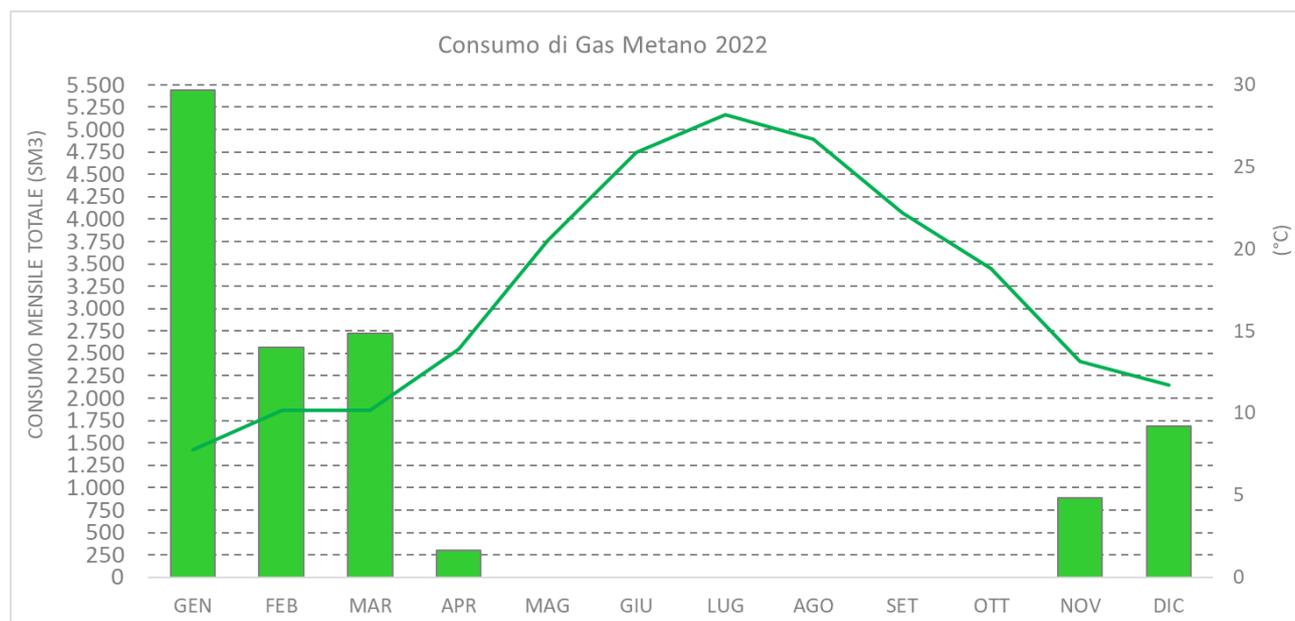


Figura 24 – Consumo Gas Metano e andamento temperature medie esterne 2022

CONSUMI 2023

In Tabella 11 sono riportati i consumi di Gas Metano mediati su base mensile per i mesi soggetti a riscaldamento dell'annualità 2023. Sono evidenziati in giallo le mensilità stimate.

ANNO	MESE	CONSUMI (sm3)	T media (°C)	GG
2023	GENNAIO	2.846	8,4	360
2023	FEBBRAIO	3.187	8,8	314
2023	MARZO	2.342	12,2	240
2023	APRILE	673	13,1	104
2023	MAGGIO	0	17,3	0
2023	GIUGNO	0	22,8	0
2023	LUGLIO	0	27,3	0
2023	AGOSTO	0	25,3	0
2023	SETTEMBRE	0	23,2	0
2023	OTTOBRE	0	20,6	0
2023	NOVEMBRE	1.509	14,2	175
2023	DICEMBRE	2.419	11,3	269
TOTALE		12.976	-	1462
MEDIA		3.244	-	-

Tabella 11 - Consumo Gas Metano 2023

In Figura 25 sono rappresentati i consumi legati al servizio di riscaldamento e l'andamento delle temperature medie esterne. Il profilo risulta coerente, Febbraio corrisponde alla mensilità di picco.

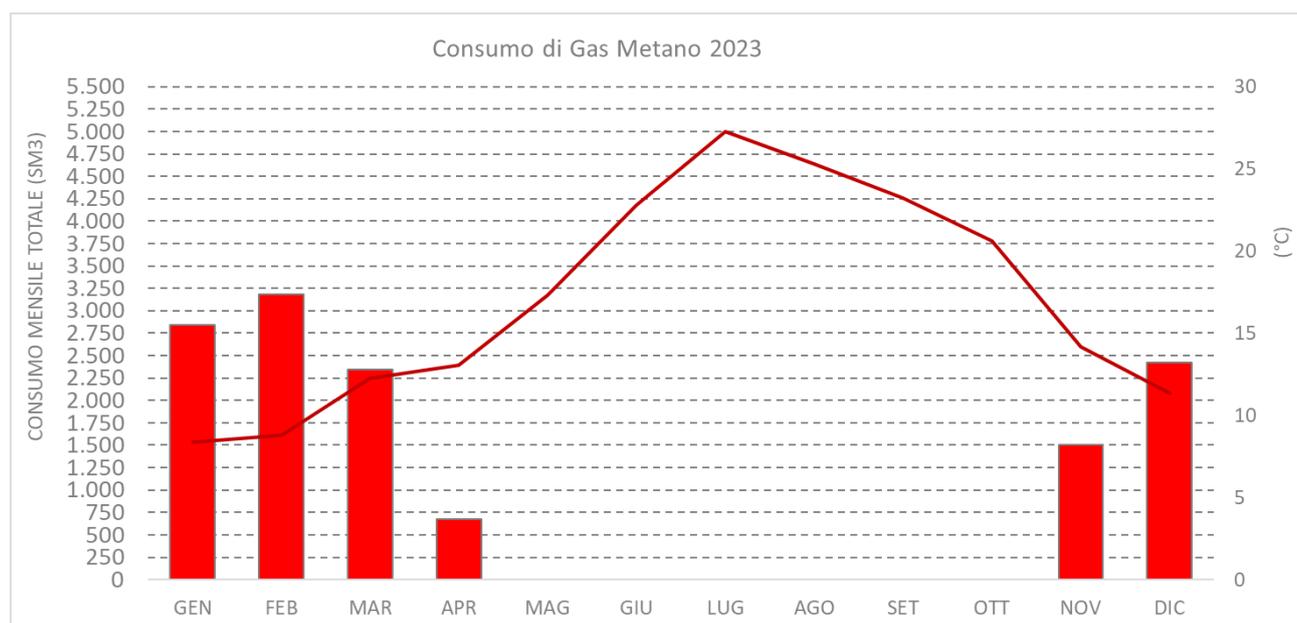


Figura 25 – Consumo Gas Metano e andamento temperature medie esterne 2023

COMPARATIVA CONSUMI 2020-21-22-23

In Figura 26 sono riportati:

- la comparazione per ogni mese delle singole annualità (istogramma);
- la comparazione dell'andamento delle temperature medie esterne delle singole annualità.

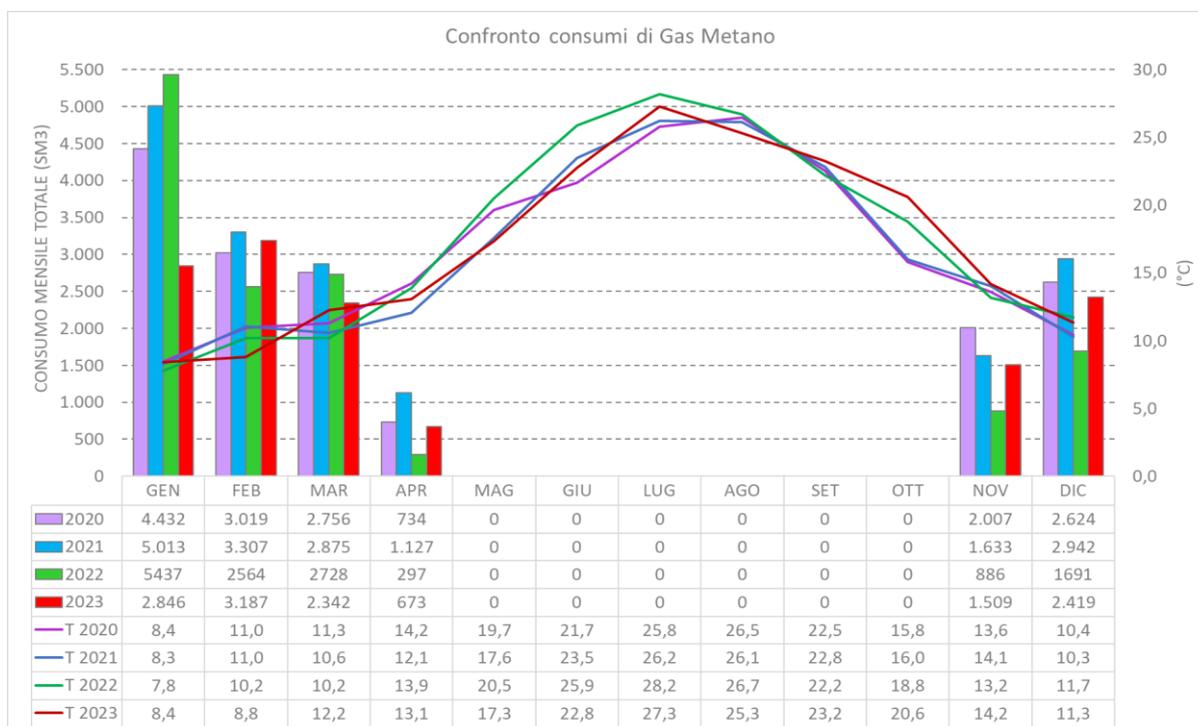


Figura 26 – Consumo Gas Metano e andamento temperature medie esterne 2020-21-22-23

Il mese di Gennaio 2023 presenta un consumo particolarmente contenuto di circa 2800 Sm³, risultando in controtendenza rispetto alle annualità precedenti che nello stesso periodo registrano il consumo stagionale maggiore, raggiungendo valori di picco di oltre 5000 Sm³. Tale differenza non può essere giustificata dalle temperature esterne, pressoché analoghe.

I mesi di Febbraio e Marzo mostrano consumi comparabili, tra i 2500 e i 3300 kWh. Nonostante ciò si possono notare due tendenze che convergono verso lo stesso risultato: l'annualità 2022 mostra un consumo minore nonostante la temperatura media sia simile agli anni 2020-21; l'annualità 2023, invece, presenta consumi simili agli anni 2020-21 nonostante una temperatura media inferiore di circa 2°C. Questo mostra come negli ultimi anni il consumo si sia ridotto.

Aprile è la mensilità che presenta il minor numero di giorni di riscaldamento e di conseguenza un valore di consumo contenuto. Nel 2022 il consumo è minimo, circa 300 Sm³.

Novembre 2022 presenta nuovamente un consumo ridotto, quasi dimezzato rispetto le altre annualità, nonostante temperature esterne minori di circa 1°C. Anche nel 2023, rispetto al 2020-21, seppur in presenza di analoghe temperature, si hanno consumi minori.

Nel mese di Dicembre ritroviamo un andamento molto simile: una riduzione importante dei consumi del 2022 e un trend in leggera diminuzione per il 2023 nei confronti del 2020-21.

1.4.2 – CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

I consumi di energia elettrica rilevati dal POD IT002E5308126A sono forniti per gli anni 2022 e 2023. Per quanto riguarda i consumi del 2022 sono risultati assenti i valori delle prime tre mensilità: i dati sono stati stimati identici ai valori del 2023. Tale approssimazione può essere formulata in quanto il vettore energetico può essere assunto costante in due annualità successive, in quanto utilizzato solo per asservire l'impianto di illuminazione, di trasporto e per gli ausiliari.

Per ogni mensilità sono stati forniti anche i consumi suddivisi nelle tre fasce orarie:

- F1: lunedì-venerdì alle 8:00-19:00; escluse festività.
- F2: lunedì-venerdì alle 7:00-8:00 e alle 19:00-23:00; sabato alle 7:00-23:00; escluse festività.
- F3: lunedì-sabato alle 23:00-7:00; domenica e festivi tutta la giornata.

CONSUMI 2022-23

In Tabella 12 e in Figura 27 sono riportati i consumi di energia elettrica mediati su base mensile dell'annualità 2022. Sono evidenziati in rosso le mensilità stimate.

MESE	CONSUMI (kWh)	F1	F2	F3
GENNAIO	3732	2266	531	934
FEBBRAIO	3809	2431	529	848
MARZO	3637	2359	506	772
APRILE	2162	1500	277	385
MAGGIO	2560	1809	307	443
GIUGNO	1306	907	164	235
LUGLIO	925	550	150	225
AGOSTO	608	331	110	167
SETTEMBRE	2060	1472	257	332
OTTOBRE	3780	2181	616	983
NOVEMBRE	4073	2461	627	985
DICEMBRE	3765	2106	608	1051
TOTALE	32.417	20.373	4.683	7.360

Tabella 12 – Consumi EE 2022

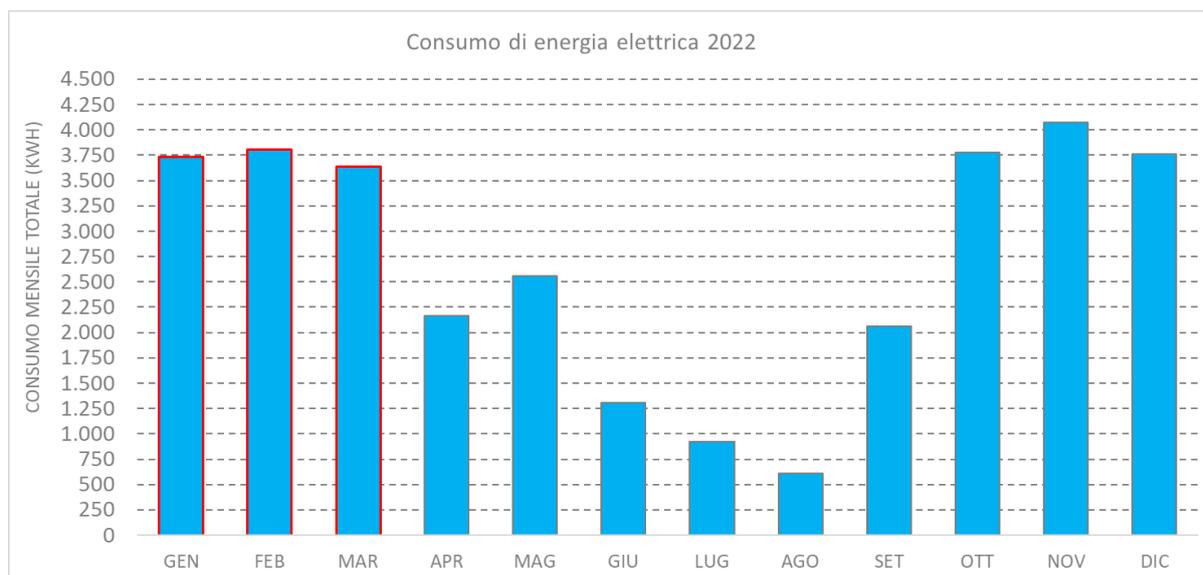


Figura 27 – Consumi EE 2022

In Tabella 13 e in Figura 28 sono riportati i consumi di energia elettrica mediati su base mensile dell'annualità 2023.

MESE	CONSUMI (kWh)	F1	F2	F3
GENNAIO	3732	2266	531	934
FEBBRAIO	3809	2431	529	848
MARZO	3637	2359	506	772
APRILE	2400	1371	334	694
MAGGIO	3055	1996	381	677
GIUGNO	1800	1000	275	525
LUGLIO	569	393	70	106
AGOSTO	298	209	48	42
SETTEMBRE	2332	1345	388	599
OTTOBRE	3375	2150	500	725
NOVEMBRE	3028	2274	341	413
DICEMBRE	2547	1699	353	495
TOTALE	30.581	19.493	4.256	6.832

Tabella 13 – Consumi EE 2023

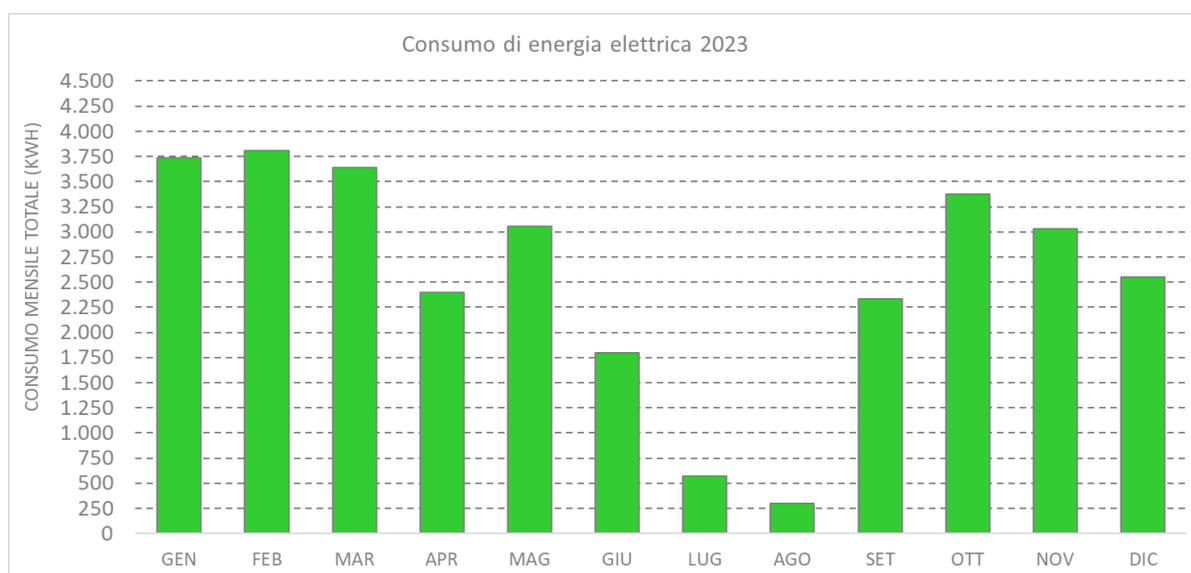


Figura 28 – Consumi EE 2023

Per entrambe le annualità l'andamento dei consumi è conforme alla tipologia di utilizzo del vettore energetico.

Nei mesi invernali il tasso di illuminazione necessario per garantire il confort visivo è maggiore; in aggiunta si registra una quota fissa di consumi ausiliari per via del sistema di riscaldamento.

Superata la stagione invernale i consumi tendono a diminuire per via della maggiore irradianza solare di cui beneficiano gli ambienti, interni ed esterni, che permette una riduzione delle ore di illuminazione; a questo è associata anche la rimozione dei consumi ausiliari.

Nell'anno 2022 il mese di picco si registra a Novembre, mentre per l'anno 2023 questo è anticipato a Febbraio. Si segnala per entrambi gli anni un valore superiore alle aspettative durante Maggio.

COMPARATIVA CONSUMI 2022-23

Dal confronto macroscopico delle annualità 2022 e 2023 proposto in Figura 29 si può notare come i consumi siano paragonabili e i valori in linea durante tutte le mensilità. I primi tre mesi risultano essere uguali per via delle ipotesi di stima effettuate. Il mese di Maggio, soprattutto nel 2023, appare in controtendenza rispetto al trend atteso di diminuzione dei consumi. Nei successivi mesi estivi i valori tornano a diminuire per via della maggiore irradianza solare e per la chiusura delle attività scolastiche. Nei mesi autunnali si registra un aumento considerevole dei consumi allineandosi con i valori invernali. Quest'ultimi risultano maggiori nell'anno 2022 raggiungendo il picco tra tutte le mensilità prese in considerazione.

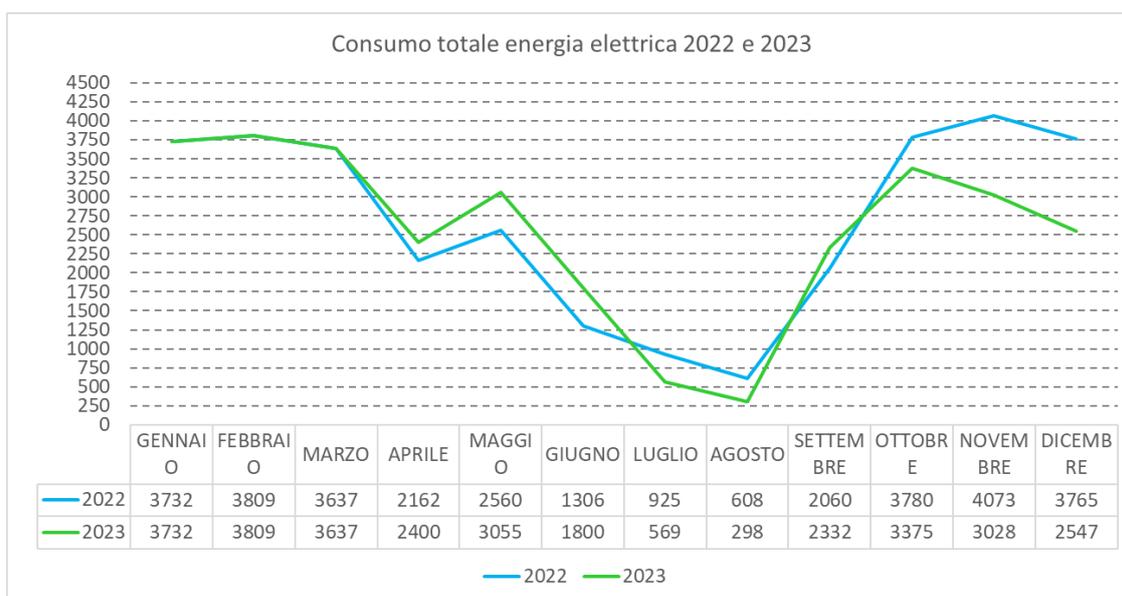


Figura 29 – Confronto consumi energia elettrica 2022-23

In Figura 30 viene riportato il delta tra i singoli mesi del 2023 rispetto a quelli del 2022, evidenziandone una riduzione complessiva del 6%. I consumi risultano essere particolarmente altalenanti nelle singole mensilità mostrando scostamenti anche nell'ordine del 30-50%.

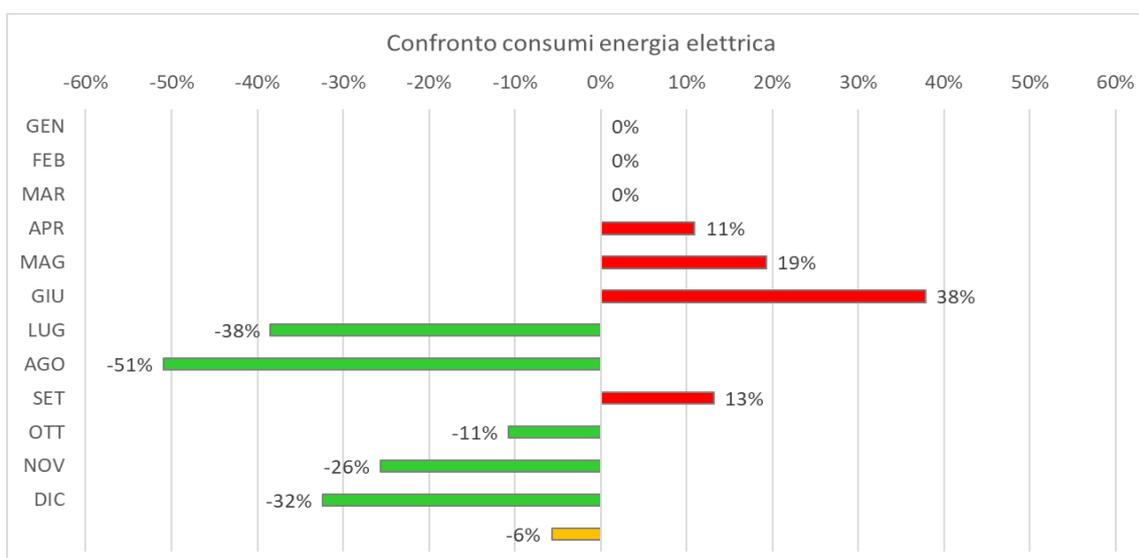
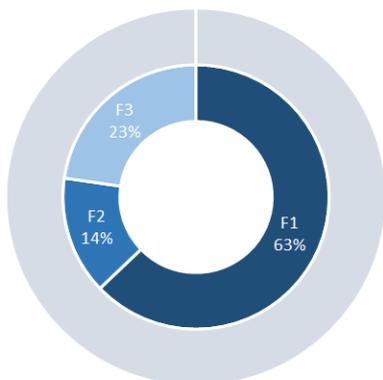


Figura 30 – Confronto consumi energia elettrica del 2023 rispetto al 2022

In Figura 31 sono riportate le fasce orarie di consumo: è evidenziato di un maggior impiego nella fascia F1, in linea con la destinazione di utilizzo. Le percentuali rimangono costanti nelle annualità.

Composizione EE (kWh) Anno 2022



Composizione EE (kWh) Anno 2023

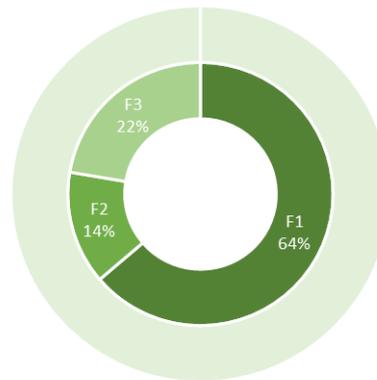


Figura 31 – Confronto consumi per fascia oraria 2022-23

2 – MODELLAZIONE ENERGETICA

2.1 – METODOLOGIA DI CALCOLO

Il modulo EC 700 di Edilclima è un software dedicato alla modellazione energetica che permette la definizione e la successiva analisi delle prestazioni energetiche degli edifici. In particolare, rappresenta un motore di calcolo che, abbinato ad altri moduli integrati, permette la realizzazione di svariate analisi, tra cui quella di diagnosi energetica. Il sistema di calcolo adottato si basa sul seguente quadro normativo:

UNI/TS 11300-1: “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”.

UNI/TS 11300-2: “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione”.

UNI/TS 11300-3: “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva”.

UNI/TS 11300-4: “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”.

UNI/TS 11300-5: “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell’energia primaria e dalla quota di energia da fonti rinnovabili”.

UNI/TS 11300-6: “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori e scale mobili”.

UNI EN ISO 52016-1: "Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti."

L’insieme di questi approcci permette di calcolare il fabbisogno di energia dell’edificio, i rendimenti degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, il consumo di ACS e i fabbisogni elettrici per la ventilazione, l’illuminazione e il funzionamento di sistemi di trasporto di persone e cose. In aggiunta, in presenza di sistemi legati a fonti di energia rinnovabile consente la determinazione dei fabbisogni di energia primaria per la produzione di ACS e per il raffrescamento estivo, nonché la quota di energia primaria ottenuta dalle sole tecnologie rinnovabili.

Il modulo EC 701 permette di accedere alla compilazione dell’attestato di prestazione energetica secondo le Linee guida nazionali, come definito nel Decreto del 26 Giugno 2015.

Il modulo EC 720, in conformità alla norma UNI CEI EN 16247-2:2022 e alle linee guida UNI/TR 11775, permette la validazione del modello di calcolo attraverso il confronto tra i consumi reali e quelli calcolati. Risulta possibile individuare e modellare gli interventi di riqualificazione energetica analizzandone gli impatti e la fattibilità tecnico-economica (secondo UNI EN 15459).

2.2 – PROCEDURA DI UTILIZZO

Il processo di modellazione può essere riassunto in una serie di passaggi consecutivi corrispondenti a schede ordinate all'interno dell'interfaccia del programma. Ne seguirà una breve descrizione per esplicitarne l'ordine logico e aumentare il livello di chiarezza dei successivi sottoparagrafi dedicati.

1. **COMPILAZIONE DATI GENERALI:** in questa primissima fase occorre inserire le informazioni necessarie alla creazione del modello.
 - Dati di progetto: dati anagrafici dello studio e del committente, destinazione d'uso relativa al DPR n.412 del 26 Agosto 1993, definizione della proprietà (pubblica o privata) dell'edificio e tipologia di modellazione (A1/A2 per verifiche di legge, A3 per diagnosi energetica, modellazione libera).
 - Dati climatici: selezione delle caratteristiche della località in cui si trova l'edificio.
 - Regime normativo: la prima parte della scheda prevede la selezione delle norme a cui faranno riferimento le verifiche di legge e gli attestati energetici; la seconda parte comprende la definizione dei calcoli per specifici aspetti (ombreggiamenti, locali non climatizzati, ponti termici, resistenze liminari, capacità termica e radiazione solare).
 - Dati di default: definizione di grandezze che saranno pre-impostate nelle schede successive.
2. **COMPONENTI INVOLUCRO:** in questa scheda si generano i componenti opachi e trasparenti. La generazione può avvenire in diverse modalità: sfruttando l'importazione dall'archivio di Edilclima; attraverso l'archivio personale; ex novo. I componenti modellabili sono: muri, pavimenti, soffitti, ponti termici e componenti finestrati.
 - Muri, pavimenti e soffitti: la creazione di questi componenti prevede la caratterizzazione della tipologia di parete e la creazione della stratigrafia.

La definizione della tipologia di parete è necessaria al fine di identificare gli ambienti con cui essa confina.

La definizione della stratigrafia può avvenire con differenti approcci: l'immissione diretta degli strati, l'importazione della stratigrafia direttamente dagli archivi o attraverso la procedura di immissione dei "dati noti" che prevede l'inserimento della struttura con la definizione delle sue caratteristiche note (senza specificarne la stratigrafia).

Una volta effettuata la creazione del componente sarà possibile visualizzare gli esiti della verifica termoigrometrica (analisi rischio di condensa superficiale e di condensa interstiziale) e i risultati complessivi.
 - Ponti termici: la definizione dei ponti termici può avvenire seguendo diverse modalità:
 - analisi con modulo EC709 per il calcolo della trasmittanza termica lineica, in ossequio alle norme UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211;
 - immissione manuale del valore di trasmittanza termica lineica previa analisi con software esterno agli elementi finiti o abaco cartaceo.

- Componenti finestrati: la definizione di questi componenti prevede la definizione della tipologia di serramento, la sua geometria, la composizione del vetro e la presenza di chiusure e/o schermature.

Inizialmente va definita la tipologia di serramento (vetro singolo, doppio, accoppiato), se si tratti di una facciata continua e la classe di permeabilità in ossequio alla norma UNI EN 12207.

Per quanto riguarda la geometria del componente, vanno inseriti, oltre alle dimensioni e alla forma dell'infisso, il valore di trasmittanza termica del telaio e la presenza di sopra/sotto luce.

Successivamente vanno inserite le dimensioni e la conducibilità del pacchetto vetrato, in ossequio alla norma UNI EN ISO 10077, appendici C ed E.

In caso fossero presenti dovranno essere inseriti per ogni componente finestrato il relativo cassonetto, il ponte termico e la schermatura.

3. INPUT GRAFICO: questa scheda permette la determinazione delle superfici disperdenti dei singoli locali appartenenti alle diverse zone climatiche attraverso l'utilizzo di un modulo grafico implementato non dissimile dai software CAD.

Completata la suddivisione dei locali nella planimetria dell'edificio vengono identificati automaticamente i locali climatizzati da caratterizzare; sarà inoltre possibile attivare il calcolo automatico degli ombreggiamenti per considerare edifici vicini, alberi, balconi, rientranze delle finestre e orografia del territorio.

4. DEFINIZIONE ZONE E LOCALI CLIMATIZZATI: dopo l'esportazione dei dati dall'input grafico, attraverso questa scheda è possibile caratterizzare le zone climatizzate e i relativi locali.

Per quanto riguarda la zona climatizzata sarà necessario dapprima identificarla attraverso un nome ed una categoria d'uso (di default viene attribuita quella assegnata all'edificio) e in seguito definirne i parametri di illuminazione (potenza installata e ore di utilizzo annuali) legati ai locali non climatizzati e alle aree esterne, necessari per il calcolo del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione.

Espandendo la zona è possibile andare a caratterizzare i singoli locali climatizzati in termini di:

- apporti interni;
- ventilazione: tipo, metodo di calcolo delle perdite, categoria e sottocategoria del locale;
- illuminazione: potenza installata, tempo di operatività durante il giorno e la notte, fattore di assenza, livello di illuminamento, presenza di sistemi di controllo e di emergenza.

5. CONFIGURAZIONE IMPIANTI: in questa scheda è possibile definire i sottosistemi impiantistici. In dettaglio: impianto di riscaldamento, impianto di ventilazione, impianto di ACS, impianto di raffrescamento, pannelli solari termici e fotovoltaici.

Ogni impianto potrà essere caratterizzato manualmente, inserendo i dati ottenuti dalle schede tecniche del produttore, sfruttando i valori proposti dalle analisi del programma o attraverso la diretta importazione dai suoi archivi.

6. RISULTATI: in questa sezione vengono riportati i risultati relativi al fabbricato e agli impianti:
Risultati fabbricato: riportano il valore della potenza invernale e dell'energia utile invernale ed estiva calcolati dal software in assenza di qualsiasi tipo di impianto (la ventilazione, indipendentemente dalla presenza di un impianto meccanico, viene considerata naturale).
Risultati energia primaria: comprendono i risultati relativi al servizio di riscaldamento, ACS, e raffrescamento, al servizio di illuminazione artificiale e alla producibilità degli impianti solari. Sono inoltre riportati i risultati relativi ai sistemi di ventilazione e di trasporto di persone e cose.

7. ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA: attraverso questa scheda è possibile accedere alla compilazione dell'attestato in funzione del regime normativo precedentemente selezionato. Nella sezione di riepilogo è possibile visualizzare (per l'intero edificio o per le singole zone) l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ [kWh/m²anno] e la classe energetica.

8. VALIDAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO: in questa sezione è possibile confrontare i consumi calcolati rispetto ai consumi rilevati. Il confronto può essere effettuato sull'intero edificio o su singoli contatori per differenti stagioni di riferimento. Per arrivare alla validazione è possibile tenere in considerazione il fattore di destagionalizzazione, ovvero il rapporto tra i gradi-giorno calcolati e quelli reali, oppure ricalcolare il modello con i dati climatici reali della stagione di riferimento selezionata, secondo le linee guida della norma UNI/TR 11775.

2.3 – MODELLO DEL CASO STUDIO (EC 700)

2.3.1 – DATI GENERALI

Il modello è stato realizzato con approccio A3 e in funzione della destinazione d'uso E.7 legata agli “edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli assimilabili”.

Dal punto di vista climatico sono stati utilizzati i dati archiviati dal software relativi al comune di Roma in conformità alla norma UNI 10349 del 2016. La località, risultata appartenere alla zona climatica D; presenta un valore di Gradi Giorno di 1415 gg, un valore di temperatura esterna di 0°C e un valore di irradianza solare nel mese di maggiore insolazione di 320,6 W/m². Il periodo di riscaldamento va dal 1 Novembre al 15 Aprile.

Le impostazioni legate al regime normativo sono riassunte in Figura 32.

Figura 32 - Dettaglio regime normativo del modello

2.3.2 – COMPONENTI INVOLUCRO

In questo paragrafo vengono riportate le principali caratteristiche dei componenti dell'involucro che sono stati utilizzati per la modellazione in Edilclima. In dettaglio verranno riportate le stratigrafie dei componenti opachi; le caratteristiche dei gruppi vetrati; i ponti termici con immagini termografiche. Per ogni tipologia di componente saranno riportate le relative tabelle riepilogative, indicanti parametri geometrici e trasmittanze termiche calcolate dal modello.

• COMPONENTI OPACHI: MURATURA OPACA, PAVIMENTO, SOFFITTO

Di seguito vengono riportate le stratigrafie dei componenti dell'involucro opaco raffiguranti il materiale, lo spessore [mm], la conduttività [W/mK], la resistenza termica [m²K/W], la massa volumica [kg/m³] e la capacità termica specifica [kJ/kgK] di ciascun livello. Nelle rispettive tabelle riepilogative sono indicati spessore [mm] e trasmittanza termica [W/m²K].

Ogni componente è stato definito a partire dalla tipologia di ambiente con cui confina, al fine di ottenere il maggior grado di simulazione nei calcoli delle dispersioni. Le possibili tipologie sono:

- Tipo T: struttura disperdente verso l'ambiente esterno, es. pareti esterne, soffitti a terrazzo o verso sottotetto aerato, pavimento su pilotis.
 - Tipo U: struttura disperdente verso locali non climatizzati o serre solari, es. pavimento su cantina, parete su deposito o vano scala non riscaldati, soffitto verso sottotetto non aerato.
 - Tipo G: struttura disperdente verso il terreno, es. pavimenti appoggiati su terreno.
 - Tipo N: struttura disperdente verso zone o appartamenti vicini.
 - Tipo A: struttura disperdente verso locali climatizzati con diversa temperatura.
 - Tipo E: struttura disperdente da locali non climatizzati verso l'ambiente esterno.
 - Tipo R: struttura disperdente da locali non climatizzati verso il terreno.
 - Tipo D: divisorio interno alla zona climatizzata.
- I. Le pareti opache verticali che racchiudono il volume dell'edificio, separandolo dall'ambiente esterno, sono composte da una muratura in laterizio, sprovvista di isolamento, dello spessore complessivo di 30 cm. Le relative stratigrafie sono riportate in Tabella 14.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Intonaco di gesso e sabbia	20,00	0,80	0,025	1.600	1,00
Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1,5%)	250,00	0,60	0,417	1.400	1,00
Intonaco di cemento e sabbia	30,00	1,00	0,030	1.800	1,00

Tabella 14 - Stratigrafia M1 e M2

- II. I tramezzi interni all'edificio, sono composti da muratura in laterizio, sprovvista di isolamento, dello spessore di 10, 20 e 30 cm. Le relative stratigrafie sono riportate in Tabella 15, 16 e 17.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Intonaco di gesso e sabbia	10,00	0,80	0,130	1.600	1,00
Muratura in laterizio pareti interne (um. 0,5%)	80,00	0,50	0,160	1.400	1,00
Intonaco di gesso e sabbia	10,00	0,80	0,130	1.600	1,00

Tabella 15 - Stratigrafia M5 e M7

MARCO POLITI
POLITECNICO DI TORINO – TESI DI LAUREA MAGISTRALE

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Intonaco di gesso e sabbia	20,00	0,80	0,025	1.600	1,00
Muratura in laterizio pareti interne (um. 0,5%)	250,00	0,50	0,500	1.400	1,00
Intonaco di gesso e sabbia	30,00	0,80	0,038	1.600	1,00

Tabella 16 - Stratigrafia M6 e M9

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Intonaco di gesso e sabbia	10,00	0,80	0,013	1.600	1,00
Muratura in laterizio pareti interne (um. 0,5%)	180,00	0,50	0,360	1.400	1,00
Intonaco di gesso e sabbia	10,00	0,80	0,013	1.600	1,00

Tabella 17 - Stratigrafia M8

- III. Il cassonetto presenta una chiusura con pannello in alluminio, un'intercapedine d'aria debolmente ventilata e muratura in laterizio non isolata. La stratigrafia è riportata in Tabella 18.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Alluminio	20,00	220,00	-	2.700	0,88
Intercapedine debolmente ventilata	130,00	-	-	-	-
Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1,5%)	120,00	0,60	-	1.400	1,00
Intonaco di cemento e sabbia	30,00	1,00	-	1.800	1,00

Tabella 18 - Stratigrafia M3, M4, M10, M11 e M12

In Tabella 19 vengono riportati per ogni componente: tipologia, spessore e trasmittanza termica.

Muri - riepilogo				
Codice	Tipo	Descrizione	Sp [mm]	Ue [W/m ² K]
M1	T	Parete estema - 30 cm	300,00	1,501
M2	E	Parete estema ambienti NR - 30 cm	300,00	1,501
M3	T	Cassonetto (M1)	300,00	2,325
M4	E	Cassonetto (M2)	300,00	2,325
M5	D	Tramezzo VS ambienti riscaldati - 10 cm	100,00	2,247
M6	D	Tramezzo VS ambienti riscaldati - 30 cm	300,00	1,216
M7	U	Tramezzo VS ambienti NR - 10 cm	100,00	2,247
M8	U	Tramezzo VS ambienti NR - 20 cm	200,00	1,550
M9	U	Tramezzo VS ambienti NR - 30 cm	300,00	1,216
M10	T	Cassonetto (M1)	300,00	2,325
M11	T	Cassonetto (M1)	300,00	2,325
M12	E	Cassonetto (M2)	300,00	2,325

Tabella 19 – Riepilogo componenti muratura verticale

- IV. Il pavimento controterra si estende per circa 2630 m². È composto da una base di sabbia e ghiaia, getto di calcestruzzo di sabbia e ghiaia, sottofondo di cemento magro e da una pavimentazione piastrellata. La stratigrafia è riportata in Tabella 20.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Piastrelle in ceramica	20,00	1,30	0,015	2.300	0,84
Sottofondo di cemento magro	70,00	0,90	0,078	1.800	0,88
C.I.s. di sabbia e ghiaia	150,00	2,15	0,070	2.400	1,00
Sabbia e ghiaia	300,00	2,00	0,150	1.950	1,05

Tabella 20 - Stratigrafia P1

- V. Il pavimento interpiano è realizzato con una soletta in laterizio, un massetto ripartitore in calcestruzzo e un sottofondo di cemento magro su cui poggia una pavimentazione piastrellata. Le stratigrafie sono riportate in Tabella 21.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Piastrelle in ceramica	20,00	1,30	0,015	2.300	0,84
Sottofondo di cemento magro	40,00	0,90	0,044	1.800	0,88
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	50,00	1,49	0,034	2.200	0,88
Soletta in laterizio	220,00	0,61	0,361	1.100	0,84
Intonaco di gesso e sabbia	20,00	0,80	0,025	1.600	1,00

Tabella 21 - Stratigrafia P2 e P3

In Tabella 22 vengono riportati per ogni componente: tipologia, spessore e trasmittanza termica.

Pavimenti - riepilogo				
Codice	Tipo	Descrizione	Sp [mm]	Ue [W/m ² K]
P1	G	Pavimento su terreno	540,00	0,446
P2	D	Pavimento interpiano	350,00	1,221
P3	U	Pavimento vs NR	350,00	1,221

Tabella 22 - Riepilogo componenti pavimento

- VI. La copertura a terrazzo è composta da una soletta in laterizio, un massetto ripartitore in calcestruzzo, un sottofondo di cemento magro e un'impermeabilizzazione in bitume e sabbia su cui poggia una pavimentazione piastrellata. Le stratigrafie sono riportate in Tabella 23.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Piastrelle in ceramica	20,00	1,30	0,015	2.300	0,84
Impermeabilizzazione in bitume e sabbia	10,00	0,26	0,038	1.300	1,00
Sottofondo di cemento magro	80,00	0,90	0,089	1.800	0,88
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	50,00	1,49	0,034	2.200	0,88
Soletta in laterizio	220,00	0,61	0,361	1.100	0,84
Intonaco di gesso e sabbia	20,00	0,80	0,025	1.600	1,00

Tabella 23 – Stratigrafia S1 e S2

VII. Il soffitto interpiano è composto da una soletta in laterizio, un massetto ripartitore in calcestruzzo e un sottofondo di cemento magro su cui poggia una pavimentazione piastrellata. Le stratigrafie sono riportate in Tabella 24.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m ² K/W	kg/m ³	kJ/kgK
Piastrelle in ceramica	20,00	1,30	0,015	2.300	0,84
Sottofondo di cemento magro	40,00	0,90	0,044	1.800	0,88
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	50,00	1,49	0,034	2.200	0,88
Soletta in laterizio	220,00	0,61	0,361	1.100	0,84
Intonaco di gesso e sabbia	20,00	0,80	0,025	1.600	1,00

Tabella 24 – Stratigrafia S3 e S4

In Tabella 25 vengono riportati per ogni componente: tipologia, spessore e trasmittanza termica.

Soffitti - riepilogo				
Codice	Tipo	Descrizione	Sp [mm]	Ue [W/m ² K]
S1	T	Soffitto a terrazzo	400,00	1,377
S2	E	Soffitto a terrazzo NR	400,00	1,377
S3	D	Soffitto interpiano	350,00	1,473
S4	U	Soffitto vs NR	350,00	1,473

Tabella 25 - Riepilogo componenti soffitto

- PONTI TERMICI:

In questo sottoparagrafo viene affrontato il tema relativo ai ponti termici: essi rappresentano uno degli elementi più importanti ed impattanti all'interno della definizione di un involucro

Il ponte termico è rappresentato da un'area o un punto in cui perviene una riduzione della resistenza termica dovuta alla compenetrazione di due o più elementi aventi materiali e geometrie differenti. Tale fenomeno è generato dalla presenza di temperature superficiali minori rispetto ai componenti omogenei: questo comporta la creazione di una via preferenziale, non lineare, per lo scambio termico attraverso la struttura con relativi aumenti del flusso termico, dei costi energetici e della possibile formazione di condensa e muffa.

Il software EC 700, utilizzato per la modellazione, effettua i calcoli delle dispersioni considerando i ponti termici come fenomeno monodimensionale: sarà quindi necessaria la definizione della trasmittanza termica lineica Ψ_e .

Il modulo di EC 709, utilizzato per il calcolo delle trasmittanze lineiche, prevede una simulazione agli elementi finiti in coerenza alle norme UNI EN ISO 14683 ed UNI EN ISO 10211. Il modulo permette la definizione di molteplici ponti termici in funzione della loro posizione, geometria e caratteristiche termofisiche degli elementi coinvolti.

In Figura 33 è riportata la scheda dell'edificio utilizzata per la scelta dei ponti termici da modellare.

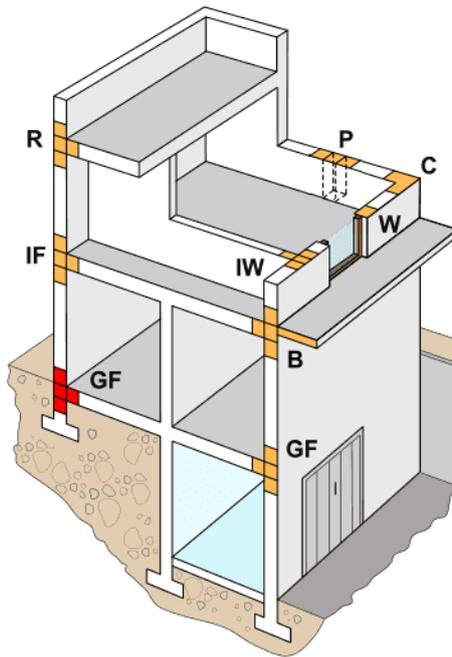


Figura 33 – Edificio per la selezione dei ponti termici attraverso EC 709

- I. La prima tipologia di ponte termico analizzata è relativa al caso specifico “Angolo tra pareti”, indicata in Figura 33 come caso C. In particolare è possibile fare riferimento ad angoli sporgenti, rientranti, con o senza pilastro.
- In Figura 34, 35, 36 e 37 sono rappresentati i ponti termici della categoria sopracitata, con particolare focus sul valore di trasmittanza lineica e immagine con curve isoterme.

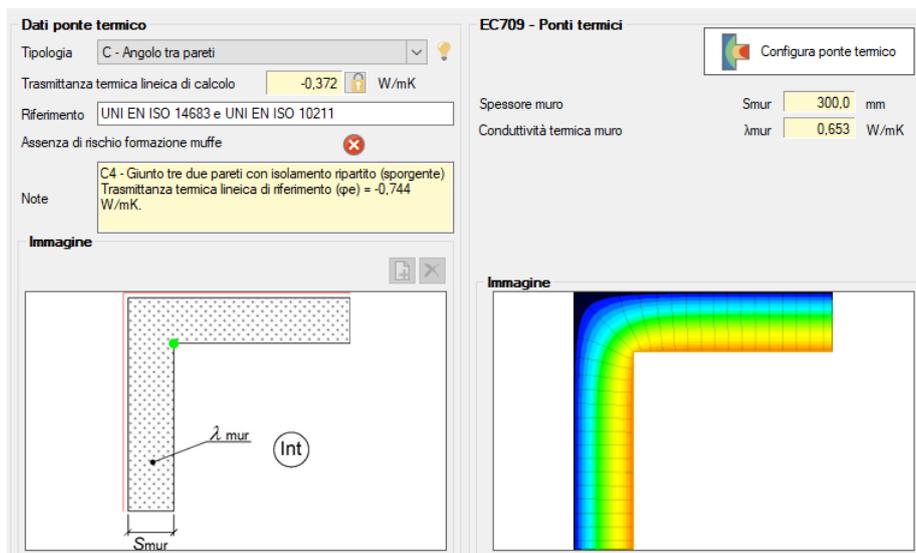


Figura 34 – Ponte termico Z5 – Angolo tra pareti sporgente senza pilastro

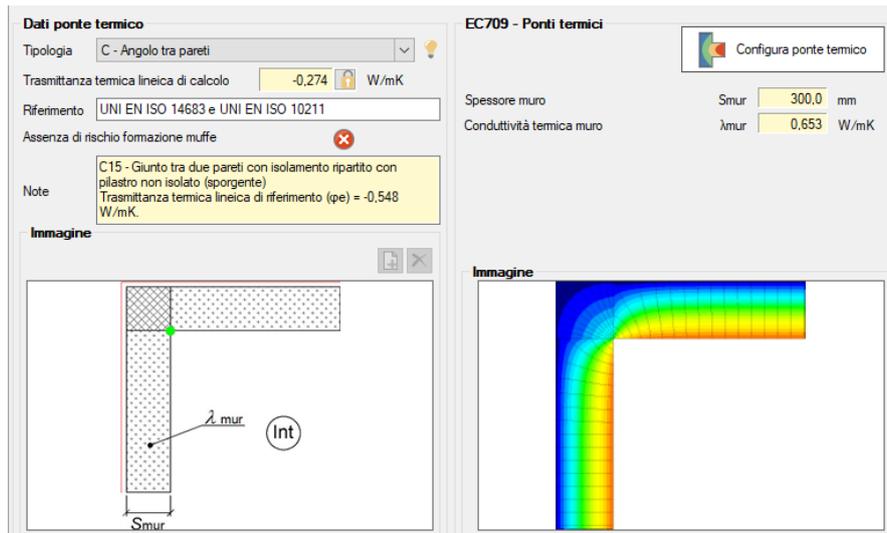


Figura 35 – Ponte termico Z6 – Angolo tra pareti sporgente con pilastro

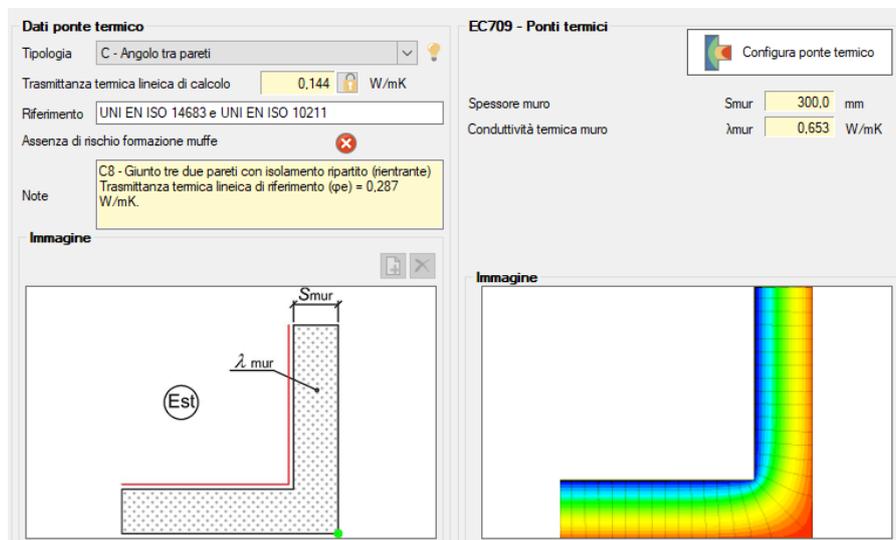


Figura 36 – Ponte termico Z7 – Angolo tra pareti rientrante senza pilastro

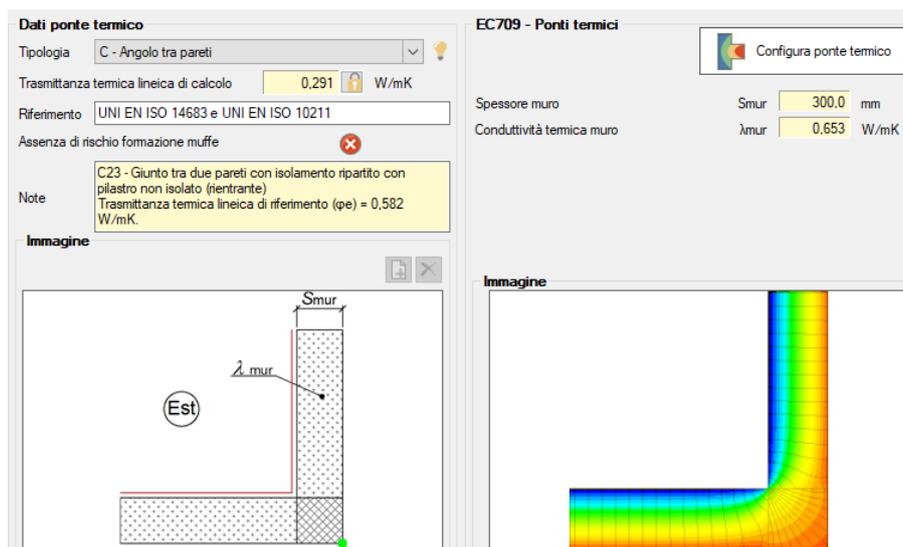


Figura 37 – Ponte termico Z8 – Angolo tra pareti rientrante con pilastro

II. La seconda tipologia di ponte termico analizzata è relativa al caso specifico “Parete-Pilastro”, indicata in Figura 33 come caso P.

In Figura 38 è rappresentato il ponte termico della categoria sopracitata, con particolare focus sul valore di trasmittanza lineica e immagine con curve isoterme.

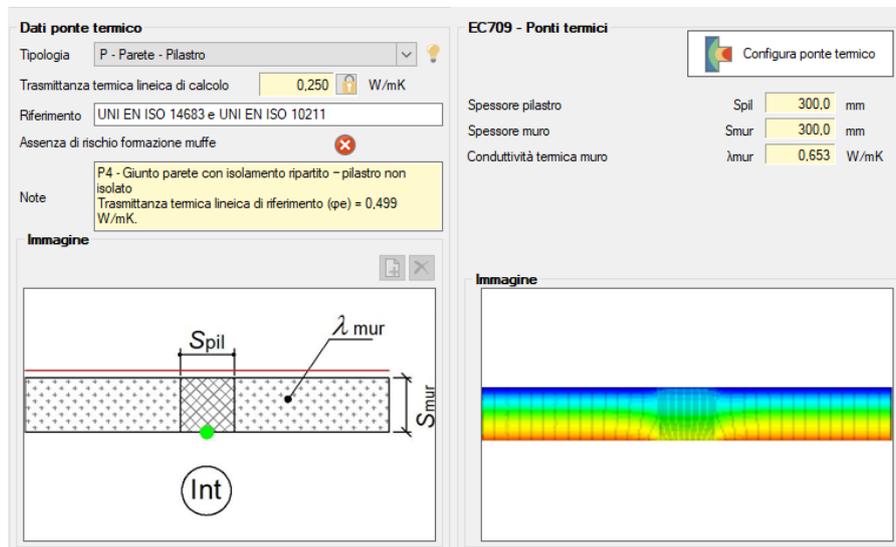


Figura 38 – Ponte termico Z9 – Parete-Pilastro

III. La terza tipologia di ponte termico analizzata è relativa al caso specifico “Parete-Solaio controterra”, indicata in Figura 33 come caso GF.

In Figura 39 è rappresentato il ponte termico della categoria sopracitata, con particolare focus sul valore di trasmittanza lineica e immagine con curve isoterme.

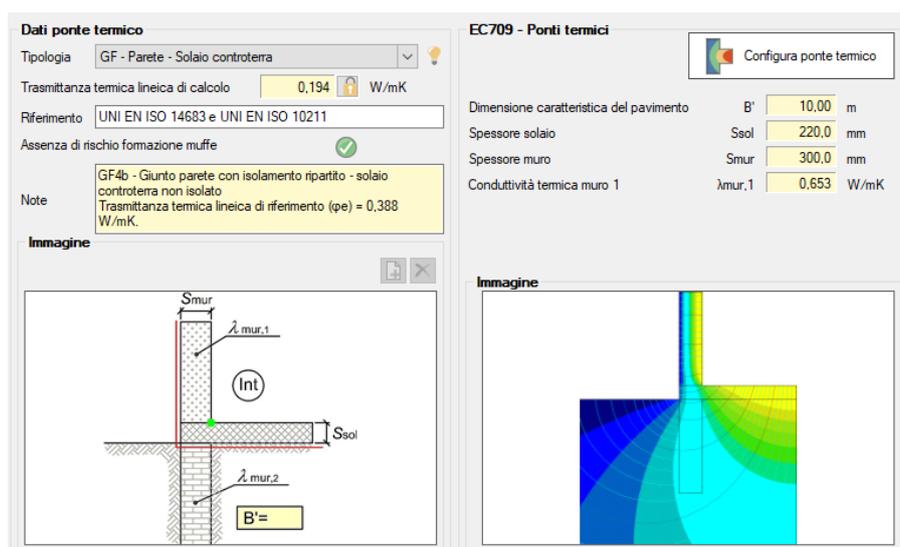


Figura 39 – Ponte termico Z1 – Parete-Solaio controterra

IV. La quarta tipologia di ponte termico analizzata è relativa al caso specifico “Parete-Solaio interpiano”, indicata in Figura 33 come caso IF.

In Figura 40 è rappresentato il ponte termico della categoria sopracitata, con particolare focus sul valore di trasmittanza lineica e immagine con curve isoterme.

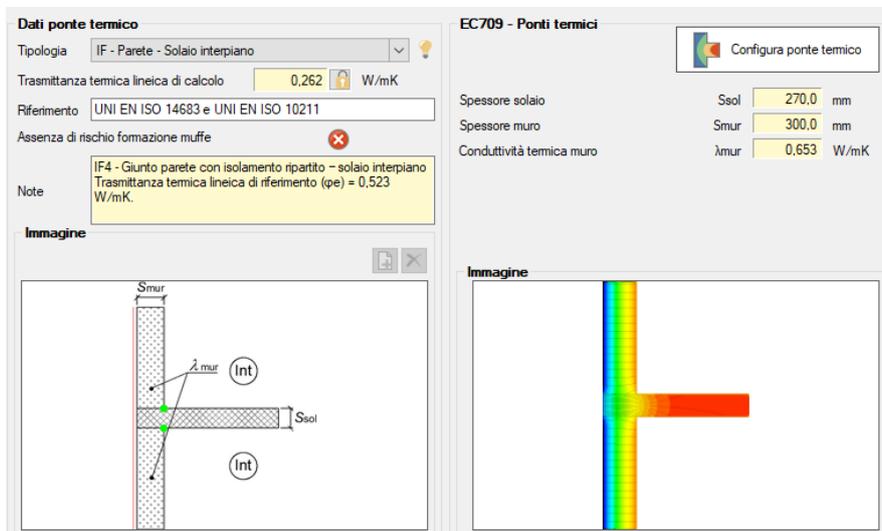


Figura 40 – Ponte termico Z2 – Parete-Solaio interpiano

V. La quinta tipologia di ponte termico analizzata è relativa al caso specifico “Telaio-Solaio interpiano”, indicata in Figura 33 come caso W.

In Figura 41 è rappresentato il ponte termico della categoria sopracitata, con particolare focus sul valore di trasmittanza lineica e immagine con curve isoterme.

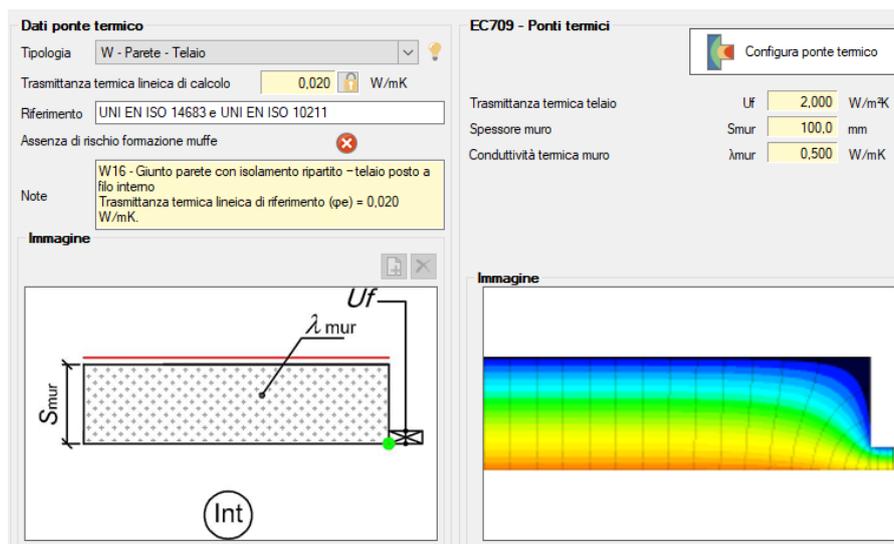


Figura 41 – Ponte termico Z13 – Telaio-Solaio interpiano

VI. La sesta tipologia di ponte termico analizzata è relativa al caso specifico “Parete-Telaio”, indicata in Figura 33 come caso W.

In Figura 42 è rappresentato il ponte termico della categoria sopracitata, con particolare focus sul valore di trasmittanza lineica e immagine con curve isoterme.

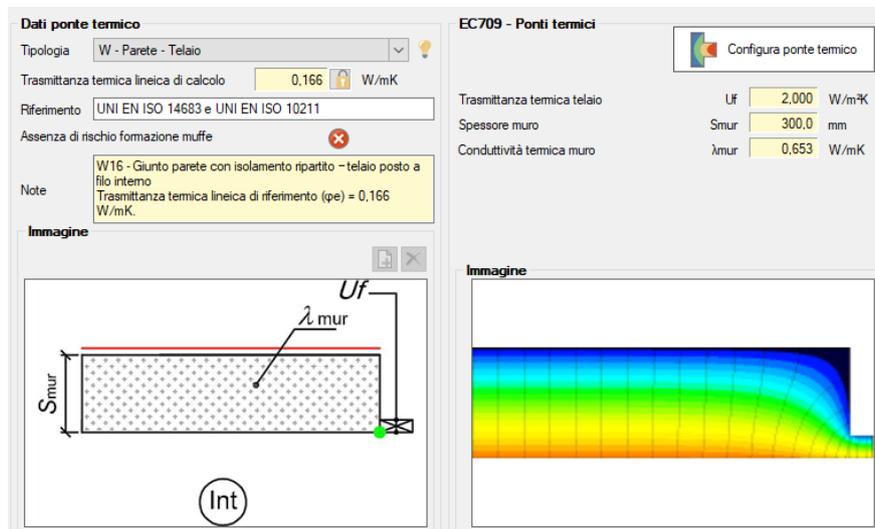


Figura 42 – Ponte termico Z10, Z11, Z12 – Parete-Telaio

VII. La settima tipologia di ponte termico analizzata è relativa al caso specifico “Parete-Copertura”, indicata in Figura 33 come caso R.

In Figura 43 e 44 sono rappresentati i ponti termici della categoria sopracitata, relativi rispettivamente alla copertura confinante con ambiente climatizzato e non climatizzato, con particolare focus sul valore di trasmittanza lineica e immagine con curve isoterme.

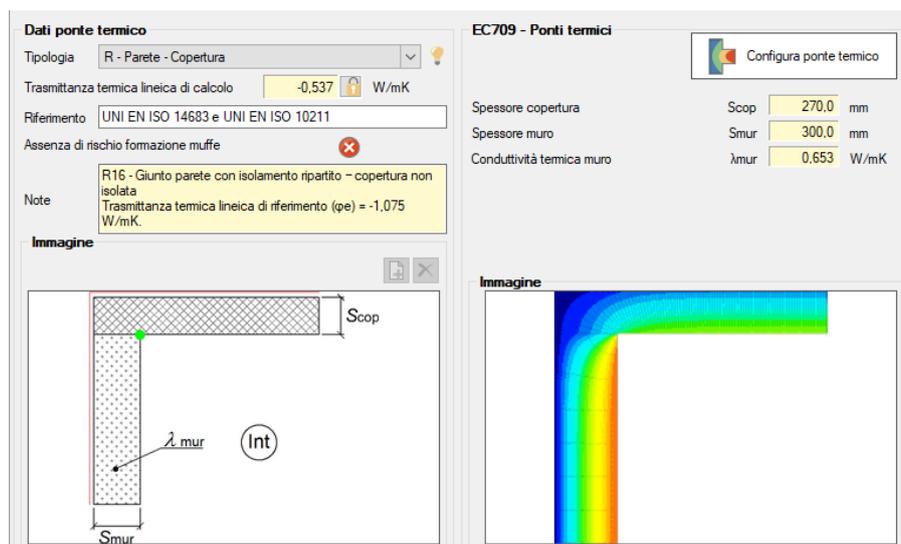


Figura 43 – Ponte termico Z3 – Parete-Copertura

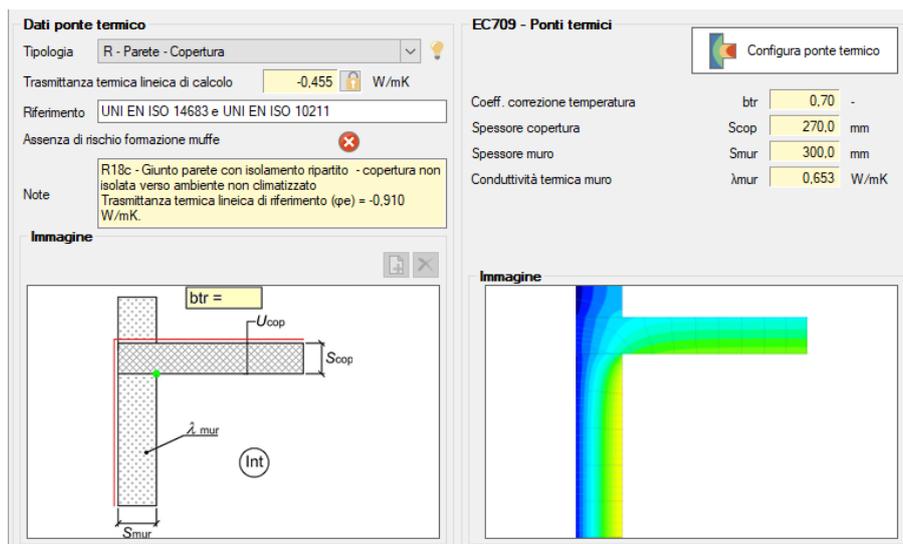


Figura 44 – Ponte termico Z4 – Parete-Copertura NR

In Tabella 26 viene riportata per ogni ponte termico la trasmittanza termica lineica Ψ [W/mK].

Ponti termici - riepilogo		
Codice	Descrizione	Ψ [W/mK]
Z1	GF - Parete - Solaio controterra	0,194
Z2	IF - Parete - Solaio interpiano	0,262
Z3	R - Parete - Copertura	-0,537
Z4	R - Parete - Copertura NR	-0,455
Z5	C - Angolo tra pareti senza pilastro (SPORGENTE)	-0,372
Z6	C - Angolo tra pareti con pilastro (SPORGENTE)	-0,274
Z7	C - Angolo tra pareti (RIENTRANTE)	0,144
Z8	C - Angolo tra pareti con pilastro (RIENTRANTE)	0,291
Z9	P - Parete - Pilastro	0,250
Z10	W - Parete - Telaio	0,166
Z11	W - Parete - Telaio	0,166
Z12	W - Parete - Telaio	0,166
Z13	W - Telaio - Solaio interpiano	0,020

Tabella 26 - Riepilogo ponti termici

• COMPONENTI TRASPARENTI:

La scuola presenta un'estensione dell'area vetrata pari a circa 715 m². Tutti i serramenti possiedono le medesime tipologie di vetro e telaio, in particolare:

- I componenti vetrati, come mostrato in Figura 45, sono doppi e possiedono uno spessore di 4 mm per i due vetri e di 6 mm per l'intercapedine, la cui resistenza è di 0,127 m²K/W. Il vetro possiede un'emissività di 0,837 e un fattore di trasmittanza solare/diretta rispettivamente di 0,750 e 0,820.
- Il frame è in alluminio senza taglio termico (K telaio è di 7 W/m²K) ed è caratterizzato da traversi e montanti con uno spessore pari a 5 cm.
- Per ogni finestra è possibile indicare la presenza di un cassonetto e/o di un ponte termico: in Figura 46 è possibile notare l'immissione di tali contributi in un singolo serramento.
- Associate al cassonetto, si registra la presenza di chiusure avvolgibili oscuranti in plastica (sprovviste di schiuma di riempimento), di cui è stata stimata, in conformità alle normative DR UNI EN ISO 10077-1 e UNI TS 11300-1, una permeabilità all'aria di 0,12 m²K/W.

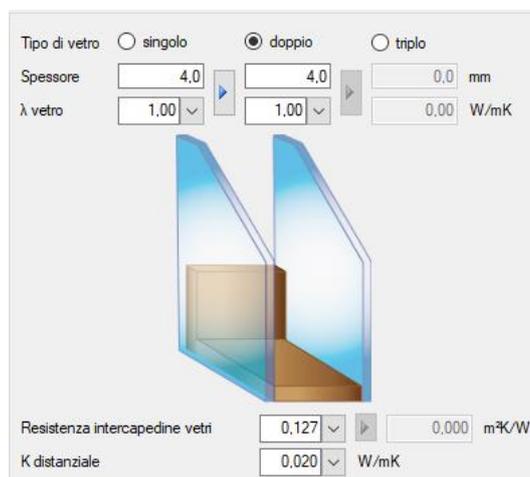


Figura 45 - Dettaglio vetro doppio

<input checked="" type="checkbox"/> Cassonetto			
Struttura	M3 - Cassonetto (M1)		
Altezza	Hcass	40,0	cm
Larghezza	Lcass	335,0	cm
Profondità	Pcass	14,0	cm
			Area frontale 1,34 m ²
Dimensioni serramento			
Larghezza	L	335,0	cm
Altezza	H	129,0	cm
			Area 4,32 m ²
<input checked="" type="checkbox"/> Ponte termico			
Trascura nei calcoli della trasmittanza media <input type="checkbox"/>			
Ponte termico	Struttura	ψ lineica W/mK	Lunghezza m
<input type="checkbox"/> Davanzale	Z10 - W - Parete - Telaio	0,166	10,0
<input type="checkbox"/> Architrave	-	0,000	3,4
	-	0,000	3,4

Figura 46 - Dettaglio immissione cassonetto e ponte termico

In Tabella 27, 28, 29 e 30 vengono riportati per ogni componente: tipologia, dimensioni geometriche e trasmittanza termica.

Componenti finestrati - riepilogo					
Codice	Tipo	Descrizione	L [cm]	H [cm]	U _w [W/m²K]
W1	T	Aula 60 335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W2	T	Aula 60 335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W3	T	Aula 32_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W4	T	Aula 32_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W5	T	Aula 66_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W6	T	Aula 66_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W7	T	Aula 67_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W8	T	Aula 67_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W9	T	Aula 65_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W10	T	Aula 65_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W11	T	Mensa 64_113x170_03_PT_Finestra	113,0	128,0	3,886
W12	T	Mensa 64_184x261_03_PT_Porta Finestra	184,0	219,0	3,777
W13	T	Mensa 64_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W14	T	Mensa 64_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W15	T	Mensa 64_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W16	T	Mensa 64_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W17	T	Mensa 64_227x112_06_PT	227,0	75,0	4,080
W18	E	Cucina 5_418x46_08_PT	418,0	46,0	4,223
W19	E	Cucina 5_300x46_04_PT	300,0	46,0	4,206
W20	E	Cucina 5_97x46_07_PT	97,0	46,0	4,328
W21	E	Cucina 5_418x46_08_PT	418,0	46,0	4,223
W22	E	Deposito 76_330x46_10_PT	330,0	46,0	4,186
W23	E	Deposito mensa_165X265_11_PT	165,0	217,0	3,964
W24	E	WC 71_165x46_12_PT	165,0	46,0	4,388
W25	T	Mensa 64_165x46_12_PT	165,0	46,0	4,388
W26	T	Mensa 64_170x167_15_PT	170,0	130,0	3,965
W27	T	Mensa 64_330x46_10_PT	330,0	46,0	4,186
W28	T	Aula 4_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W29	T	Aula 4_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W30	T	Aula 3_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W31	T	Aula 3_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W32	T	Aula 68_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W33	T	Aula 68_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W34	T	Aula 63_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W35	T	Aula 63_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W36	T	Aula 62_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W37	T	Aula 62_335x166_02_PT	335,0	129,0	3,953
W38	T	Vano scala_170X262_01_PT	170,0	217,0	3,959

Tabella 27 - Riepilogo componenti trasparenti W1-W38

Componenti finestrati - riepilogo					
Codice	Tipo	Descrizione	L [cm]	H [cm]	Uw [W/m²K]
W39	T	Atrio 41_658x164_19_PT	658,0	127,0	3,954
W40	T	WC 48_230X111_20_PT	230,0	111,0	4,127
W41	E	Vano scala_122X589_GR_PT	122,0	589,0	3,682
W42	T	WC 51_230X111_20_PT	230,0	111,0	4,127
W43	T	Atrio 47_158x622_21_PT	153,0	617,0	3,610
W44	T	Atrio 47_368X166_22_PT	368,0	129,0	3,918
W45	U	Atrio 47_658X300_26_PT	658,0	217,5	3,374
W46	E	Ingresso 45_658X260_25_PT	658,0	215,5	3,894
W47	T	Ufficio 27_460x166_35_PT	460,0	129,0	3,846
W48	E	WC 29_115x125_27_PT	115,0	125,0	3,731
W49	E	WC 28_115x125_27_PT	115,0	125,0	3,731
W50	T	Ufficio 2_333X166_28_PT	333,0	129,0	3,955
W51	T	Ufficio 26_650X164_29_PT	650,0	129,0	3,859
W52	T	Ufficio 26_228X164_30_PT	228,0	164,0	3,659
W53	T	Ufficio 26_120X220_31_PT	120,0	220,0	3,760
W54	T	Dst 18_177X262_32_PT	177,0	217,0	3,942
W55	E	WC 12_117X111_33_PT	117,0	111,0	3,765
W56	E	Deposito 14_250x111_34_PT	250,0	111,0	4,103
W57	T	Deposito 15_250x111_34_PT	250,0	111,0	4,103
W58	E	WC 21_117x111_33_PT	115,0	125,0	3,731
W59	E	Deposito 16_117x111_33_PT	115,0	125,0	3,731
W60	E	Deposito 16_250x111_34_PT	250,0	111,0	4,103
W61	T	Dst 70_120X220_31_PT	120,0	220,0	3,760
W62	E	WC 24_135x111_37_PT	135,0	111,0	4,082
W63	E	WC 25_135x111_37_PT	135,0	111,0	4,082
W64	E	WC 23_135x111_37_PT	135,0	111,0	4,082
W65	T	Dst 70_218x115_38_PT	218,0	115,0	4,119
W66	E	Deposito 19_125x111_36_PT	125,0	111,0	4,103
W67	T	Palestra 46_465X260_41_PT	465,0	215,5	3,831
W68	T	Palestra 46_448X260_42_PT	448,0	215,5	3,842
W69	T	Atrio 73_180X256_43_PT_Porta Finestra	180,0	214,0	3,941
W70	T	Atrio 73_299X165_43_PT_Finestra	299,0	123,0	3,890
W71	T	Atrio73_477X164_16_PT	477,0	127,0	3,906
W72	T	Atrio1_238X170_17_PT_Finestra	238,0	128,0	3,962
W73	T	Atrio1_238X170_17_PT_Finestra	238,0	128,0	3,962
W74	T	Atrio 1_184X261_17_PT_Porta Finestra	184,0	261,0	3,867
W75	T	WC 52_227x112_09_PT	227,0	112,0	4,125
W76	T	WC 61_227x112_09_PT	227,0	112,0	4,125

Tabella 28 – Riepilogo componenti trasparenti W39-W76

MARCO POLITI
POLITECNICO DI TORINO – TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Componenti finestrati - riepilogo					
Codice	Tipo	Descrizione	L [cm]	H [cm]	U _w [W/m²K]
W77	T	Dst 72_170X262_01_PT	170,0	217,0	3,959
W78	T	Cortile 58_177X262_32_PT	177,0	217,0	3,942
W79	T	Cortile 58_474X260_45_PT	474,0	211,5	3,949
W80	T	Cortile 58_588X260_46_PT	588,0	209,5	3,609
W81	T	Cortile 58_509X260_47_PT	509,0	209,5	3,984
W82	T	Cortile 58_467X260_48_PT	467,0	209,5	4,018
W83	T	Cortile 58_217X165_49_PT	217,0	110,0	3,860
W84	T	Cortile 58_234x111_50_PT	234,0	111,0	4,122
W85	T	Cortile 53_506X260_47_PT	506,0	209,5	3,987
W86	T	Cortile 54_538X260_48_PT	538,0	209,5	3,965
W87	T	Ingresso 45_208X166_24_PT	208,0	129,0	3,893
W88	E	Aula 77_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W89	E	Aula 77_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W90	E	Aula 78_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W91	E	Aula 78_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W92	E	Aula 79_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W93	E	Aula 79_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W94	T	Aula 89_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W95	T	Aula 89_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W96	E	Aula 90_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W97	E	Aula 90_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W98	E	Aula 103_305x166_05_1P	305,0	129,0	3,991
W99	E	Aula 103_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W100	E	Aula 104_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W101	E	Aula 104_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W102	T	Aula 106_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W103	T	Aula 106_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W104	E	Aula 108_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W105	E	Aula 108_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W106	E	Aula 109_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W107	E	Aula 109_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W108	T	Aula 115_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W109	T	Aula 115_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W110	T	Aula 112_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W111	T	Aula 112_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W112	T	Aula 113_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W113	T	Aula 113_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W114	T	Aula 110_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953

Tabella 29 - Riepilogo componenti trasparenti W77-W114

MARCO POLITI
POLITECNICO DI TORINO – TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Componenti finestrati - riepilogo					
Codice	Tipo	Descrizione	L [cm]	H [cm]	Uw [W/m²K]
W114	T	Aula 110_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W115	T	Aula 110_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W116	T	Aula 111_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W117	T	Aula 111_335x166_02_1P	335,0	129,0	3,953
W118	T	Atrio 114_170X262_01_1P	170,0	217,0	3,959
W119	T	Aula didattica 116_658x164_19_1P	658,0	127,0	3,954
W120	T	WC 119_230X111_20_1P	230,0	111,0	4,127
W121	T	WC 125_230X111_20_1P	230,0	111,0	4,127
W122	T	Atrio 128_368X166_22_1P	368,0	129,0	3,918
W123	T	Atrio 128_340X166_18_1P	340,0	129,0	3,947
W124	T	Atrio 128_660X164_23_1P	660,0	122,0	3,939
W125	T	Atrio107_238X170_17_PT_Finestra	238,0	128,0	3,962
W126	T	Atrio107_238X170_17_1P_Finestra	238,0	128,0	3,962
W127	T	Atrio107_184X261_17_1P_Porta Finestra	184,0	261,0	3,867
W128	T	WC 93_234x111_50_1P	234,0	111,0	4,122
W129	E	WC 99_234x111_50_1P	234,0	111,0	4,122
W130	T	Atrio131_180X252_44_1P	180,0	222,0	3,959
W131	T	Atrio 131_477X164_16_1P	477,0	127,0	3,906
W132	T	Locale 132_448X143_40_1P	448,0	143,0	3,846
W133	T	Locale 132_465X143_39_1P	465,0	143,0	3,839
W134	T	Locale 91_477X164_16_1P	477,0	127,0	3,906
W135	T	Atrio 88_660X164_23_1P	660,0	122,0	3,939
W136	T	Atrio 88_170X262_01_1P	170,0	217,0	3,959
W137	E	Locale 84_227x112_09_1P	227,0	112,0	4,125
W138	E	Locale 135_227x112_09_1P	227,0	112,0	4,125
W139	T	Locale 130_215x164_13_1P	215,0	130,0	3,743
W140	T	Locale 130_150x164_14_1P	150,0	164,0	3,845
W141	T	Locale 130_135x111_37_1P	135,0	111,0	4,082
W142	T	Locale 130_150x164_14_1P	150,0	164,0	3,845
W143	E	Locale 138_120x262_51_2P	120,0	232,0	4,145
W144	E	Locale 138_80x227_52_2P	80,0	227,0	3,913
W145	E	Locale 138_120x262_51_2P	120,0	232,0	4,145
W146	E	Locale 138_120x262_51_2P	120,0	232,0	4,145
W147	E	Locale 138_80x227_52_2P	80,0	227,0	3,913
W148	E	Locale 139_120x262_51_2P	120,0	232,0	4,145
W149	E	Locale 139_80x227_52_2P	80,0	227,0	3,913
W150	E	Locale 139_120x262_51_2P	120,0	232,0	4,145
W151	T	Copia di Atrio 47_158x622_21_PT	158,0	622,0	3,805

Tabella 30 - Riepilogo componenti trasparenti W114-W151

2.3.3 – INPUT GRAFICO E LOCALI CLIMATIZZATI

I componenti definiti nel paragrafo precedente sono stati utilizzati all'interno dell'input grafico del software. Attraverso di esso è stato realizzato un modello 3D della scuola al fine di definirne le perdite legate al solo fabbricato, escludendo qualsiasi contributo degli impianti installati. Il modello viene realizzato a partire dalla caratterizzazione complessiva dei componenti dell'involucro, tenendo in considerazione anche i ponti termici, andando a definire le zone climatizzate e in secondo luogo, per ognuna di esse, i locali climatizzati.

Per ogni locale climatizzato sono stati definiti: tipologia di ventilazione e valore dei ricambi in volumi orari [Vol/h] in funzione della categoria e della sottocategoria dell'edificio; tipologia di illuminazione attraverso la valutazione della potenza elettrica specifica [W/m^2], del tempo di operatività [h/anno], del livello di illuminamento [lux] e del fattore di assenza medio; apporti interni invernali [W].

Il risultato grafico della modellazione 3D per la prospettiva Nord-Ovest e Sud-Est sono riportati rispettivamente in Figura 47 e 48. La suddivisione interna dei singoli piani, con la raffigurazione evidenziata in colore rosso dei locali climatizzati, viene riportata in Figura 49, 50 e 51.

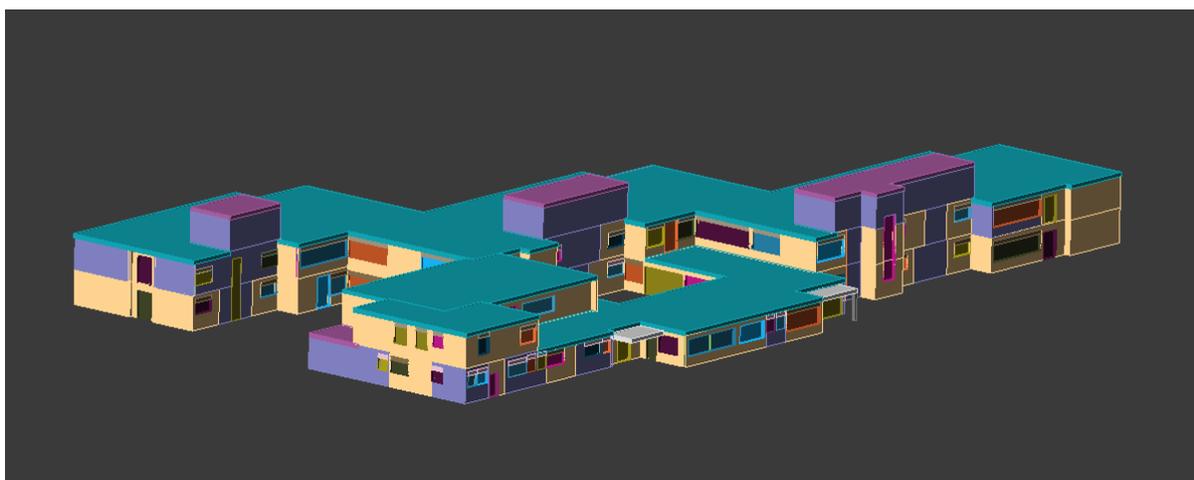


Figura 47 – Modello 3D Nord-Ovest

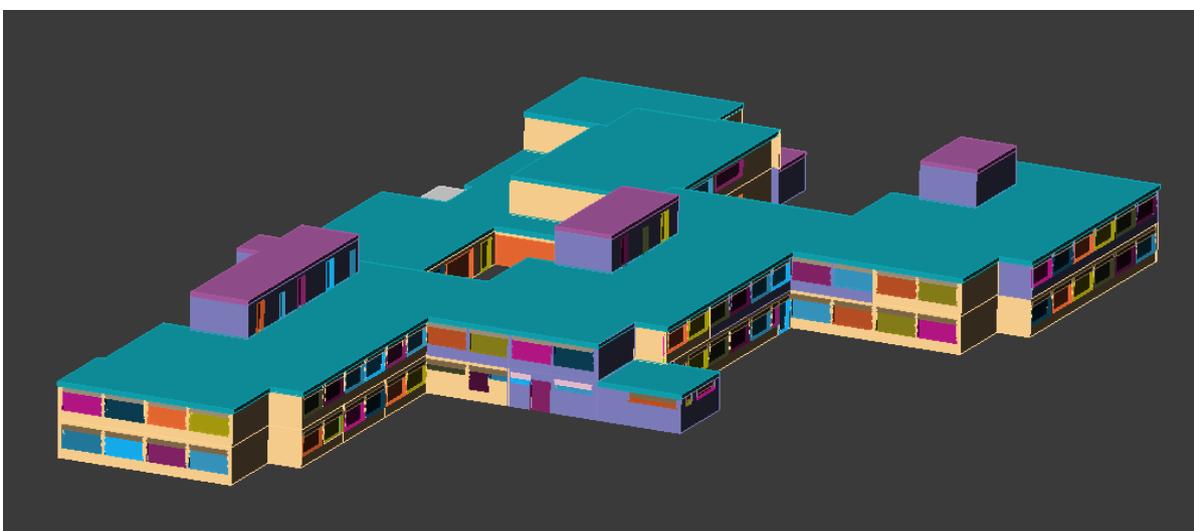


Figura 48 – Modello 3D Sud-Est

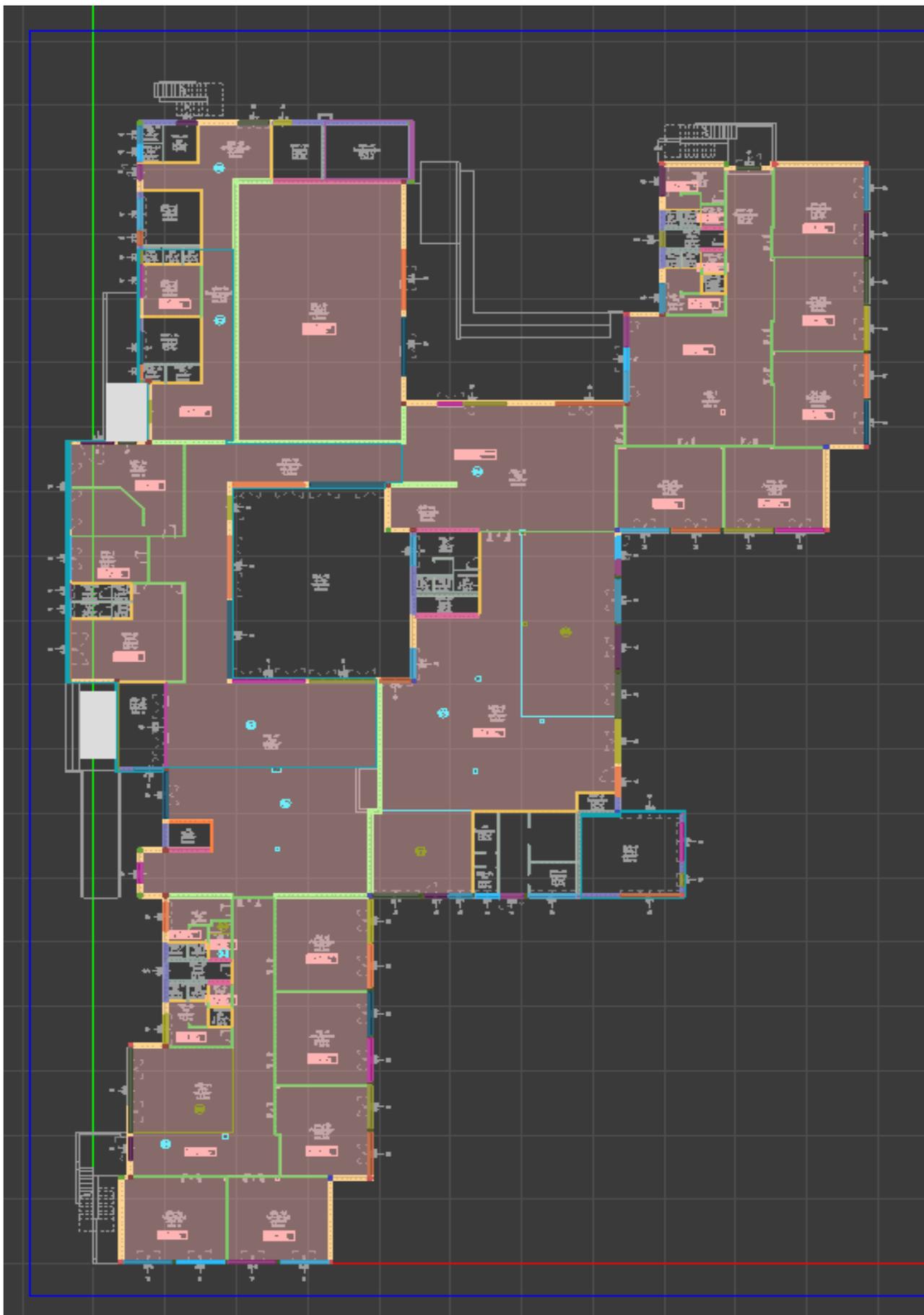


Figura 49 – Modello 2D piano terra

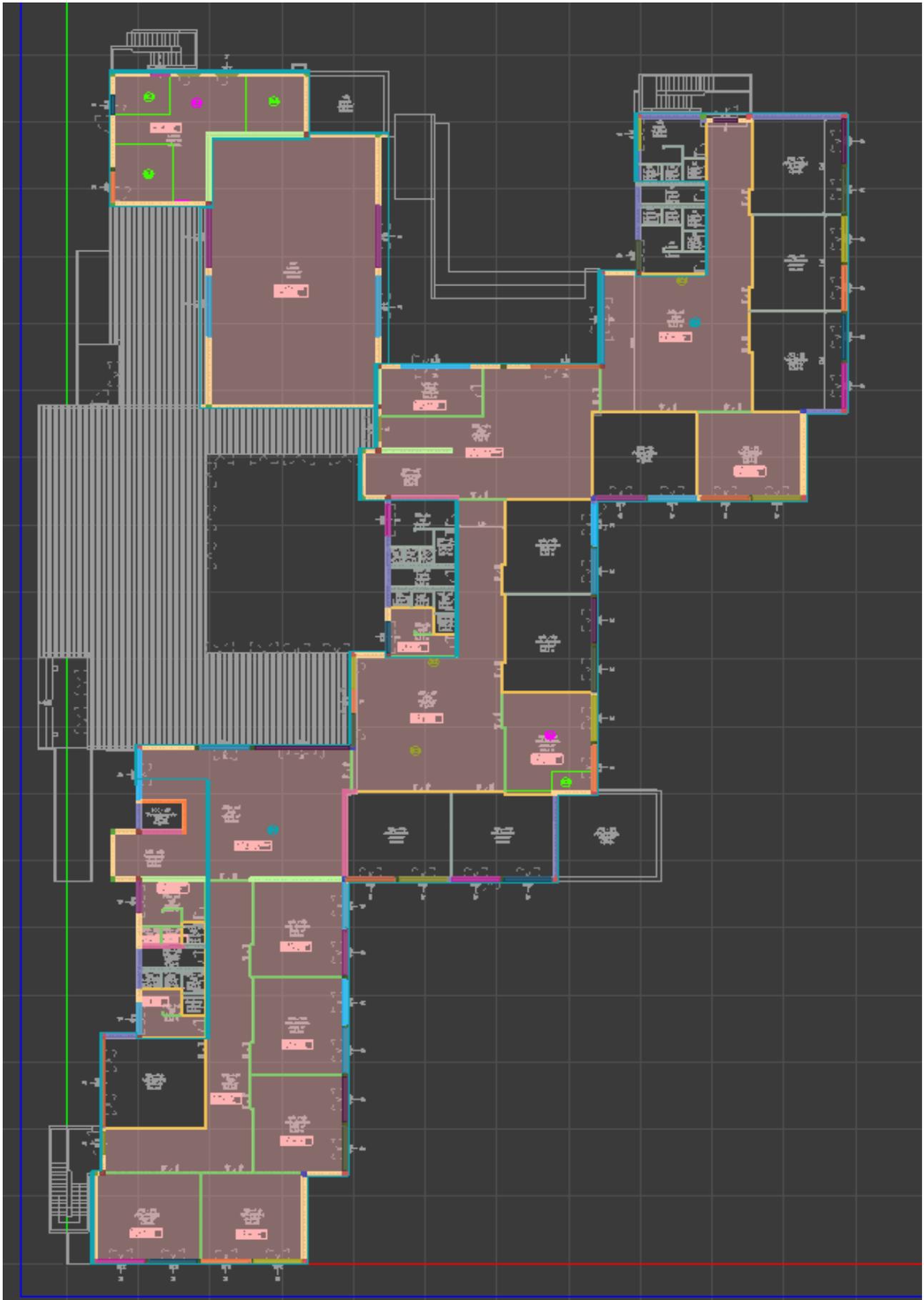


Figura 50 – Modello 2D primo piano

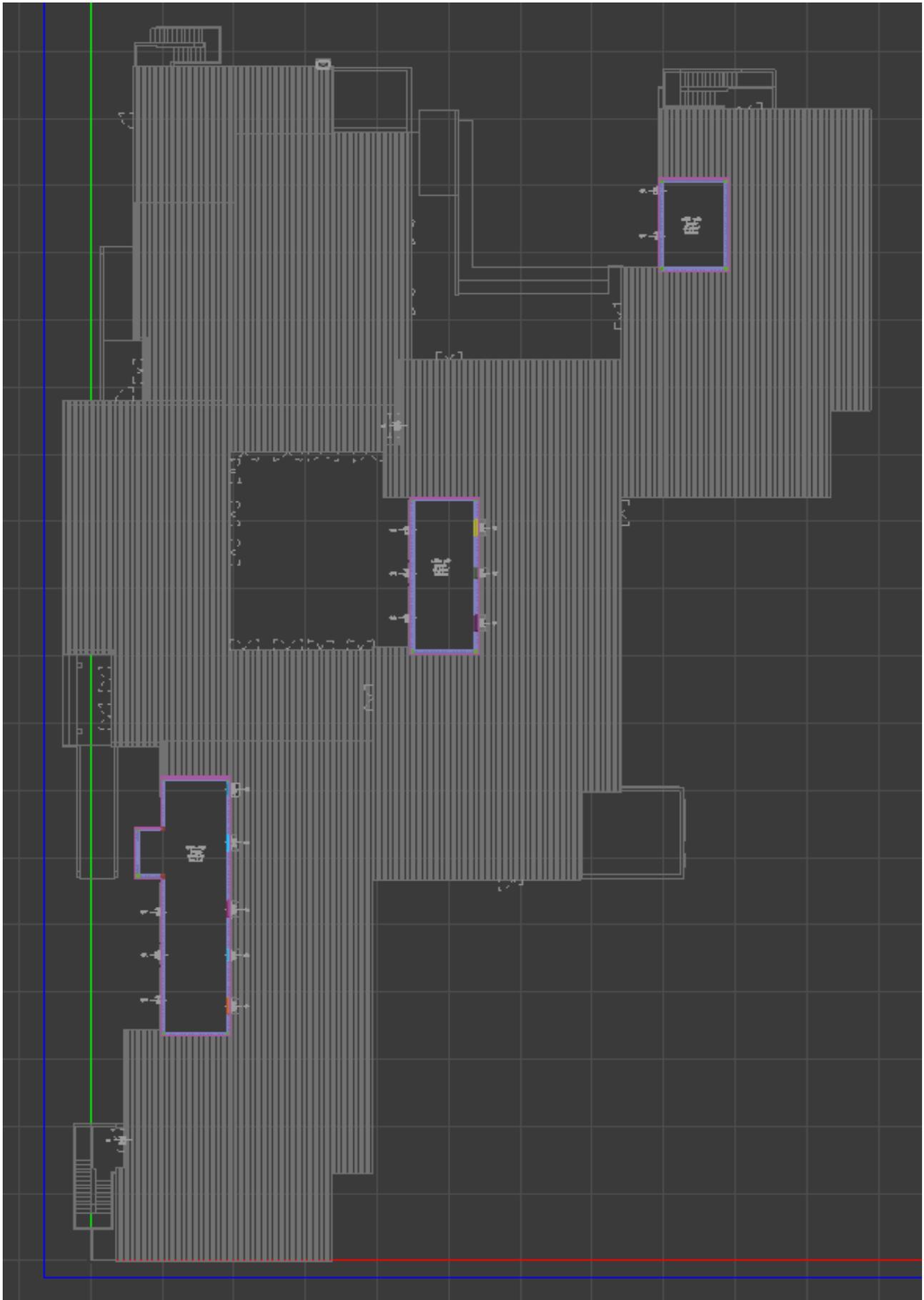


Figura 51 – Modello 2D secondo piano

2.3.4 – SISTEMA IMPIANTISTICO

La scuola può essere modellata attraverso la caratterizzazione di 3 sistemi impiantistici principali:

- L'impianto di riscaldamento è modellato attraverso la definizione di due circuiti distinti funzionanti in regime intermittente dalle 8:00 alle 16:00 per i giorni di apertura. Il primo circuito è legato all'utilizzo di radiatori ad acqua su parete esterna non coibentata, mentre il secondo è legato agli aerotermi ad acqua asserventi la sola palestra. Entrambi i circuiti possiedono una doppia regolazione: di zona e con sonda climatica esterna.

I parametri necessari alla definizione della centrale termica riguardanti generatori, bruciatori e pompe di ricircolo sono definiti secondo le schede tecniche fornite dal produttore e conformemente alle informazioni ottenute dal rilievo.

- L'impianto di illuminazione viene modellato attraverso la stima dei contributi elettrici asserventi tre tipologie di zone principali: illuminazione interna dei locali climatizzati, illuminazione interna dei locali non climatizzati, illuminazione esterna.

L'illuminazione interna è asservita attraverso l'utilizzo di lampade a fluorescenza ed è stimata, per ogni locale, attraverso l'immissione dei valori delle grandezze citate nel sottoparagrafo precedente. In particolare, per quanto riguarda i locali, sono stati utilizzati:

- potenza specifica: 9 W/m²;
- fattore manutenzione: 0,80 (locale pulito, uso ridotto);
- controllo illuminazione: 1,00 (controllo manuale);
- fattore di assenza medio: 0,00 (aule e uffici), 0,40 (corridoi) e 0,90 (servizi igienici);
- livello illuminamento: medio (aule, uffici E corridoi) e basso (servizi igienici).

Per ogni locale sono stati stimati i fabbisogni per i comandi di illuminazione automatici e di emergenza. Per ogni locale è stata inserita una stima, in funzione delle giornate di apertura della scuola e dell'esposizione geografica, delle ore annue di utilizzo.

L'illuminazione esterna, invece, è stata definita attraverso la stima della potenza elettrica complessiva dei dispositivi luminosi installati e dalle ore annue di utilizzo. In particolare sono stati riconosciuti dalle immagini del rilievo dei fari alogeni installati sul tetto, dei lampioni disposti lungo i vialetti dell'area verde e alcune lampade a led installate sulla parete Ovest della struttura. Dalle informazioni ottenute risulta, per quanto concerne l'illuminazione notturna, il solo utilizzo dei fari alogeni.

- L'impianto per il trasporto di persone e cose è costituito da un ascensore in grado di collegare il piano terra al primo piano. Nel modello è stato inserito un ascensore di categoria 3A in grado di sorreggere circa 450 kg e dotato di un sistema di illuminazione della cabina con lampade a incandescenza tradizionali. La potenza elettrica complessiva è stimata intorno ai 3000 W.

2.3.5 – RISULTATI DEL FABBRICATO E DI ENERGIA PRIMARIA

I risultati del fabbricato sono calcolati dal software a partire dai valori esportati dall'input grafico: prevedono la definizione delle potenze e dei consumi invernali ottenuti in funzione delle perdite legate all'involucro.

In Tabella 31 e 32 sono riportati i risultati della potenza invernale, in dettaglio sono raffigurati:

- V = Volume lordo della zona termica [m³];
- Φ_{tr} = Potenza dispersa per trasmissione [W];
- Φ_{ve} = Potenza dispersa per ventilazione [W];
- Φ_{rh} = Potenza dispersa per intermittenza [W];
- Φ_{hl} = Potenza dispersa complessivamente [W].

Dettaglio dispersioni			
Potenza dispersa per trasmissione	Φ_{tr}	213763	W
Potenza dispersa per ventilazione	Φ_{ve}	187149	W
Potenza dispersa per intermittenza	Φ_{rh}	0	W

Tabella 31 - Risultati fabbricato – Potenza Invernale - Dispersioni

Totali			
Volume totale	V	10078,2	m ³
Potenza totale	Φ_{hl}	400913	W
Potenza totale, con fattore di sicurezza	$\Phi_{hl\ sic}$	461050	W

Tabella 32 - Risultati fabbricato – Potenza Invernale – Totali

In Tabella 33, 34 e 35 sono presenti i risultati correlati ai consumi di energia durante in periodo invernale di riscaldamento. In particolare sono riportati i valori di:

- $Q_{h,tr}$ = Energia dispersa per trasmissione [kWh];
- $Q_{h,r}$ = Energia dispersa per extraflusso verso la volta celeste [kWh];
- $Q_{h,ve}$ = Energia dispersa per ventilazione [kWh];
- $Q_{h,ht}$ = Energia dispersa totale [kWh];
- $Q_{sol,w}$ = Apporti solari attraverso i componenti trasparenti [kWh];
- Q_{int} = Apporti interni [kWh];
- Q_i = Apporti aggiuntivi [kWh];
- Q_{gn} = Apporti totali [kWh];
- $Q_{h,nd}$ = Fabbisogno di Energia utile [kWh];
- Consumo specifico [kWh/m²];
- Consumo specifico [kWh/m³].

Dispersioni			
Dispersioni per trasmissione	Qh,tr	262683	kWh
Dispersioni per extraflusso	Qr	43827	kWh
Dispersioni per ventilazione	Qh,ve	123715	kWh
Dispersioni totali	Qh,ht	430224	kWh

Tabella 33 - Risultati fabbricato – Energia Invernale - Dispersioni

Apporti			
Apporti solari	Qsol,w	48329	kWh
Apporti interni	Qint	50556	kWh
Apporti aggiuntivi	Qi	50159	kWh
Apporti totali	Qgn	149044	kWh

Tabella 34 - Risultati fabbricato – Energia Invernale - Apporti

Bilancio energetico			
Energia utile	Qh,nd	294655	kWh
Consumo specifico		92,88	kWh / m ²
Consumo specifico		21,98	kWh / m ³
Stagione di riscaldamento			
dal	1 novembre	al	15 aprile
		giorni	166

Tabella 35 - Risultati fabbricato – Energia Invernale – Bilancio energetico

I risultati di Energia primaria sono calcolati secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-2, in accordo alla UNI/TS 11300-3 (riscaldamento e ACS) e alla UNI/TS 11300-4 (raffrescamento).

In Tabella 36 sono riportati i fabbisogni di energia primaria, distinta come segue:

- $Q_{p,nren}$ = fabbisogno di energia primaria non rinnovabile [kWh];
- $Q_{p,ren}$ = fabbisogno di energia primaria rinnovabile [kWh];
- $Q_{p,tot}$ = fabbisogno di energia primaria totale [kWh].

Servizio	Qp,nren [kWh]	Qp,ren [kWh]	Qp,tot [kWh]
Riscaldamento	183336	866	184202
Acqua calda sanitaria	0	0	0
Illuminazione	56570	13635	70205
Trasporto	2935	707	3643
Globale	242841	15208	258049

Tabella 36 – Risultati Energia primaria

In Tabella 37 sono riportati gli Indici di Prestazione Energetica, distinti come segue:

- EP_{nren} = Indice di Prestazione Energetica non rinnovabile [kWh/m²];
- EP_{ren} = Indice di Prestazione Energetica rinnovabile [kWh/m²];
- EP_{tot} = Indice di Prestazione Energetica totale [kWh/m²].

Servizio	EP_{nren} [kWh/m ²]	EP_{ren} [kWh/m ²]	EP_{tot} [kWh/m ²]
Riscaldamento	57,79	0,27	58,06
Acqua calda sanitaria	0,00	0,00	0,00
Illuminazione	17,83	4,30	22,13
Trasporto	0,93	0,22	1,15
Globale	76,55	4,79	81,34

Tabella 37 – Risultati Energia primaria – Indici di Prestazione Energetica

In Tabella 38 sono riportati i vettori energetici per cui sono indicati:

- Consumi di Gas Metano [Nm³/anno]
- Emissioni CO₂ da Gas Metano [kg/anno]
- Consumi di energia elettrica [kWh/anno]
- Emissioni CO₂ da energia elettrica [kg/anno]

Vettore energetico	Consumo	U.M.	CO ₂ [kg/anno]	Servizi
Metano	17222	Nm ³ /anno	35949	Riscaldamento
Energia elettrica	32358	kWhel/anno	14885	Riscaldamento, Acqua calda sanitaria, Illuminazione, Trasporto

Tabella 38 – Risultati Energia primaria – Consumi + Emissioni CO₂

2.3.6 – DISAGGREGAZIONE DEI CONSUMI

In Figura 52 è riportata la disaggregazione dei consumi di energia elettrica medi rispetto alle due annualità di riferimento. Nella corona esterna sono riportati i tre ambiti principali di applicazione del vettore energetico: illuminazione (91%), ausiliari dell’impianto termico (4,3%) e trasporto (4,7%). Nella corona interna è riportata la suddivisione dei contributi di illuminazione:

- Illuminazione CL1: locali climatizzati quali aule, uffici e palestra (19%);
- Illuminazione CL2: locali climatizzati quali atri, corridoi e servizi igienici (39%);
- Illuminazione CL3: locale climatizzato della mensa (3%);
- Illuminazione NR1: locale non climatizzato della cucina (1%);
- Illuminazione NR2: locali non climatizzati quali aule, depositi, servizi igienici, altri locali (2%);
- Illuminazione EXT: esterna (8%);
- Emergenza: illuminazione e dispositivi di emergenza (20%).

Disaggregazione consumi energia elettrica

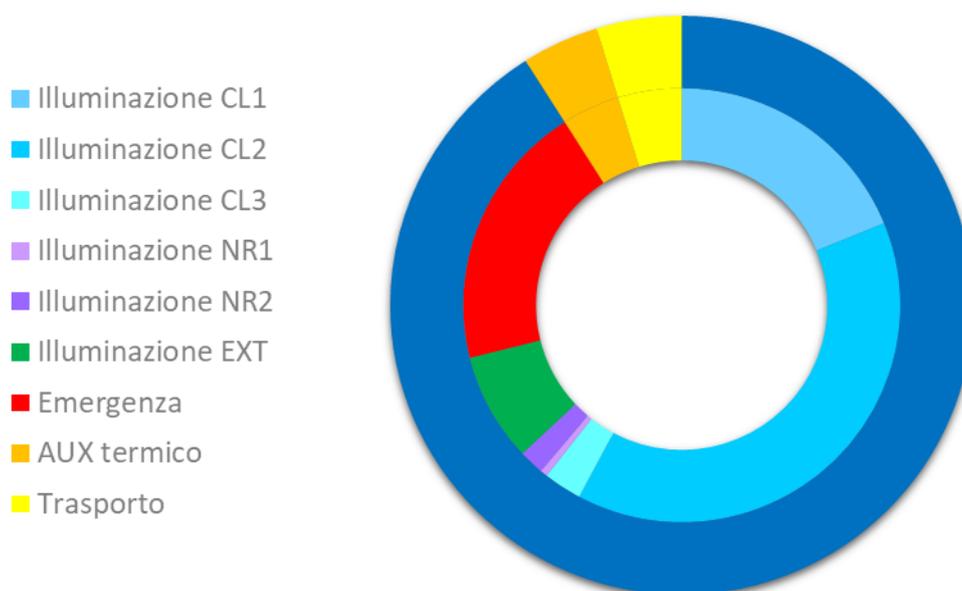


Figura 52 – Disaggregazione consumi energia elettrica

2.4 – CLASSE ENERGETICA (EC 701)

Il calcolo della classe energetica è stato effettuato selezionando sul modello realizzato l'approccio A1 (Design Rating). Questo tipo di approccio si basa su dati in ingresso relativi al clima e all'uso dell'edificio di tipo standard e viene utilizzato per verifiche di legge e per certificazioni energetiche. I principali valori ottenuti, riportati in Figura 53, sono:

- $EP_{gl,nren}$ = indice di prestazione energetica non rinnovabile, espresso in kWh/m²anno, identifica la somma degli indici di prestazione di tutti i servizi asserventi nell'edificio di studio;
- Classe energetica = indicante la qualità energetica dell'edificio, viene definita secondo le linee guida dell'Allegato 4 del D.M. del 26 Giugno 2020.



ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

CODICE IDENTIFICATIVO: VALIDO FINO AL: 03/04/2034



DATI GENERALI

<p>Destinazione d'uso</p> <p><input type="checkbox"/> Residenziale</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Non residenziale</p> <p>Classificazione D.P.R. 412/93: <input type="text" value="E.7"/></p>	<p>Oggetto dell'attestato</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Intero edificio</p> <p><input type="checkbox"/> Unità immobiliare</p> <p><input type="checkbox"/> Gruppo di unità immobiliari</p> <p>Numero di unità immobiliari di cui è composto l'edificio: <input type="text" value="1"/></p>	<p><input type="checkbox"/> Nuova costruzione</p> <p><input type="checkbox"/> Passaggio di proprietà</p> <p><input type="checkbox"/> Locazione</p> <p><input type="checkbox"/> Ristrutturazione importante</p> <p><input type="checkbox"/> Riqualificazione energetica</p> <p><input type="checkbox"/> Altro: <input type="text"/></p>
--	---	--

Dati identificativi

<p>FOTO EDIFICIO</p>	<p>Regione : <input type="text" value="LAZIO"/></p> <p>Comune : <input type="text" value="Roma"/></p> <p>Indirizzo : <input type="text" value="Via S. Biagio Platani..."/></p> <p>Piano : <input type="text"/></p> <p>Interno : <input type="text"/></p> <p>Coord. GIS : <input type="text" value="0.000000"/> N <input type="text" value="0.000000"/> E</p>	<p>Zona climatica : <input type="text" value="D"/></p> <p>Anno di costruzione : <input type="text" value="2024"/></p> <p>Superficie utile riscaldata (m²) : <input type="text" value="3172,47"/></p> <p>Superficie utile raffrescata (m²) : <input type="text" value="229,54"/></p> <p>Volume lordo riscaldato (m³) : <input type="text" value="13405,59"/></p> <p>Volume lordo raffrescato (m³) : <input type="text" value="1564,85"/></p>
----------------------	--	---

Comune catastale	<input type="text" value="H501"/>	Sezione	<input type="text"/>	Foglio	<input type="text"/>	Particella	<input type="text"/>
Subalterni	da <input type="text"/> a <input type="text"/>						
Altri subalterni	<input type="text"/>						

Servizi energetici presenti

<input checked="" type="checkbox"/> Climatizzazione invernale	<input type="checkbox"/> Ventilazione meccanica	<input checked="" type="checkbox"/> Illuminazione
<input type="checkbox"/> Climatizzazione estiva	<input type="checkbox"/> Prod. acqua calda sanitaria	<input checked="" type="checkbox"/> 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.

<p>Prestazione energetica del fabbricato</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">INVERNO</th> <th style="width: 50%;">ESTATE</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">  </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">  </td> </tr> </table>	INVERNO	ESTATE			<p>Prestazione energetica globale</p> <div style="text-align: center;"> <p>+ Più efficiente</p>  <p>- Meno efficiente</p> </div>	<p>Riferimenti</p> <p>Gli immobili simili avrebbero in media la seguente classificazione:</p> <p>Se nuovi:</p> <div style="background-color: #4CAF50; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin: 5px 0;">A1 (59,69)</div> <p>Se esistenti:</p> <div style="background-color: #4CAF50; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin: 5px 0;">-</div>
INVERNO	ESTATE					
						

Figura 53 – Attestato di Prestazione Energetica (PRE)

2.5 – VALIDAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO (EC 720)

La validazione è stata effettuata andando a considerare i consumi di Gas Metano e di energia elettrica dell'intero edificio per le stagioni di riferimento 2020-21-22-23. Per ognuna di esse sono stati inseriti i valori dei gradi-giorno, calcolati a partire dalle temperature medie esterne reali, e dell'irradianza diretta e diffusa sul piano orizzontale.

La validazione è stata raggiunta attraverso il confronto tra i consumi energetici calcolati dal modello e quelli reali. In particolare, la condizione da soddisfare sottostà al seguente criterio di congruità:

$$\frac{|C_{o,modello} - C_{o,reale}|}{C_{o,reale}} \times 100 \leq 5\%$$

In cui:

- $C_{o,reale}$ rappresenta il consumo energetico reale dell'edificio.
- $C_{o,modello}$ rappresenta il consumo energetico dell'edificio ottenuto dal modello di simulazione. Per il consumo termico, i valori sono legati agli Sm³ di Gas Metano utilizzati per il riscaldamento invernale dell'edificio. Per i consumi elettrici, espressi in kWh, viene presa in considerazione la sommatoria di tutti i contributi precedentemente riportati nel sottoparagrafo 1.4.2, Figura 28, relativa alla disaggregazione dei consumi di energia elettrica.

In seguito sono riportati i risultati della validazione: in Tabella 39 i consumi di Gas Metano con relativo delta; in Tabella 40 i consumi di energia elettrica con relativo delta.

Servizio	Co,modello (Sm ³)	Co,reale (Sm ³)	DELTA [%]
Riscaldamento (H)	15.025	14.762	1,8

Tabella 39 – Validazione modello – Consumi termici

Servizio	Co,modello (kWh)	Co,reale (kWh)	DELTA [%]
Riscaldamento (H)	1.364	1.366	0,1
Illuminazione (L)	29.010	28.646	1,3
Trasporto (T)	1.505	1.486	1,3
Globale (GL)	31.880	31.499	1,2

Tabella 40 – Validazione modello – Consumi elettrici

3 – BENCHMARKING DI SETTORE

Il benchmarking rappresenta una pratica utile per analizzare le pratiche e i consumi caratterizzanti un edificio oggetto di diagnosi, confrontandoli con quelli standard del settore di riferimento. Questo approccio si basa sul confronto di dati chiave legati alla produzione energetica con l'obiettivo di identificare le principali aree di miglioramento rispetto ai best performers. Questa tipologia di analisi si basa sulla definizione e sul confronto degli Indici di Prestazione Energetica (IPE), spesso rappresentati da consumi specifici aventi a numeratore un valore di consumo e a denominatore una grandezza caratteristica del vettore energetico.

Il confronto degli IPE, solitamente identificato come benchmarking di settore, permette di analizzare:

- i trend dei consumi rispetto alla grandezza caratteristica per cui vengono normalizzati;
- confronto delle prestazioni dell'azienda o dell'edificio oggetto di diagnosi rispetto ai valori standard del settore di riferimento;
- analisi e individuazione delle aree di intervento e dei relativi margini di miglioramento.

Per l'analisi di benchmark è stata assunta come riferimento la "Guida per il contenimento della spesa energetica nelle scuole", prodotta da ENEA-FIRE, grazie alla quale è possibile calcolare gli Indicatori Energetici Normalizzati per il riscaldamento (IEN_R) e per l'energia elettrica (IEN_E). Tali consumi saranno poi confrontati con i consumi specifici, evidenziati in Tabella 41 e 42, organizzati in funzione della tipologia scolastica e della classe di merito.

	$Wh_t / m^3 \times GG \times anno$		
	Buono	Sufficiente	Insufficiente
Materne	minore di 18,5	da 18,5 a 23,5	maggiore di 23,5
Elementari	minore di 11,0	da 11,0 a 17,5	maggiore di 17,5
Medie, Secondarie Sup.	minore di 11,5	da 11,5 a 15,5	maggiore di 15,5

Tabella 41 – Classi di merito dei consumi specifici per riscaldamento (Fonte: ENEA-FIRE)

	$kWh_e / m^2 \times anno$		
	Buono	Sufficiente	Insufficiente
Materne	minore di 11,0	da 11,0 a 16,5	maggiore di 16,5
Elementari, Medie, Secondarie Sup. tranne Ist.Tecn.Ind. e Ist.Prof.Ind.	minore di 9,0	da 9,0 a 12,0	maggiore di 12,0
Ist.Tecn. Ind., Ist. Prof. Ind.	minore di 12,5	da 12,5 a 15,5	maggiore di 15,5

Tabella 42 – Classi di merito dei consumi specifici per energia elettrica (Fonte: ENEA-FIRE)

3.1 – INDICATORI ENERGETICI NORMALIZZATI - RISCALDAMENTO

L'indicatore di performance energetico per i consumi di energia termica è definito come:

$$IEN_R = \frac{C_o \cdot F_e \cdot F_h \cdot 1000}{V \cdot GG} \left[\frac{Wh}{m^3 \cdot GG \cdot ANNO} \right]$$

In cui:

- Consumo (C_o): indica i consumi di Gas Metano in kWh termici. L'analisi è stata condotta sia per i valori reali ottenuti attraverso il rilevamento che per quelli calcolati attraverso la modellazione. In Tabella 43 sono riportati i valori delle annualità prese come riferimento per il lavoro di diagnosi e, in aggiunta, per un'annualità media. I consumi, inizialmente espressi in Sm³, sono stati manipolati e trasformati dapprima in Nm³ e infine in kWh termici.

ANNO	VETTORE ENERGETICO	FONTE DEI CONSUMI	Consumo [Sm ³]	Consumo [Nm ³]	Consumo [kWh th]
2020	Gas Metano	Modellazione	14.614	13.839	132.716
2021	Gas Metano	Modellazione	15.133	14.330	137.429
2022	Gas Metano	Modellazione	15.948	15.102	144.831
2023	Gas Metano	Modellazione	15.365	14.550	139.536
MEDIA	Gas Metano	Modellazione	15.021	14.224	136.412
2020	Gas Metano	Reale	15.573	14.747	141.425
2021	Gas Metano	Reale	16.897	16.001	153.449
2022	Gas Metano	Reale	13.603	12.882	123.535
2023	Gas Metano	Reale	12.976	12.288	117.841
MEDIA	Gas Metano	Reale	14.762	13.979	134.060

Tabella 43 – Conversione consumi di Gas Metano in kWh termici

- Volumetria lorda riscaldata (V): per definirla vengono considerati i muri esterni e vengono esclusi i locali non climatizzati dell'edificio. Nel caso studio si assume un valore di 13.405,59 m³.
- Superficie disperdente (S): viene calcolata attraverso la somma di tutte le superfici esterne dell'edificio (murature verticali esterne, tetti e solai di piano terra). Nel caso studio si assume un valore di 7.867,34 m².
- Gradi-Giorno (GG): estratti in precedenza per tutte le annualità di riferimento. I valori complessivi utilizzati sono riportati in Tabella 44.

Gradi-Giorno 2020	1.456,29
Gradi-Giorno 2021	1.504,48
Gradi-Giorno 2022	1.511,28
Gradi-Giorno 2023	1.462,02
Gradi-Giorno MEDIA	1.483,52

Tabella 44 – Gradi-Giorno 2020-21-22-23-MEDIA

- F_e indica il fattore di normalizzazione che tiene in considerazione la forma dell'edificio. A parità di volume interno riscaldato, maggiore è la superficie disperdente, maggiori saranno i consumi necessari a bilanciare le perdite.

I valori del fattore, riportati in Tabella 45, sono funzione della tipologia di scuola e del rapporto di forma S/V . Per una scuola elementare e un rapporto S/V di $0,59 \text{ m}^2/\text{m}^3$, il fattore F_e vale 0,8.

$S/V [\text{m}^2/\text{m}^3]$	F_e
sino a 0,30	1,2
0,31 a 0,35	1,1
0,36 a 0,40	1,0
0,41 a 0,45	0,9
oltre 0,45	0,8

Tabella 45 – Fattore di normalizzazione F_e (Fonte: ENEA-FIRE)

- F_h indica il fattore di normalizzazione che tiene in considerazione le ore di funzionamento della scuola. In questo caso il parametro tiene in considerazione l'accensione del sottosistema termico. Non avendo ottenuto dati certi in merito alle tempistiche di funzionamento degli impianti, sono state ipotizzate, in media, 8h al giorno di utilizzo. Tra i valori, mostrati in Tabella 46, il fattore assume un valore pari a 1,00.

hh/dd	F_h
sino a 6	1,2
7	1,1
8 - 9	1,0
10 - 11	0,9
oltre le 11	0,8

Tabella 46 – Fattore di normalizzazione F_h (Fonte: ENEA-FIRE)

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 47. È possibile osservare come i consumi specifici legati al riscaldamento appartengano alla classe di merito "Buono"; questo aspetto si pone in linea con le ipotesi fatte e con i risultati ottenuti, mettendo in chiara evidenza come la scuola tenda a mantenere i consumi di Gas Metano particolarmente bassi nonostante un involucro ed un impianto termico non performanti. In Figura 54 sono riportati i risultati in forma grafica. Questo permette di apprezzare meglio le variazioni degli indicatori rispetto al limite superiore della fascia di merito in cui si trovano, rappresentato dal valore massimo dell'asse delle ordinate. La principale differenza è legata al trend presente nel corso delle annualità: la modellazione prevede consumi tra di loro costanti, con un valore di circa $5,5 \frac{Wh}{\text{m}^3 \cdot GG \cdot ANNO}$ e dipendenti dalle variazioni dei gradi-giorno della singola stagione di riscaldamento; al contrario, nell'andamento reale è visibile una riduzione progressiva dell'indice nelle ultime annualità, passando da un valore di circa $6,1 \frac{Wh}{\text{m}^3 \cdot GG \cdot ANNO}$ a uno di circa $4,8 \frac{Wh}{\text{m}^3 \cdot GG \cdot ANNO}$.

IEN_R_M20	5,44	BUONO
IEN_R_M21	5,45	BUONO
IEN_R_M22	5,72	BUONO
IEN_R_M23	5,70	BUONO
IEN_R_MM	5,49	BUONO
IEN_R_R20	5,80	BUONO
IEN_R_R21	6,09	BUONO
IEN_R_R22	4,88	BUONO
IEN_R_R23	4,81	BUONO
IEN_R_RM	5,39	BUONO

Tabella 47 – Risultati IENR

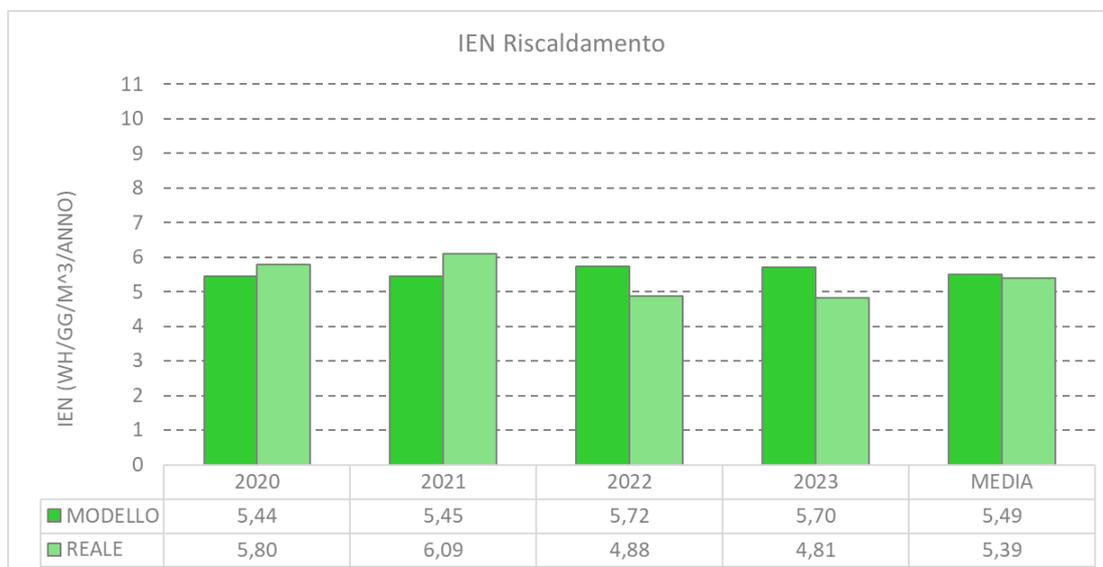


Figura 54 – Risultati IENR

3.2 – INDICATORI ENERGETICI NORMALIZZATI – ENERGIA ELETTRICA

L'indicatore di performance energetico per i consumi di energia elettrica è definito come:

$$IEN_E = \frac{C_o \cdot F_h}{A_p} \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot ANNO} \right]$$

In cui:

- Consumo (C_o): indica i consumi di energia elettrica in kWh elettrici. L'analisi è stata condotta sia per i valori reali ottenuti attraverso il rilevamento che per quelli calcolati attraverso la modellazione. In Tabella 48 sono riportati i valori delle annualità prese come riferimento per il lavoro di diagnosi e, in aggiunta, per un'annualità media.

ANNO	VETTORE ENERGETICO	FONTE DEI CONSUMI	Consumo [kWh el]
2020	Energia elettrica	Modellazione	31.804
2021	Energia elettrica	Modellazione	31.862
2022	Energia elettrica	Modellazione	31.960
2023	Energia elettrica	Modellazione	31.971
MEDIA	Energia elettrica	Modellazione	31.880
2020	Energia elettrica	Reale	31.499
2021	Energia elettrica	Reale	31.499
2022	Energia elettrica	Reale	32.417
2023	Energia elettrica	Reale	30.581
MEDIA	Energia elettrica	Reale	31.499

Tabella 48 – Consumi di energia elettrica in kWh elettrici

- Superficie lorda ai piani (A_p): per definirla vengono considerati i muri divisorii e vengono esclusi i muri perimetrali dell'edificio. Nel caso studio si assume un valore di 3.427,3 m².
- F_h indica il fattore di normalizzazione che tiene in considerazione le ore di funzionamento della scuola. In questo caso il parametro tiene in considerazione l'accensione del sottosistema di illuminazione, di trasporto e dell'ausiliario all'impianto termico. Non avendo ottenuto dati certi in merito alle tempistiche di funzionamento degli impianti, sono state ipotizzate, in media, 6h al giorno di utilizzo. Tra i valori, mostrati in Tabella 49, il fattore assume un valore pari a 1,20.

hh/dd	Fh
sino a 6	1,2
7	1,1
8 - 9	1,0
10 - 11	0,9
oltre le 11	0,8

Tabella 49 – Fattore di normalizzazione F_h (Fonte: ENEA-FIRE)

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 50. È possibile osservare come i consumi specifici legati ai sottosistemi elettrici appartengano alla classe di merito “Sufficiente”; questa classe risulta conforme alla tipologia di edificio trattata: essa rientra nella media e non dovrebbe presentare sprechi eccessivi dal punto di vista energetico. Nonostante questo, i valori appaiono in prossimità del limite superiore della fascia e quindi sono sottoponibili ad interventi migliorativi. In Figura 55 sono riportati i risultati in forma grafica. Questo permette di apprezzare meglio le variazioni degli indicatori rispetto al limite superiore della fascia di merito in cui si trovano, rappresentato dal valore massimo dell’asse delle ordinate. In questo caso gli indicatori risultano molto simili rispetto ai due approcci in analisi, livellandosi per tutte le annualità a $11 \frac{kWh}{m^2 \cdot ANNO}$.

IEN_E_M20	11,14	SUFFICIENTE
IEN_E_M21	11,16	SUFFICIENTE
IEN_E_M22	11,19	SUFFICIENTE
IEN_E_M23	11,19	SUFFICIENTE
IEN_E_M24	11,16	SUFFICIENTE
IEN_E_M20	11,03	SUFFICIENTE
IEN_E_M21	11,03	SUFFICIENTE
IEN_E_M22	11,35	SUFFICIENTE
IEN_E_M23	10,71	SUFFICIENTE
IEN_E_M24	11,03	SUFFICIENTE

Tabella 50 – Risultati IEN_E

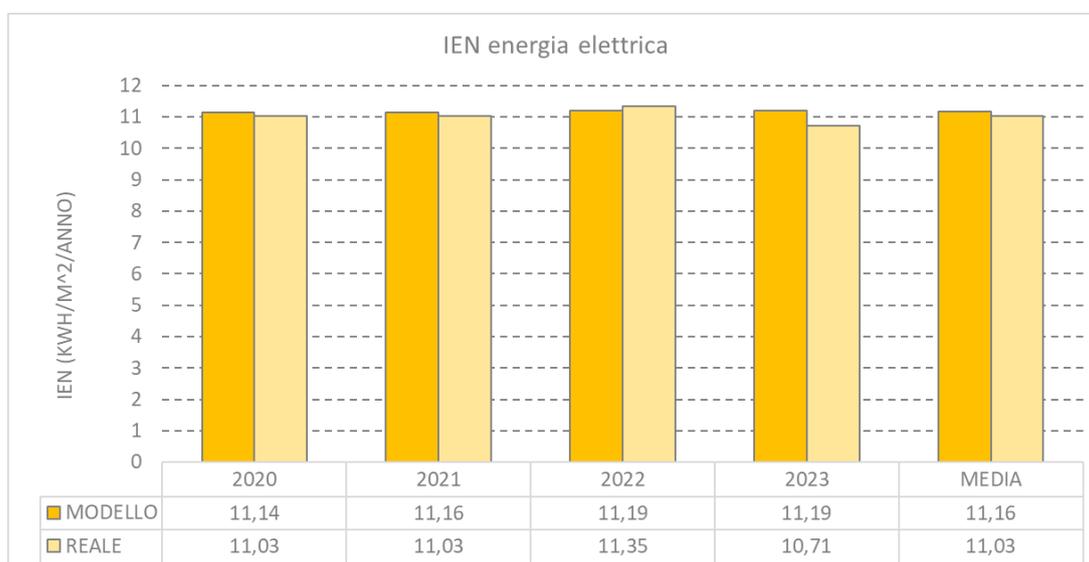


Figura 55 – Risultati IEN_E

4 – INTERVENTI MIGLIORATIVI

In questo capitolo vengono riportate le analisi degli interventi migliorativi selezionati per questo progetto. Lo scenario prefissato prevede la realizzazione di tutti gli interventi per ottenere, come obiettivo minimo, l'incremento di almeno una classe energetica e la riduzione del 20% delle emissioni di CO₂.

Si elencano di seguito gli interventi migliorativi necessari al contenimento energetico:

1. Sostituzione integrale dei serramenti esistenti con altri più performanti e compatibili con le caratteristiche architettonico-costruttive dell'edificio.
2. Sostituzione delle caldaie tradizionali presenti con caldaie ad alta efficienza a condensazione.
3. Installazione di un impianto in pompa di calore destinato all'asservimento dell'ACS ai servizi igienici e alla cucina. Per la cucina è prevista l'integrazione del solare termico.
4. Installazione di un impianto fotovoltaico con potenza di picco pari a 19,8 kW_p.
5. Sostituzione di tutti i corpi per l'illuminazione ordinaria con tecnologia a LED (Relamping).
6. Realizzazione di un impianto a ventilazione meccanica (VMC).

Ogni intervento verrà analizzato sotto tre prospettive:

- La prima analisi verterà sul dimensionamento e sulla progettazione preliminare dell'intervento per studiare la fattibilità tecnica dello scenario preso in esame.
- La seconda analisi sarà legata all'implementazione dello scenario sul software Edilclima. Sfruttando il modulo EC 720 è possibile simulare e confrontare gli interventi di riqualificazione energetica, indipendentemente dalla natura e dal grado di approfondimento scelto. L'approccio utilizzato, nonché quello più preciso, prevede la simulazione degli interventi attraverso il confronto di due file di lavoro: quello corrente (stato di fatto) e uno nuovo (stato di progetto), andando a stimare, nel caso studio, la variazione dei consumi dei vettori energetici, la variazione delle emissioni di CO₂ e la classe energetica raggiungibile.
- La terza analisi sarà di carattere economico: l'obiettivo è la valutazione della convenienza dei singoli interventi considerati fattibili.

Seguirà la presentazione dello scenario complessivo tra quelli indicati, al fine di verificare i risultati ottenuti dalla modellazione per definirne i benefici dal punto di vista energetico, economico e ambientale.

L'analisi economica si baserà su alcuni degli indicatori economici maggiormente utilizzati:

- Valore Attuale Netto (VAN): ottenibile attraverso i flussi di cassa, ovvero la differenza tra i benefici e i costi per ogni anno del ciclo di vita ipotizzato. Se l'indicatore assume un valore positivo, l'intervento genererà un profitto. In caso contrario, lo scenario viene definito non remunerativo in quanto l'investimento non genererà un recupero sufficiente.

Il flusso di cassa, semplice e attualizzato, viene definito come

$$FC_n = (R - C)_n$$

$$FC_{disc,n} = (R - C)_{disc,n} = \frac{(R - C)_n}{(1 + r)^n}$$

Il VAN viene definito come

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{(R - C)_n}{(1 + r)^n} - I_0$$

Dove:

- FC_n rappresenta il flusso di cassa all'anno n-esimo;
 - $FC_{disc,n}$ rappresenta il flusso di cassa attualizzato;
 - I_0 rappresenta il valore dell'investimento iniziale;
 - $(1 + r)^{-n}$ indica il fattore di attualizzazione;
 - r indica il tasso di sconto applicato.
- Tempo di ritorno semplice (PBT): rappresenta il tempo in cui la somma dell'investimento iniziale viene recuperata. Corrisponde al tempo in cui il VAN si annulla.

$$PBT = \frac{I_0}{FC_n}$$

- Tempo di ritorno attualizzato (dPBT): rappresenta il tempo in cui la somma dell'investimento iniziale viene recuperata considerando i flussi di cassa attualizzati per tenere in considerazione la variazione temporale del valore del denaro. Corrisponde al tempo in cui il VAN si annulla.

$$dPBT = \frac{I_0}{FC_{disc,n}}$$

- Indice di Profitto scontato (IP): indica il valore assunto da un euro di investimento per opere di riqualificazione. È definito dal rapporto tra il VAN e il valore dell'investimento.

$$IP = \frac{VAN}{I_0}$$

- Tasso interno di rendimento (TIR): indica il rendimento di un investimento in termini percentuali. In dettaglio rappresenta il valore del tasso di sconto che rende nullo il VAN.

4.1 – SOSTITUZIONE SERRAMENTI E CASSONETTI

Il primo intervento consiste nella sostituzione integrale dei serramenti e l'isolamento dei relativi cassonetti. I componenti dello stato di fatto risultano poco performanti e non più in linea con i nuovi standard tecnologici. Non essendo previsto il rifacimento delle altre superfici opache, verticali e orizzontali, l'intervento riguarderà solo il 7,4% della superficie totale disperdente, rientrando nei parametri di riqualificazione energetica.

4.1.1 – MODELLAZIONE COMPONENTI

Per definire i limiti relativi alla trasmittanza termica del serramento si è fatto riferimento al Decreto requisiti minimi del 26 giugno 2015: per i componenti trasparenti in zona climatica D è previsto un limite di $U = 1,8 \frac{W}{m^2K}$.

La modellazione ha seguito le linee guida indicate dalla norma tecnica UNI TS 11300-1 per la definizione della trasmittanza termica del serramento:

- Dal prospetto B.1 è possibile ricavare la trasmittanza termica per ogni tipologia di vetro in funzione dell'emissività, dello spessore e delle caratteristiche dell'intercapedine. Nel caso in esame è stato modellato un vetro doppio con trattamento superficiale basso emissivo ($\epsilon \leq 0,15$) dalle dimensioni di 4-12-4 mm; all'interno dell'intercapedine è previsto l'utilizzo di Argon con concentrazione superiore al 90%. La trasmittanza termica ottenuta è $U_g = 1,6 \frac{W}{m^2K}$. Per il vetro modellato il valore della trasmittanza di energia solare totale è $g_{gl,n} = 0,67$.
- Il telaio è stato modellato in PVC (5 camere cave) e presenta, in riferimento al prospetto B.2, una trasmittanza termica pari a $U_f = 1,2 \frac{W}{m^2K}$.
- La trasmittanza del serramento, ricavabile dal prospetto B.3 assume il valore di $U_w = 1,7 \frac{W}{m^2K}$.

Per quanto concerne i cassonetti, la norma tecnica UNI TS 11300-1 definisce come valore limite una trasmittanza pari a $U = 1 \frac{W}{m^2K}$. Il cassonetto è stato modellato aggiungendo una strato in Polistirene espanso sinterizzato (EPS 200) dello spessore di 20 mm. In Tabella 51 viene riportata la stratigrafia esatta del nuovo componente.

DESCRIZIONE	SPESSORE	COND	R	M.V.	C.T. spec.
	mm	W/mK	m2K/W	kg/m3	kJ/kgK
Alluminio	20,00	220,00	-	2.700	0,88
Polistirene espanso sinterizzato	20,00	0,03	-	29	1,45
Intercapedine debolmente ventilata	110,00	-	-	-	-
Muratura in laterizio pareti esterne (um. 1,5%)	120,00	0,60	-	1.400	1,00
Intonaco di cemento e sabbia	30,00	1,00	-	1.800	1,00

Tabella 51 – Stratigrafia M3, M4, M10, M11 e M12 (POST)

4.1.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO

L'implementazione dello scenario nel modello energetico è stata effettuata al fine di valutarne i benefici dal punto di vista energetico. La modellazione dello stato di progetto ha previsto la sostituzione dei serramenti e l'aggiornamento della stratigrafia dei cassonetti installati. Lo stato di progetto ha generato i risultati espressi dalla Tabella 52.

I consumi di Gas Metano hanno subito una riduzione contenuta, circa il 4,3%, a fronte di un intervento particolarmente invasivo e costoso. Gli assorbimenti elettrici possono essere considerati costanti.

La classe energetica è rimasta la medesima, al netto di una riduzione dell'Indice di Prestazione Energetica del 10%. Le emissioni di CO₂ hanno raggiunto la soglia dei $28 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

PARAMETRO	PRE	POST	VARIAZIONE
Metano [Sm3]	18.170	17.388	-4,3%
Elettricità [kWh]	32.358	32.318	-0,1%
EPgl,nren [kWh/m2]	150,49	135,47	-10,0%
CO2 [kg/m2/anno]	31	28	-9,7%

Tabella 52 – Risultato modellazione (Scenario 1)

4.1.3 – ANALISI ECONOMICA

L'analisi è stata condotta prendendo come riferimento i prezzi ricavati dal Prezzario DEI per i serramenti del 2^a semestre del 2023. Per l'intervento è stato previsto un costo complessivo pari a circa € 356.740,00. Le singole voci di spesa e i parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa sono riportate in Tabella 53 e 54. Gli indicatori economici di riferimento sono riportati in Tabella 55. L'investimento dal punto di vista economico, considerando i flussi di cassa scontati, risulta non redditizio: il VAN è negativo e prevede un rientro nel tempo utile di vita trascurabile. Tale tendenza è confermata dall'IP che si assesta su un valore prossimo allo zero; il tempo di rientro, scontato e non, supera ampiamente i 20 anni.

INTERVENTO	Costo al m2	m2	COSTO COMPLESSIVO
SMONTAGGIO E MOVIMENTAZIONE	45,64	580,70	26.503,15
FINESTRA 1/2 ANTE + TRASPORTO	476,00	378,63	180.226,55
PORTAFINESTRA 1/2 ANTE + TRASPORTO	489,00	202,07	98.813,60
INTERVENTO	Costo all'ora	ore	COSTO COMPLESSIVO
MANODOPERA	40,00	320,00	12.800,00
INTERVENTO	Costo al m3	m3	COSTO COMPLESSIVO
TIRO AL PIANO	50,00	37,50	1.875,00
INTERVENTO	Costo al kg	kg	COSTO COMPLESSIVO
CERNITA E PRESELEZIONE VETRO	3,10	9.300,88	28.832,72
CARICO E TRASPORTO IN DISCARICA	0,04	14.946,57	547,94
CONFERIMENTO DISCARICHE VETRO	0,61	9.300,88	5.673,54
CONFERIMENTO DISCARICHE MISTI	0,03	5.645,69	184,16
INTERVENTO	Costo al m3	m3	COSTO COMPLESSIVO
ISOLANTE EPS 200	256,60	5,00	1.283,00

Tabella 53 – Elenco singole voci investimento iniziale (Scenario 1)

Durata del progetto	0,5	anni
Vita utile intervento	20	anni
Costo GM comprato	0,85	€/Sm3
Costo EE comprata	0,20	€/kWh
Tasso di sconto	5	%
Tasso incremento acquisto annuale	0,025	-
Investimento	356.740	€

Tabella 54 – Parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa (Scenario 1)

VAN (scontato)	$\sum \text{Benefici att} - \sum \text{Costi att}$	-345.584	€
IP - Indice di Profitto (scontato)	$\frac{\sum \text{Benefici att}}{\sum \text{Costi att}}$	0,031	-
PBT - Tempo di ritorno semplice	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	> 20	anni
dPBT - Tempo di ritorno attualizzato	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	> 20	anni
TIR - Tasso Interno Rendimento	Valore di r che annulla il VAN (IP=1)	-19	%

Tabella 55 – Indicatori economici (Scenario 1)

4.2 – CALDAIE A CONDENSAZIONE

Il secondo intervento prevede la sostituzione delle vecchie caldaie tradizionali con dei nuovi generatori a condensazione ad alta efficienza. Attualmente nella scuola è installata una potenza di generazione di 410 kW legata a 3 caldaie asserventi rispettivamente la scuola, la palestra e gli uffici. L'intervento non prevede la sostituzione dei corpi scaldanti, limitandosi alla sostituzione one to one dei generatori e al rifacimento parziale della rete di distribuzione.

4.2.1 – DIMENSIONAMENTO

- CALDAIA A CONDENSAZIONE:

Attraverso l'analisi grafica della firma energetica, ottenuta attraverso la modellazione energetica e raffigurata in Figura 56, è stata ricavata la potenza media assorbita dall'impianto in funzione delle ore di funzionamento giornaliere e della temperatura media esterna: assumendo un tempo di funzionamento pari a 8 ore e la temperatura media esterna di progetto di 0°C è stata ricavata una potenza media pari a circa 350 kW. Tale analisi pone in evidenza il sovradimensionamento della potenza di generazione installata nello stato di fatto.

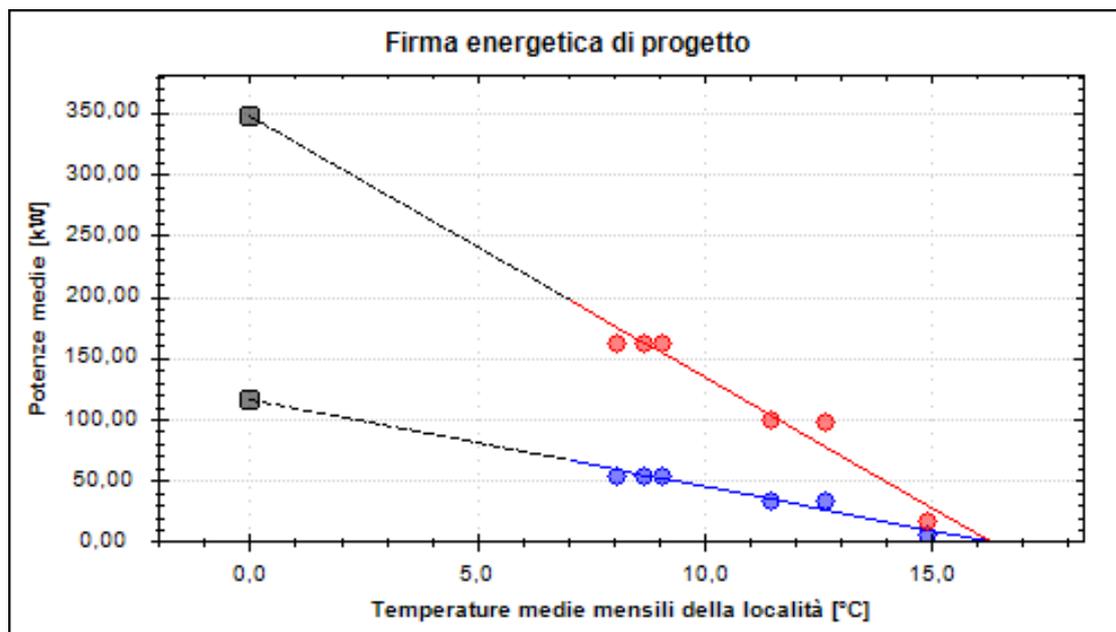


Figura 56 – Firma energetica dello stato di fatto

Per la scelta dei nuovi generatori si è optato per la riduzione della potenza installata nell'ordine del 10%. L'obiettivo è quello di ottenere una riduzione del carico senza distaccarsi eccessivamente dal valore iniziale per evitare disallineamenti tra il lato di generazione e quello di emissione. Per l'asservimento della scuola è previsto l'utilizzo di una caldaia Viessmann Vitomodul 200-W avente potenza complessiva di 240 kW ottenuta dall'installazione in cascata di tre caldaie Vitodens 200-W da 80 kW cadauna; per la palestra e per gli uffici sono previste due caldaie del medesimo modello rispettivamente da 80 kW e 50 kW.

Le caratteristiche, estratte dalla scheda tecnica delle caldaie, sono riportate in Tabella 56, 57 e 58.

CALDAIA AD ALTA EFFICIENZA SCUOLA	
Costruttore	VISSMANN
Modello	VITOMODUL 200-W
Potenza modello	240 kW
Modulo	VITODENS 200-W
Potenza modulo	80 kW
Brucciatoe	MatriX
Potenza termica focolare totale (kW)	225
Potenza termica nominale totale (kW)	217,8
Rendimento termico nominale	98,4
Rendimento termico carico parziale (30%)	108,9
Perdite al manetello	0,5
Perdite al camino con bruciatoe acceso	1
Perdite al camino con bruciatoe spento	0,1

Tabella 56 – Scheda tecnica VITOMODUL 240 kW

CALDAIA AD ALTA EFFICIENZA PALESTRA	
Costruttore	VISSMANN
Modello	VITODENS 200-W
Potenza modello	80 kW
Brucciatoe	MatriX
Potenza termica focolare totale (kW)	75
Potenza termica nominale totale (kW)	72,6
Rendimento termico nominale	98,4
Rendimento termico carico parziale (30%)	108,9
Perdite al manetello	0,5
Perdite al camino con bruciatoe acceso	1
Perdite al camino con bruciatoe spento	0,1

Tabella 57 – Scheda tecnica VITODENS 80 kW

CALDAIA AD ALTA EFFICIENZA UFFICI	
Costruttore	VISSMANN
Modello	VITODENS 200-W
Potenza modello	50 kW
Brucciatoe	MatriX
Potenza termica focolare totale (kW)	45,7
Potenza termica nominale totale (kW)	45
Rendimento termico nominale	98,4
Rendimento termico carico parziale (30%)	108,9
Perdite al manetello	0,5
Perdite al camino con bruciatoe acceso	1
Perdite al camino con bruciatoe spento	0,1

Tabella 58 – Scheda tecnica VITODENS 50 kW

• SISTEMA DI DISTRIBUZIONE:

Per quanto concerne il sistema di distribuzione è prevista l'installazione di uno scambiatore di calore per evitare che le tubazioni vetuste non oggetto d'intervento influiscano negativamente sui nuovi componenti. Nel circuito primario è prevista la sostituzione delle tubazioni, l'installazione della sicurezza Inail, dei vasi d'espansione e dei circolatori. Per il secondario è previsto il mantenimento delle tubazioni con la sola installazione dei vasi d'espansione e dei circolatori.

Il dimensionamento dei vasi d'espansione è stato realizzato conformemente alle norme Caleffi per gli impianti di riscaldamento. La capacità di un vaso d'espansione chiuso a membrana è calcolata secondo la seguente formula:

$$V_n = \frac{e \cdot V_a + V_v^*}{1 - \frac{P_a}{P_e}}$$

- V_a : volume di acqua contenuto nell'impianto.
- e : coefficiente di espansione dell'acqua in funzione della massima differenza tra la temperatura dell'acqua ad impianto freddo e quella massima di esercizio.

$$e = \frac{n}{100}$$

- n : coefficiente di espansione che può essere ricavato in funzione della temperatura massima di esercizio dell'impianto e della percentuale di glicole.

$$n = 0,31 + 3,9 \cdot 10^4 \cdot \theta_{max}$$

- V_v^* : volume di acqua già contenuto nel vaso, assunto pari allo 0,5% di V_a (valore minimo 3 litri).
- P_a : pressione assoluta iniziale lato gas, funzione della pressione di precarica del vaso lato gas e della prevalenza della pompa (nel caso in cui questa sia installata a monte del vaso).

$$P_a = P_0 + \Delta P + 1$$

- P_e : pressione assoluta finale lato gas, funzione della pressione della valvola di sicurezza.

$$P_e = P_{vs} - 0,5 + 1$$

In Tabella 59 sono riportati i parametri descritti e il risultato del volume dei vasi di espansione.

PARAMETRO		SCUOLA		PALESTRA		UFFICI	
		PRIMARIO	SECONDARIO	PRIMARIO	SECONDARIO	PRIMARIO	SECONDARIO
V_a	litri	4140	3600	920	800	863	750
e	-	0,03469	0,03469	0,03469	0,03469	0,03469	0,03469
n	-	3,469	3,469	3,469	3,469	3,469	3,469
θ_{max}	°C	90	90	90	90	90	90
V_v^*	litri	20,7	18	4,6	4	4,3	3,8
P_a	bar	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
P_e	bar	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
P_{vs}	bar	5	5	5	5	5	5
V_n	litri	335	291	74	65	70	61

Tabella 59 – Risultati dimensionamento vasi di espansione centrale termica

Il dimensionamento delle pompe di circolazione avviene attraverso la definizione della loro portata. Questa è stata ricavata, per ogni circuito, a partire dalla potenza della caldaia o dello scambiatore di riferimento e dalla variazione della temperatura tra la mandata e il ritorno.

La formula impiegata è

$$Q = \frac{P}{c_p \cdot \Delta T}$$

I risultati del calcolo della portata e le caratteristiche principali dei componenti da installare sono riportati rispettivamente in Tabella 60 e 61 ÷ 66.

PARAMETRO		SCUOLA		PALESTRA		UFFICI	
		PRIMARIO	SECONDARIO	PRIMARIO	SECONDARIO	PRIMARIO	SECONDARIO
Potenza	kW	240	240	80	80	50	50
ΔT	°C	15	20	15	20	15	20
Portata	m ³ /h	13,76	10,32	4,59	3,44	2,87	2,15

Tabella 60 – Risultati dimensionamento circolatori centrale termica

POMPA DI CIRCOLAZIONE 1 SCUOLA	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS B
Portata (m ³ /h)	14,4
Potenza elettrica (kW)	0,35

Tabella 61 – Scheda tecnica pompa primario scuola

POMPA DI CIRCOLAZIONE 2 SCUOLA	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS B
Portata (m ³ /h)	12
Potenza elettrica (kW)	0,465

Tabella 62 – Scheda tecnica pompa secondario scuola

POMPA DI CIRCOLAZIONE 1 PALESTRA	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS SMALL
Portata (m ³ /h)	5,4
Potenza elettrica (kW)	0,17

Tabella 63 – Scheda tecnica pompa primario palestra

POMPA DI CIRCOLAZIONE 2 PALESTRA	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS SMALL
Portata (m ³ /h)	4,2
Potenza elettrica (kW)	0,13

Tabella 64 – Scheda tecnica pompa secondario palestra

POMPA DI CIRCOLAZIONE 1 UFFICI	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS SMALL
Portata (m ³ /h)	3
Potenza elettrica (kW)	0,1

Tabella 65 – Scheda tecnica pompa primario uffici

POMPA DI CIRCOLAZIONE 2 UFFICI	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS SMALL
Portata (m ³ /h)	2,4
Potenza elettrica (kW)	0,132

Tabella 66 – Scheda tecnica pompa secondario uffici

Il dimensionamento delle tubazioni è stato realizzando a partire dai valori della portata e della velocità, assunta costante. In dettaglio, l'equazione utilizzata è

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{v \cdot \pi \cdot 3600}} \cdot 1000$$

I risultati del dimensionamento sono riportati in Tabella 67.

PARAMETRO		SCUOLA		PALESTRA		UFFICI	
		PRIMARIO	SECONDARIO	PRIMARIO	SECONDARIO	PRIMARIO	SECONDARIO
Portata	m3/h	13,76	10,32	4,59	3,44	2,87	2,15
Velocità	m/s	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Diametro	mm	56,96	49,33	32,89	28,48	26,00	22,52

Tabella 67 - Risultati dimensionamento tubazioni centrale termica

4.2.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO

L'implementazione dello scenario nel modello energetico è stata effettuata al fine di valutarne i benefici dal punto di vista energetico. La modellazione dello stato di progetto ha previsto la sostituzione dei generatori, l'introduzione degli scambiatori di calore e l'inserimento delle potenze ausiliarie assorbite. Lo stato di progetto ha generato i risultati espressi dalla Tabella 68.

I consumi di Gas Metano hanno subito una riduzione del 19,6%. Contrariamente gli assorbimenti elettrici sono leggermente aumentati.

La classe energetica è rimasta la medesima, al netto di una riduzione dell'Indice di Prestazione Energetica del 9,1%. Le emissioni di CO₂ hanno raggiunto la soglia dei $28 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

PARAMETRO	PRE	POST	VARIAZIONE
Metano [Sm3]	18.170	14.610	-19,6%
Elettricità [kWh]	32.358	32.725	1,1%
EPgl,nren [kWh/m2]	150,49	136,81	-9,1%
CO2 [kg/m2/anno]	31	28	-9,7%

Tabella 68 – Caratterizzazione intervento (Scenario 2)

4.2.3 – ANALISI ECONOMICA

L'analisi è stata condotta prendendo come riferimento i prezzi ricavati dal Prezzario DEI per gli impianti di riscaldamento del 2° semestre del 2023. Per l'intervento, è stato previsto un costo complessivo pari a circa € 80.500,00. Le singole voci di spesa e i parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa sono riportate in Tabella 14 e 15. Gli indicatori economici di riferimento sono riportati in Tabella 16. L'investimento dal punto di vista economico, considerando i flussi di cassa scontati, risulta non redditizio: il VAN è negativo e prevede un rientro nel tempo utile di vita del 60% dell'investimento. Tale tendenza è confermata dall'IP che si assesta su un valore inferiore all'unità; il tempo di rientro scontato supera ampiamente i 20 anni.

	COSTO PER UNITÀ	QUANTITÀ	COSTO COMPLESSIVO
CALDAIA CONDENSAZIONE 80kW	6.000,00	4	24.000,00
CALDAIA CONDENSAZIONE 50kW	4.500,00	1	4.500,00
SMONTAGGIO + DISCARICA + ONERI	2.500,00	3	7.500,00
SCAMBIATORE 240 kW (52 piastre)	4.800,00	1	4.800,00
SCAMBIATORE 80 kW (16 piastre)	3.200,00	1	3.200,00
SCAMBIATORE 50 kW (12 piastre)	2.500,00	1	2.500,00
VASO ESPANSIONE 1 SCUOLA (350l)	720,00	1	720,00
VASO ESPANSIONE 2 SCUOLA (300l)	600,00	1	600,00
VASO ESPANSIONE 1 PALESTRA (80l)	180,00	1	180,00
VASO ESPANSIONE 2 PALESTRA (80l)	180,00	1	180,00
VASO ESPANSIONE 1 UFFICI (65l)	140,00	1	140,00
VASO ESPANSIONE 2 UFFICI (65l)	140,00	1	140,00
CIRCOLATORE 1 SCUOLA (14,4 m3/h)	1.800,00	1	1.800,00
CIRCOLATORE 2 SCUOLA (12 m3/h)	1.800,00	1	1.800,00
CIRCOLATORE 1 PALESTRA (5,4 m3/h)	1.100,00	1	1.100,00
CIRCOLATORE 2 PALESTRA (4,2 m3/h)	1.100,00	1	1.100,00
CIRCOLATORE 1 UFFICI (3 m3/h)	650,00	1	650,00
CIRCOLATORE 2 UFFICI (2,4 m3/h)	550,00	1	550,00
VALVOLA SICUREZZA	150,00	3	450,00
COLLETTORE PORTASTRUMENTI INAIL	800,00	3	2.400,00
COMPLESSO TERMOREGOLAZIONE	1.400,00	3	4.200,00
TUBAZIONI E VALVOLAME	6.000,00	3	18.000,00

Tabella 69 – Elenco singole voci investimento iniziale (Scenario 2)

Durata del progetto	0,5	anni
Vita utile intervento	20	anni
Costo GM comprato	0,85	€/Sm3
Costo EE comprata	0,20	€/kWh
Tasso di sconto	5	%
Tasso incremento acquisto annuale	0,025	-
Investimento	80.510	€

Tabella 70 – Parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa (Scenario 2)

VAN (scontato)	$\sum \text{Benefici att} - \sum \text{Costi att}$	-31.511	€
IP - Indice di Profitto (scontato)	$\frac{\sum \text{Benefici att}}{\sum \text{Costi att}}$	0,609	-
PBT - Tempo di ritorno semplice	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	20	anni
dPBT - Tempo di ritorno attualizzato	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	> 20	anni
TIR - Tasso Interno Rendimento	Valore di r che annulla il VAN (IP=1)	0	%

Tabella 71 – Indicatori economici (Scenario 2)

4.3 – ACS: POMPE DI CALORE E SOLARE TERMICO

Il terzo intervento prevede la realizzazione ex novo di un impianto dedicato alla produzione dell'ACS. L'acqua calda, prodotta attraverso un sistema di generazione composto da due pompe di calore e dal solare termico, verrà accumulata in appositi serbatoi per poter far fronte al fabbisogno dei periodi di massima richiesta. Questo sistema comporta un miglioramento della continuità del servizio e quindi della resa termica pur mantenendo inferiori le potenze di generazione. In particolare è prevista l'installazione di due pompe di calore con funzionamento in cascata, asserventi due accumuli. Il primo accumulo mono serpentino sarà dedicato alla produzione di acqua calda per i servizi sanitari; il secondo a doppio serpentino sarà integrato dal solare termico per l'asservimento della cucina.

4.3.1 – DIMENSIONAMENTO

- BOLLITORE:

Per il dimensionamento del volume del bollitore e della superficie del relativo serpentino è stato preso come riferimento il Quaderno Caleffi relativo agli impianti idro-sanitari.

La procedura di dimensionamento si basa in ingresso su alcune grandezze principali:

- Consumo di acqua calda nel periodo di punta: consumo complessivo ricavabile dalle apposite tabelle sperimentali.
- Temperatura di accumulo: valore definito in funzione di diverse esigenze quali evitare fenomeni di corrosione, sviluppo di batteri e limitare le dimensioni del bollitore.
- Temperatura di utilizzo: valore definito da apposite tabelle sperimentali in funzione dell'utenza.
- Temperatura fluido scaldante: valore medio tra la temperatura di accumulo e quella di utilizzo.
- Temperatura dell'acqua fredda: valore definibile in funzione della zona climatica, della temperatura del terreno e della zona di provenienza dell'acqua: è possibile assumere $10 \div 12^\circ\text{C}$ nell'Italia settentrionale, $12 \div 15^\circ\text{C}$ nell'Italia centrale e $15 \div 18^\circ\text{C}$ nell'Italia meridionale.
- Durata del periodo di punta: durata del periodo in cui avviene il maggior consumo di acqua calda. Per utenze comuni il suo valore può essere ricavato da tabelle sperimentali.
- Durata periodo pre-riscaldamento: durata necessaria a portare l'acqua fredda alla temperatura di accumulo. Per utenze comuni il suo valore può essere ricavato da tabelle sperimentali.

Per definire il volume del bollitore è necessario calcolare in ordine:

- Il consumo di acqua totale C definibile dal prodotto del consumo di acqua nel periodo di punta e del coefficiente di contemporaneità caratteristico dello specifico caso in esame.
- Il calore nel periodo di punta Q_t necessario a scaldare l'acqua da erogarsi nel periodo di punta, calcolabile attraverso il prodotto del consumo C per il salto di temperatura tra il valore di utilizzo T_u e quello dell'acqua fredda T_f .

$$Q_t = C \cdot (T_u - T_f)$$

- Il calore orario Q_h ceduto all'acqua, ottenibile dividendo il calore totale per il tempo in cui questo deve essere ceduto (somma del tempo di pre-riscaldamento t_{pr} e di punta t_{pu}).

$$Q_h = \frac{Q_t}{t_{pr} + t_{pu}}$$

- Il calore da accumulare Q_a nella fase di preriscaldamento ottenibile moltiplicando il calore orario Q_h per il periodo di pre-riscaldamento t_{pr} .

$$Q_a = Q_h \cdot t_{pr}$$

- Il volume del bollitore V si ottiene dividendo il calore da accumulare Q_a per il salto di temperatura tra l'accumulo T_a e l'acqua fredda T_f .

$$V = \frac{Q_a}{T_a + T_f}$$

- Infine, per i bollitori a serpentino è possibile determinare la superficie di scambio termico S attraverso la divisione del calore orario Q_h per il coefficiente di scambio termico k e per il salto di temperatura tra il valore medio del fluido scaldante T_{m1} e quello del fluido riscaldato T_{m2} .

$$S = \frac{Q_h}{k \cdot (T_{m1} - T_{m2})}$$

In Tabella 72, 73 e 74 sono riportati i risultati del dimensionamento degli accumuli.

SERVIZI IGIENICI CON ALMENO 4 LAVABI			
CONSUMO ACS	c	60,00	litri/lavabo
TEMPERATURA ACCUMULO	Ta	55,00	°C
TEMPERATURA UTILIZZO	Tu	40,00	°C
TEMPERATURA MEDIA FLUIDO SCALDANTE	Tmc	47,50	°C
TEMPERATURA INGRESSO ACQUA FREDDA	Tf	12,00	°C
DURATA PERIODO DI PUNTA	tpu	0,50	h
DURATA PERIODO PRE-RISCALDAMENTO	tpr	1,50	h
NUMERO LAVABI	N	61	-
CONSUMO ACQUA PERIODO DI PUNTA	C	3.660,00	l
COEFF CONTEMPORANEITA'	ct	0,50	-
CONSUMO ACQUA TOTALE	C'	1.830,00	l
CALORE PERIODO DI PUNTA	Qt	51.240,00	kcal
CALORE ORARIO RICHiesto	Qh	25.620,00	kcal/h
CALORE DA ACCUMULARE	Qa	38.430,00	kcal
VOLUME BOLLITORE	V	894,00	l
POTENZA SCAMBIATORE	P	29,79	kW
TEMPERATURA MEDIA FLUIDO	Tmf	33,50	°C
SUPERFICIE SCAMBIO SERPENTINO	S	3,66	m²

Tabella 72 – Risultati dimensionamento bollitore servizi igienici (almeno 4 lavabi)

SERVIZI IGIENICI CON 1 O 2 LAVABI

CONSUMO ACS	c	60,00	litri/lavabo
TEMPERATURA ACCUMULO	Ta	55,00	°C
TEMPERATURA UTILIZZO	Tu	40,00	°C
TEMPERATURA MEDIA FLUIDO SCALDANTE	Tmc	47,50	°C
TEMPERATURA INGRESSO ACQUA FREDDA	Tf	12,00	°C
DURATA PERIODO DI PUNTA	tpu	0,50	h
DURATA PERIODO PRE-RISCALDAMENTO	tpr	1,50	h
NUMERO LAVABI	N	7	-

CONSUMO ACQUA PERIODO DI PUNTA	C	420,00	l
COEFF CONTEMPORANEITA'	ct	0,35	-
CONSUMO ACQUA TOTALE	C'	147,00	l
CALORE PERIODO DI PUNTA	Qt	4.116,00	kcal
CALORE ORARIO RICHIESTO	Qh	2.058,00	kcal/h
CALORE DA ACCUMULARE	Qa	3.087,00	kcal
VOLUME BOLLITORE	V	72,00	l
POTENZA SCAMBIATORE	P	2,39	kW
TEMPERATURA MEDIA FLUIDO	Tmf	33,50	°C
SUPERFICIE SCAMBIO SERPENTINO	S	0,29	m²

Tabella 73 – Risultati dimensionamento bollitore servizi igienici (1-2 lavabi)

CUCINA

CONSUMO ACS	c	8,00	litri/coperto
TEMPERATURA ACCUMULO	Ta	55,00	°C
TEMPERATURA UTILIZZO	Tu	50,00	°C
TEMPERATURA MEDIA FLUIDO SCALDANTE	Tmc	52,50	°C
TEMPERATURA INGRESSO ACQUA FREDDA	Tf	12,00	°C
DURATA PERIODO DI PUNTA	tpu	2,00	h
DURATA PERIODO PRE-RISCALDAMENTO	tpr	2,00	h
NUMERO COPERTI	N	220	-

CONSUMO ACQUA PERIODO DI PUNTA	C	1.760,00	l
COEFF CONTEMPORANEITA'	ct	0,75	-
CONSUMO ACQUA TOTALE	C'	1.320,00	l
CALORE PERIODO DI PUNTA	Qt	50.160,00	kcal
CALORE ORARIO RICHIESTO	Qh	12.540,00	kcal/h
CALORE DA ACCUMULARE	Qa	25.080,00	kcal
VOLUME BOLLITORE	V	584,00	l
POTENZA SCAMBIATORE	P	14,58	kW
TEMPERATURA MEDIA FLUIDO	Tmf	33,50	°C
SUPERFICIE SCAMBIO SERPENTINO	S	1,32	m²

Tabella 74 – Risultati dimensionamento bollitore cucina

In funzione dei volumi ottenuti sono stati selezionati due accumuli TML, rispettivamente da 1000 litri per i servizi igienici e da 600 litri per la cucina. I due accumuli sono raffigurati in Figura 57 e 58, mentre in Tabella 75 e 76 sono riportate le rispettive schede tecniche. La potenza del serpentino superiore è relativa alla generazione in pompa di calore; la potenza del serpentino inferiore è relativa alla generazione del solare termico.

ACCUMUO SERVIZI IGIENICI	
Costruttore	TML
Modello	WP1X 01000 R
Volume (litri)	1000
Volume netto (litri)	931,5
Potenza serpentino superiore (kW)	49
Potenza serpentino inferiore (kW)	-
Diametro (mm)	790
Altezza (mm)	2110
Superficie totale (m ²)	6,22
Tipo isolamento	0,025
Spessore isolamento (mm)	50

Tabella 75 – Scheda tecnica accumulatore WP1X 01000

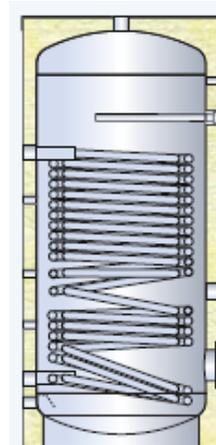


Figura 57 – Accumulo WP1X 01000 R (Fonte: TML)

ACCUMUO CUCINA	
Costruttore	TML
Modello	WP2X 00600 R
Volume (litri)	600
Volume netto (litri)	585,7
Potenza serpentino superiore (kW)	42
Potenza serpentino inferiore (kW)	19
Diametro (mm)	650
Altezza (mm)	1895
Superficie totale (m ²)	4,53
Tipo isolamento	0,025
Spessore isolamento (mm)	50

Tabella 76 – Scheda tecnica accumulatore WP2X 00600

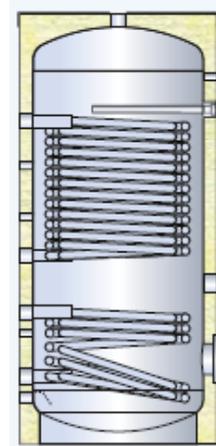


Figura 58 – Accumulo WP2X 00600 R (Fonte: TML)

- **POMPA DI CALORE:**

Le pompe di calore dovranno avvicinarsi quanto più possibile alle potenze di serpentino ricavate dalle schede tecniche degli accumuli. Per questa motivazione è stata prevista l'installazione di due pompe di calore Paradigma: ModuExpo HT 38 per la cucina e ModuExpo HT 49 per i servizi igienici. Trattasi di pompe di calore monoblocco aria-acqua progettate per impianti di media dimensione e in grado di soddisfare fabbisogni elevati per il riscaldamento e per l'ACS anche in condizioni molto rigide. Possiedono un doppio compressore; questo garantisce una gestione ottimale dei carichi attraverso una parzializzazione a gradini. Lo scambiatore lato impianto, di tipo a piastre in acciaio inox, permette di limitare le dispersioni termiche e la formazione di condensa.

In Figura 59 viene mostrata la struttura esterna delle macchine a pompa di calore aventi potenza nominale tra i 30 kW e i 49 kW, realizzata in lamiera d'acciaio zincata per garantire protezione dagli agenti esterni e una facile installazione/manutenzione. In Tabella 77 e 78 vengono riportate le caratteristiche principali ricavate dalle schede tecniche conformemente alla norma tecnica UNI 11300-4 (temperatura esterna 2°C, temperatura di mandata 55°C).



Figura 59 – Pompa di calore ModuExpo HT (Fonte: Paradigma)

POMPA DI CALORE SERVIZI IGIENICI	
Costruttore	Paradigma
Modello	ModuExpo HT 49
Tipologia di funzionamento	Elettrica ON/OFF
Sorgente calda	Acqua impianto
Temperatura max sorgente calda (°C)	65
Temperatura min sorgente calda (°C)	30
Sorgente fredda	Aria esterna
Temperatura max sorgente fredda (°C)	42
Temperatura min sorgente fredda (°C)	-20
COP	2,59
Potenza utile (kW)	43,7

Tabella 77 – Scheda tecnica pompa di calore Paradigma ModuExpo HT 49

POMPA DI CALORE CUCINA	
Costruttore	Paradigma
Modello	ModuExpo HT 38
Tipologia di funzionamento	Elettrica ON/OFF
Sorgente calda	Acqua impianto
Temperatura max sorgente calda (°C)	65
Temperatura min sorgente calda (°C)	30
Sorgente fredda	Aria esterna
Temperatura max sorgente fredda (°C)	42
Temperatura min sorgente fredda (°C)	-20
COP	2,62
Potenza utile (kW)	34,8

Tabella 78 – Scheda tecnica pompa di calore Paradigma ModuExpo HT 38

• SOLARE TERMICO

Per quanto concerne l'impianto solare termico, l'intervento prevede la copertura di circa 13,98 m² corrispondente all'installazione di un totale di n. 6 collettori solari Paradigma AQUA PLASMA 15/27 aventi un angolo d'inclinazione di 30° e angolo azimutale pari a 0° (Sud). Le principali caratteristiche tecnologiche del modello selezionato prevedono:

- La presenza di tubi sottovuoto per garantire la minimizzazione delle perdite di calore.
- L'utilizzo dell'acqua in sostituzione del classico fluido termovettore con glicole per ottenere una considerevole semplificazione idraulica e la possibilità di integrazione in sistemi già esistenti. La funzione antigelo è resa possibile dalla capacità della pompa solare di accendere l'impianto distribuendovi preventivamente una quantità di energia necessaria alla continuità del servizio.
- La presenza di un trattamento al Plasma sul rivestimento del tubo sottovuoto che comporta un aumento della capacità di assorbimento; la minor riflessione del tubo esterno è garantita dalla creazione di uno strato di ossido di silicio. Il risultato è l'aumento dell'efficienza di conversione della radiazione solare diretta e diffusa in energia termica.

In Figura 60 e in Tabella 79 vengono riportati rispettivamente il modello di collettore selezionato e le sue caratteristiche principali ricavate dalla scheda tecnica.



Figura 60 – Collettore termico AQUA PLASMA (Fonte: Paradigma)

SOLARE TERMICO	
Costruttore	Paradigma
Modello	AQUA PLASMA 15/27
Dimensioni (mm)	1627x1642x111
Superficie lorda/apertura	2,67/2,33
Rendimento annuale (kWh/anno)	1797
Rendimento spec. annuale (kWh/m2/anno)	673
Efficienza collettore (%)	56
Coeff. primo ordine (W/m2/K)	0,47
Coeff. secondo ordine (W/m2/K)	0,003

Tabella 79 – Scheda tecnica collettore termico Paradigma AQUA PLASMA

• SISTEMA DI DISTRIBUZIONE:

Per il sistema di distribuzione del circuito primario è prevista la posa delle tubazioni, l'installazione della sicurezza Inail, dei vasi d'espansione e dei circolatori. Il dimensionamento dei vasi di espansione, delle pompe di circolazione e delle tubazioni del primario ha seguito lo stesso schema logico esplicito nel precedente paragrafo.

In Tabella 80 sono riportati i risultati del dimensionamento del volume dei vasi di espansione; i risultati del calcolo della portata e le caratteristiche dei componenti scelti sono riportati in Tabella 81, 82, 83 e 84; i risultati del dimensionamento delle tubazioni sono riportati in Tabella 85.

PARAMETRO		PDC 1	PDC 2	ST
Va	litri	350	450	45,6
e	-	0,03469	0,03469	0,03469
n	-	3,469	3,469	3,469
θ_{max}	°C	90	90	90
Vv*	litri	1,75	2,25	0,228
Pa	bar	2,8	2,8	2,8
Pe	bar	5,5	5,5	5,5
Pvs	bar	5	5	5
Vn	litri	28	36	4

Tabella 80 – Risultati dimensionamento vasi espansione primario ACS

PARAMETRO		PDC 1	PDC 2	ST
Potenza	kW	34,8	43,7	19
ΔT	°C	10	10	10
Portata	m ³ /h	3,0	3,8	1,6

Tabella 81 – Risultati dimensionamento circolatori primario ACS

POMPA DI CIRCOLAZIONE PDC 1	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS SMALL
Portata (m ³ /h)	3
Potenza elettrica (kW)	0,1

Tabella 82 – Scheda tecnica pompa primario PDC 1

POMPA DI CIRCOLAZIONE PDC 2	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS SMALL
Portata (m ³ /h)	4,2
Potenza elettrica (kW)	0,13

Tabella 83 – Scheda tecnica pompa primario PDC 2

POMPA DI CIRCOLAZIONE ST	
Costruttore:	DAB
Modello:	EVOPLUS SMALL
Portata (m ³ /h)	2,4
Potenza elettrica (kW)	0,132

Tabella 84 – Scheda tecnica pompa primario ST

PARAMETRO		PDC 1	PDC 2	ST
Portata	m3/h	3,0	3,8	1,6
Velocità	m/s	1,5	1,5	1,5
Diametro	mm	27	30	20

Tabella 85 - Risultati dimensionamento tubazioni primario ACS

Differentemente, per il sistema di distribuzione del circuito secondario è prevista la posa delle tubazioni e la sola installazione dei vasi di espansione.

In questo caso il dimensionamento dei vasi di espansione è stato realizzato conformemente alle norme Caleffi per gli impianti sanitari. La capacità di un vaso di espansione chiuso a membrana è calcolata sulla base della seguente formula:

$$V_n = \frac{e \cdot V_{sp}}{1 - \frac{P_a}{P_e}}$$

- V_{sp} : volume di acqua contenuto nel bollitore.
- e : coefficiente di espansione dell'acqua in funzione della massima differenza tra la temperatura dell'acqua fredda di alimentazione e quella calda di accumulo.

$$e = \frac{n_{T2}}{100} - \frac{n_{T1}}{100}$$

- n_T : coefficiente di espansione ricavabile dalla Tabella 86 al variare della temperatura.
- n_{T1} : coefficiente di espansione funzione della temperatura di accumulo.
- n_{T2} : coefficiente di espansione funzione della temperatura dell'acqua fredda.

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
n	0	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,7	2,3	2,9	3,6

Tabella 26 - Coefficiente n al variare della temperatura, senza glicole (Fonte: Caleffi)

- P_a : pressione assoluta iniziale lato gas, equivale alla pressione di precarica del vaso a freddo incrementata della pressione atmosferica.

$$P_a = P_{ar} + 1$$

- P_e : pressione assoluta finale lato gas, funzione della pressione della valvola di sicurezza.

$$P_e = P_{vs} - 0,5 + 1$$

In Tabella 87 sono riportati i parametri descritti e il risultato del volume dei vasi di espansione.

PARAMETRO		ACC 1	ACC 2
Vsp	litri	600	1000
e	-	0,0133	0,0133
θ1	°C	12	12
nT1	-	0,12	0,12
θ2	°C	55	55
nT2	-	1,45	1,45
Par	bar	2	2
Pvs	bar	5	5
Pa	bar	3	3
Pe	bar	5,5	5,5
Vn	litri	18	29

Tabella 87 – Risultati dimensionamento vasi espansione secondario ACS

Il dimensionamento delle tubazioni è stato realizzando in funzione della velocità, assunta costante, e della portata, i cui valori, per ogni lavabo, sono stati ricavati dal Quaderno Caleffi relativo agli impianti idro-sanitari. Il diametro è stato ricavato dalla relativa portata di progetto.

In dettaglio, l'equazione utilizzata è

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{v \cdot \pi \cdot 3600}} \cdot 1000$$

I risultati del dimensionamento sono riportati in Tabella 88 e 89.

SERVIZI SANITARI		
N LAVABI	67	-
VELOCITÀ	1,5	m/s
PORTATA	0,1	l/s
PORTATA TOTALE	6,7	l/s
PORTATA DI PROGETTO	3,95	l/s
PORTATA DI PROGETTO	14,22	m3/h
DIAMETRO INTERNO	58	mm

Tabella 88 - Risultati dimensionamento tubazioni ACS servizi sanitari

CUCINA		
N LAVABI	10	-
VELOCITÀ	1,5	m/s
PORTATA	0,1	l/s
PORTATA TOTALE	1	l/s
PORTATA DI PROGETTO	1	l/s
PORTATA DI PROGETTO	3,6	m3/h
DIAMETRO INTERNO	29	mm

Tabella 89 - Risultati dimensionamento tubazioni ACS cucina

• SCHEMA FUNZIONALE:

In Figura 61 è rappresentato lo schema funzionale dell'impianto.

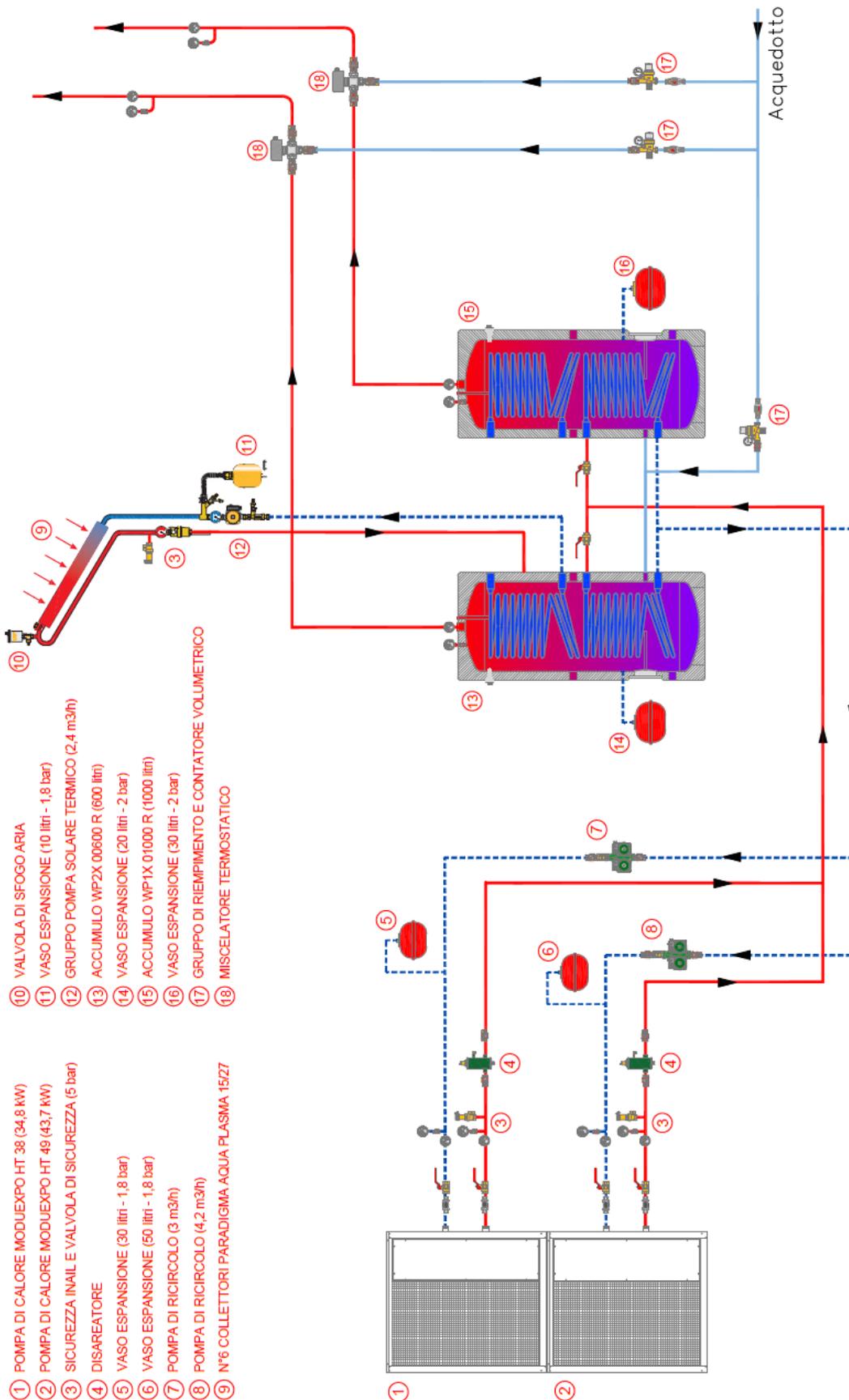


Figura 61 – Schema funzionale impianto di produzione ACS

4.3.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dal dimensionamento dell'impianto di produzione ACS e dalla sua modellazione sul software Edilclima.

L'intervento, i cui risultati principali sono raffigurati in Tabella 90, ha generato un fabbisogno di circa 48.087 kWh di energia elettrica, suddivisi in 34.080 kWh legati all'asservimento dei servizi igienici e di 14.007 kWh per la cucina. L'impianto solare termico dimensionato è risultato in grado di coprire il 72% della produzione annuale legata alla cucina (circa il 20% della produzione complessiva).

Mese	Fabbisogno servizi igienici	Fabbisogno cucina	Fabbisogno complessivo	Producibilità netta ST	Copertura cucina
-	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
GEN	3662	1505	5167	717	48%
FEB	3306	1358	4664	802	59%
MAR	3656	1499	5155	1094	73%
APR	3532	1444	4976	1251	87%
MAG	3644	1487	5131	1344	90%
GIU	1782	738	2520	738	100%
LUG	936	397	1333	397	100%
AGO	936	397	1333	397	100%
SET	1783	740	2523	740	100%
OTT	3646	1489	5135	1069	72%
NOV	3536	1449	4985	742	51%
DIC	3661	1504	5165	728	48%
TOTALE	34080	14007	48087	10019	72%

Tabella 90 – Risultati fabbisogno di ACS e copertura del solare termico

In Figura 62 è riportato il raffronto mensile tra il fabbisogno della cucina e la produzione del solare termico.

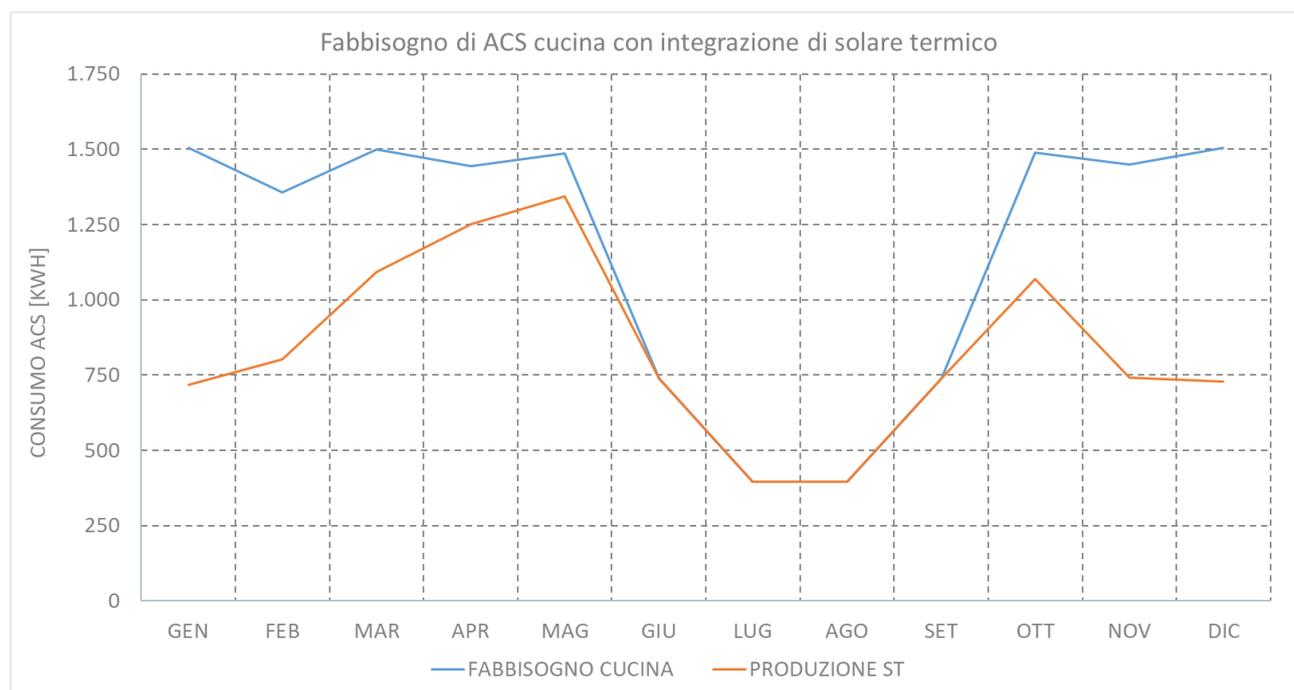


Figura 62 – Confronto fabbisogno di ACS cucina e produzione solare termico

L'implementazione dello scenario nel modello energetico è stata effettuata al fine di valutarne i benefici dal punto di vista energetico. La modellazione dello stato di progetto ha previsto l'installazione dell'impianto dedicato alla generazione e distribuzione di ACS all'interno dell'edificio. Lo scenario prevede l'installazione di due pompe di calore, due accumuli e di n. 6 collettori solari per l'integrazione della cucina. Lo stato di progetto ha generato i risultati espressi dalla Tabella 91.

I consumi di Gas Metano sono rimasti costanti. Gli assorbimenti elettrici, trattandosi di un intervento ex-novo, sono aumentati del 23%.

La classe energetica è rimasta la medesima: al netto di un peggioramento dell'Indice di Prestazione Energetica del 2%, si è ottenuto un sostanziale avvicinamento di tale indice ai valori limite della classe superiore. Le emissioni di CO₂ sono aumentate raggiungendo i $32 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

PARAMETRO	PRE	POST	VARIAZIONE
Metano [Sm3]	18.170	18.170	0%
Elettricità [kWh]	32.358	39780	22,9%
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	150,49	153,51	2,0%
CO ₂ [kg/m ² /anno]	31	32	3,2%

Tabella 91 – Caratterizzazione intervento (Scenario 3)

4.3.3 – ANALISI ECONOMICA

L'analisi è stata condotta prendendo come riferimento i prezzi ricavati dal Prezzario DEI per gli impianti di ACS del 2° semestre del 2023. Per l'intervento, è stato previsto un costo complessivo pari a circa € 56.920,00, suddivisi rispettivamente in € 17.200,00 per il solare termico ed € 39.720,00 per le pompe di calore, gli accumuli e la distribuzione. Le singole voci di spesa e i parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa sono riportate in Tabella 92 e 93. Gli indicatori economici di riferimento sono riportati in Tabella 94. L'investimento dal punto di vista economico, considerando i flussi di cassa scontati e il solo investimento legato all'impianto solare termico, risulta redditizio: esso presenta un VAN positivo ed un IP superiore a uno; il tempo di rientro scontato si assesta a 9 anni.

	COSTO PER UNITÀ	QUANTITÀ	COSTO COMPLESSIVO
COLLETTORE SOLARE	2.600,00	6	15.600,00
PDC 35 kW	15.000,00	1	15.000,00
PDC 45 kW	19.000,00	1	19.000,00
ACCUMULO 1000 L	1.300,00	1	1.300,00
ACCUMULO 600 L	700,00	1	700,00
VASO ESPANSIONE 50 l	170,00	1	170,00
VASO ESPANSIONE 30 l	150,00	2	300,00
VASO ESPANSIONE 20 l	140,00	1	140,00
VASO ESPANSIONE 10 l	130,00	1	130,00
GRUPPO POMPA ST	510,00	1	510,00
CIRCOLATORE 4 m ³ /h	640,00	1	640,00
CIRCOLATORE 3 m ³ /h	550,00	1	550,00
VALVOLA SICUREZZA	160,00	3	480,00
SICUREZZA INAIL	800,00	3	2.400,00

Tabella 92 – Elenco singole voci investimento iniziale (Scenario 3)

Durata del progetto	0,5	anni
Vita utile intervento	25	anni
Costo GM comprato	0,85	€/Sm ³
Costo EE comprata	0,20	€/kWh
Tasso di sconto	5	%
Tasso incremento acquisto annuale	0,025	-
Investimento solare termico	17.200,00	€
Investimento pompa di calore	39.720,00	€

Tabella 93 – Parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa (Scenario 3)

VAN (scontato)	$\sum \text{Benefici att} - \sum \text{Costi att}$	21.934	€
IP - Indice di Profitto (scontato)	$\sum \text{Benefici att} / \sum \text{Costi att}$	2,275	-
PBT - Tempo di ritorno semplice	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	8	anni
dPBT - Tempo di ritorno attualizzato	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	9	anni
TIR - Tasso Interno Rendimento	Valore di r che annulla il VAN (IP=1)	15	%

Tabella 94 – Indicatori economici (Scenario 3)

4.4 – SOLARE FOTOVOLTAICO

Il quarto intervento prevede l'installazione di un impianto fotovoltaico di tipo grid-connected con lo scopo di produrre energia elettrica ad integrazione della fornitura dalla rete già presente. Questa configurazione prevede l'autoproduzione locale di energia durante le ore di funzionamento dell'impianto: nel caso in cui l'energia prodotta non sia sufficiente, ad esempio nelle ore di massimo assorbimento, viene integrata dalla rete elettrica; in caso contrario, laddove l'energia prodotta sia superiore al fabbisogno dell'edificio, essa verrà immessa in rete e conteggiata da un apposito contatore bidirezionale.

4.4.1 – DIMENSIONAMENTO

- FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA:

Per l'analisi condotta sono stati utilizzati i valori medi delle annualità precedentemente analizzate, i cui consumi medi, espressi in kWh, sono stati riportati in Tabella 95.

MESE	CONSUMI (kWh)
GENNAIO	3732
FEBBRAIO	3809
MARZO	3637
APRILE	2281
MAGGIO	2807
GIUGNO	1553
LUGLIO	747
AGOSTO	453
SETTEMBRE	2196
OTTOBRE	3578
NOVEMBRE	3550
DICEMBRE	3156
TOTALE	31499

Tabella 35 - Consumi medi di energia elettrica

- PRODUCIBILITÀ:

La producibilità del sito in esame è stata stimata attraverso l'utilizzo del tool online PVGIS. Il calcolo è stato effettuato utilizzando il database mensile di radiazione solare SARAH2 per moduli in silicio cristallino. L'impianto, autoportante, verrà installato direttamente sul tetto pianeggiante e prevederà una potenza di picco di 19,8 kW_p con perdite di sistema nell'ordine del 14%. L'angolo azimutale è assunto costante e pari a 0° (Sud). Per l'angolo d'inclinazione sono state portate avanti due analisi:

- Il primo caso prevede un angolo di tilt di 30° per garantire una producibilità annua maggiore, ottenibile attraverso un incremento netto della produzione estiva rispetto a quella invernale.
- Il secondo prevede un angolo di tilt di 60° al fine di ottimizzare la producibilità dell'impianto nei mesi invernali, sacrificando in parte la produzione annua complessiva.

Per quanto concerne il primo caso, in Figura 63 sono riportati rispettivamente i valori di producibilità e irraggiamento del sito in esame, calcolati mensilmente da PVGIS.

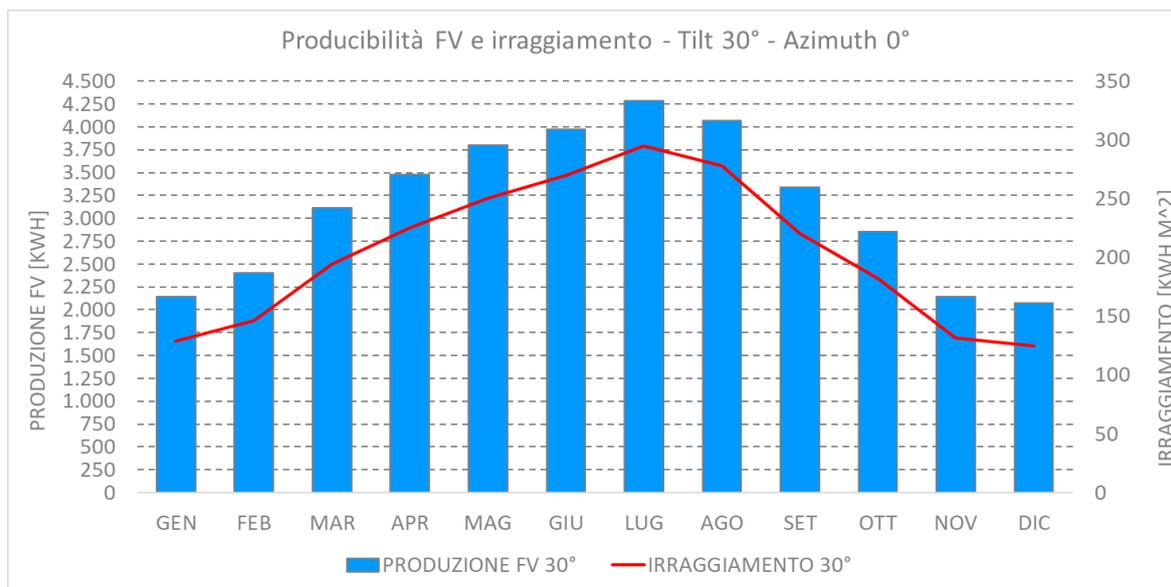


Figura 63 - Producibilità FV e irraggiamento con angolo tilt di 30°

La producibilità dell’impianto è proporzionale all’andamento dell’irraggiamento che caratterizza la località in analisi. La produzione stimata è di 37.677 kWh: in dettaglio il picco dei valori viene raggiunto a Luglio; la produzione estiva mensile è circa il doppio di quella invernale per via del minore angolo di inclinazione dei moduli. In questo contesto si ottiene un valore di energia specifica annuale di 1.903 kWh/kW_p e conseguentemente un valore di ore equivalenti di 1.903 h_{eq}/anno. Questa strategia di installazione prevede un valore di producibilità annua maggiore per via del minore angolo di inclinazione che favorisce la produzione nei mesi estivi, caratterizzati dai maggiori valori di irraggiamento. Nel contesto scolastico questa soluzione penalizza la possibilità di raggiungere alte percentuali di autoconsumo nei mesi invernali, caratterizzati da valori di consumo elettrico maggiori per via dell’illuminazione e del funzionamento degli impianti termici.

Per quanto concerne il secondo caso, in Figura 64 sono riportati rispettivamente i valori di producibilità e irraggiamento del sito in esame, calcolati mensilmente da PVGIS.

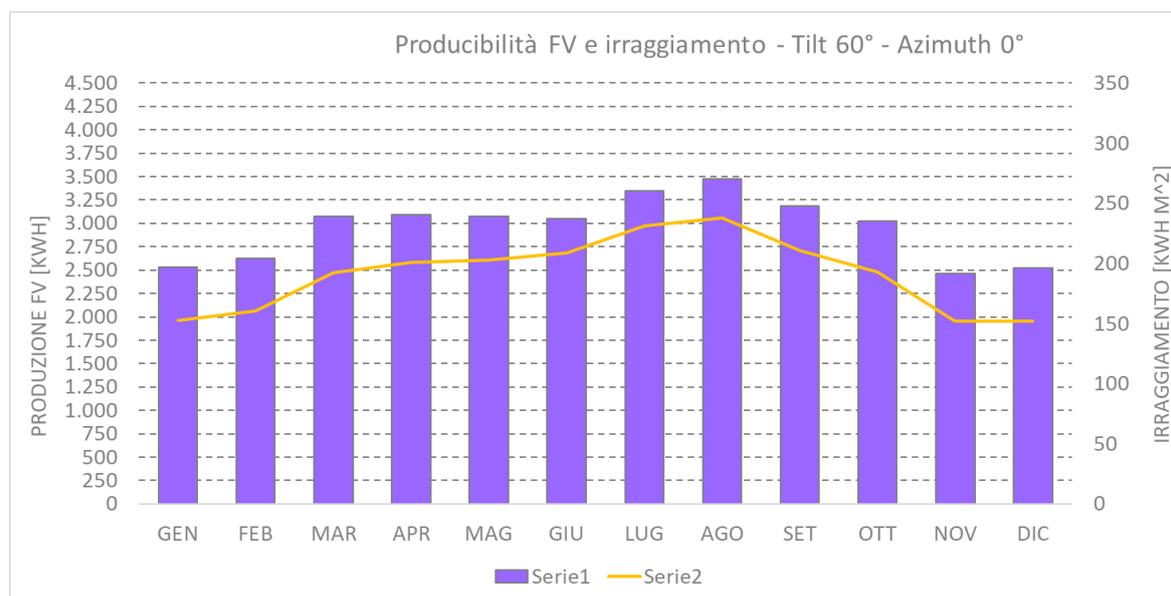


Figura 64 - Producibilità FV e irraggiamento con angolo tilt di 60°

È possibile osservare come la producibilità dell'impianto sia proporzionale all'andamento dell'irraggiamento che caratterizza la località in analisi. La produzione stimata è di 35.470 kWh: in dettaglio il picco dei valori viene raggiunto ad Agosto; la produzione estiva mensile seppur maggiore, risulta maggiormente confrontabile con quella invernale per via del maggiore angolo di inclinazione dei moduli. In questo contesto si ottiene un valore di energia specifica annuale di 1.791 kWh/kW_p e conseguentemente un valore di ore equivalenti di 1.791 h_{eq}/anno. Questa strategia di installazione prevede un valore di producibilità annua minore per via del maggiore angolo di inclinazione che favorisce la produzione nei mesi invernali, caratterizzati da minori valori di irraggiamento. Nel contesto scolastico questa soluzione va a massimizzare le percentuali di autoconsumo raggiungibili nei mesi autunnali ed invernali. L'autoconsumo estivo è sufficiente.

In Figura 65 e 66 sono riportati rispettivamente il confronto tra producibilità e irraggiamento delle casistiche e la raffigurazione dei delta ottenuti.

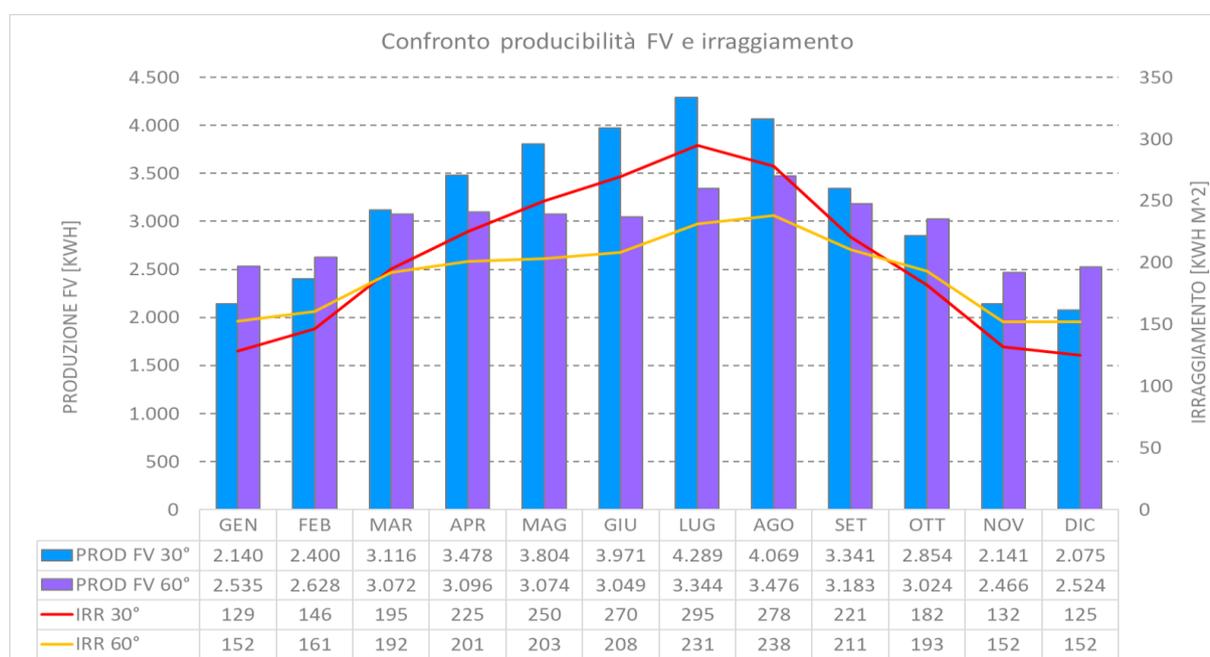


Figura 65 – Confronto producibilità FV con angolo tilt di 30° e 60°

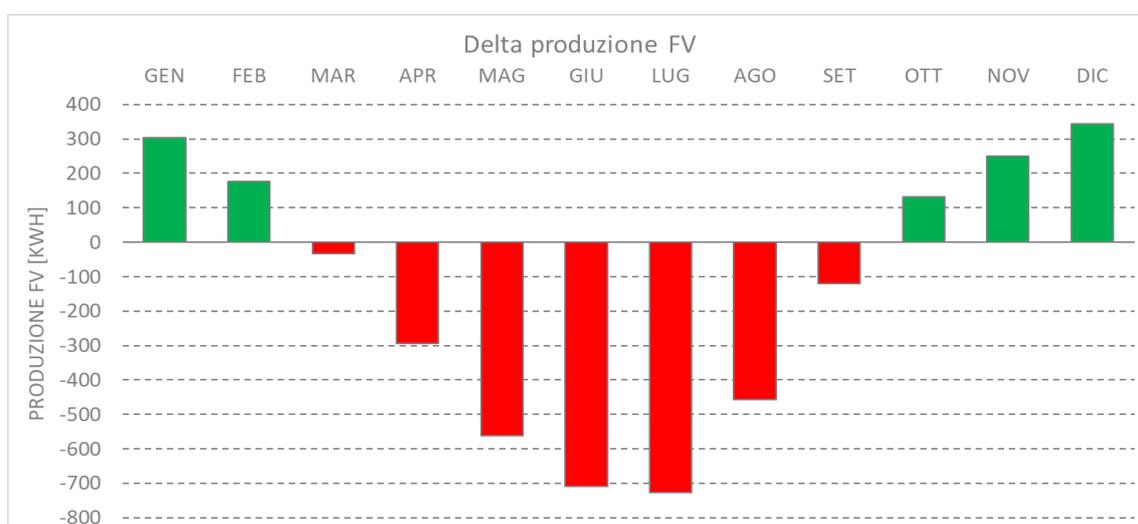


Figura 66 – Delta producibilità FV con angolo tilt di 30° e 60°

Nonostante il vantaggio teorico nell'installazione di moduli con angolazione di 60° per asservire una destinazione d'uso scolastica, in questo progetto, verranno installati moduli con inclinazione di 30°. Questa scelta deriva dalla fattibilità tecnica nell'installazione dei pannelli: i fornitori hanno infatti negato la possibilità di installare sulla copertura, a circa 9 metri di altezza, moduli con elevata inclinazione. Questa restrizione è stata attuata per scongiurare il fenomeno di vela che i moduli potrebbero creare in presenza di forti raffiche e per l'eccessiva quantità di zavorre, considerate in kg/m², necessarie a garantire la sicurezza.

- SELEZIONE MODULO FOTOVOLTAICO:

È prevista l'installazione di n. 44 moduli LONGI SOLAR LR4-72HIH-450M da 450 W_p per una superficie complessiva di 95,64 m². La raffigurazione del modulo e le caratteristiche da scheda tecnica sono riportate rispettivamente in Figura 67 e in Tabella 96.

Tecnologia	Monocristallino	
Numero di celle	144	
Dimensioni del modulo	2094 x 1038 x 35	mm
Peso del modulo	23,5	kg
P _{max}	450	W
I _{mp}	10,8	A
V _{mp}	41,5	V
I _{sc}	11,6	A
V _{oc}	49,3	V
η _{stc}	20,7	%
NOCT	45	°C
α (I _{sc})	0,048	%/°C
β (V _{oc})	-0,270	%/°C
γ (P _{max})	-0,350	%/°C
A	2,174	m ²
P _{max} /A	207	W/m ²

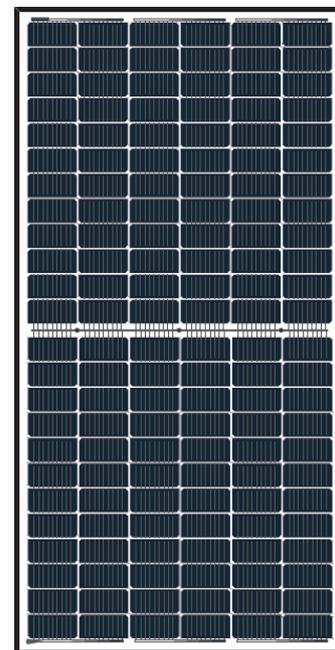


Tabella 96 – Scheda tecnica LONGI SOLAR LR4-72HIH-450M (Fonte: Solar Energy)

Figura 67 - LONGI SOLAR LR4-72HIH-450M (Fonte: Solar Energy)

- SELEZIONE INVERTER:

Attraverso PVGIS è stato ricavato il valore di irradianza globale in condizioni di cielo sereno G pari a 1.035 W/m² e il valore della temperatura media oraria dell'aria pari a 16,05 °C.

Sono state ricavate la temperatura della cella e la potenza in corrente alternata (efficienza preliminare dell'inverter 96,5%), rispettivamente dal valore di

$$T_c = T_a + (NOCT - T_{a,NOCT}) \cdot \frac{G}{G_{NOCT}} = 48,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_{AC} = P_n \cdot \frac{G}{G_{STC}} \cdot [1 + \gamma_{\%} \cdot (T_c - T_{a,STC})] \cdot 0,92 \cdot \eta_{DC-AC} = 16.707,5 \text{ VA}$$

L'inverter selezionato è il GROWATT, modello TL3-X 15K. La raffigurazione dell'inverter e le caratteristiche da scheda tecnica sono riportate rispettivamente in Figura 68 e in Tabella 97.

Potenza FV raccomandata	22500	W
Pac,inv	16500	VA
Numero canali MPPT	2	-
Vmppt,min	140	V
Vmppt,max	1000	V
Idc,max	52	A
Vdc,max	1100	V
η_{max}	98,6	%
η_{eur}	98,2	%
Precisione MPPT	99,9	%
Dimensioni dell'inverter	425/387/178	mm
Peso dell'inverter	16	kg

Tabella 97 – Scheda tecnica TL3-X 15K (Fonte: GROWATT)



Figura 68 - TL3-X 15K (Fonte: GROWATT)

- COMPOSIZIONE STRINGHE E VERIFICHE:

I n. 44 moduli sono stati raggruppati in varie configurazioni di serie e paralleli: la soluzione scelta prevede la divisione dei moduli in n. 4 collegamenti paralleli composti da n. 11 moduli collegati in serie. In questa configurazione il voltaggio e la corrente nominali della stringa in STC sono

$$V_n = N_s \cdot V_{MPP} = 456,50 \text{ V}$$

$$I_n = N_p \cdot I_{MPP} = 43,38 \text{ A}$$

Per verificare che il voltaggio prodotto dal fotovoltaico non superi mai il massimo voltaggio sostenibile dall'inverter ($V_{DC,max}$), considerando che il coefficiente del voltaggio β è negativo, la condizione critica di riferimento è relativa alla minima temperatura raggiungibile: $T_{c,min} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$. Il voltaggio massimo raggiunto dall'array, in condizioni open-circuit, è uguale a

$$V_{OC}(T_{c,min}) = N_s \cdot [V_{OC}(STC) + \beta \cdot (T_{c,min} - T_{STC})] = 593,55 \text{ V}$$

Per verificare che la corrente prodotta dal fotovoltaico non superi mai la massima corrente sostenibile dall'inverter ($I_{DC,max}$), considerando che il coefficiente della corrente α è positivo, la condizione critica di riferimento è relativa alla massima temperatura raggiungibile: $T_{c,max} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$. La corrente massima raggiunta dall'array è uguale a

$$I_{max}(T_{c,max}) = N_p \cdot [I_{MPP}(STC) + \alpha \cdot (T_{c,max} - T_{STC})] = 44,42 \text{ A}$$

Per verificare che le condizioni operative dell'array cadano all'interno del range di voltaggio ammesso dall'MPPT ($V_{MPPT,min}$ e $V_{MPPT,max}$), il voltaggio massimo e minimo in condizioni di MPP deve essere calcolato. I valori ottenuti sono

$$V_n(T_{c,min}) = N_s \cdot [V_{MPP}(STC) + \beta \cdot (T_{c,min} - T_{STC})] = 499,64 \text{ V}$$

$$V_n(T_{c,max}) = N_s \cdot [V_{MPP}(STC) + \beta \cdot (T_{c,max} - T_{STC})] = 394,87 \text{ V}$$

È necessario verificare che il rapporto tra la potenza nominale dell'inverter P_{inv} e la potenza di picco del fotovoltaico P_p sia compreso tra il 90% e il 120%. Questa verifica permette di stabilire se l'inverter è nella condizione di lavorare in condizioni di alta efficienza. Il valore ottenuto è uguale a

$$\frac{P_{inv}}{P_p} = 114 \%$$

In Tabella 98 sono riportati i risultati delle verifiche ed i relativi valori limite.

CONDIZIONE TEST	VALORE CALCOLATO		VALORE LIMITE		RISULTATO
Voltaggio assoluto massimo	593,55	V	1100	V	✓
Corrente massima	44,42	A	52	A	✓
Voltaggio MPPT massimo	499,64	V	1000	V	✓
Voltaggio MPPT minimo	394,87	V	140	V	✓
Inverter/Field Power Ratio	114	%	90-120	%	✓

Tabella 98 – Verifiche accoppiamento modulo-inverter

- POSIZIONAMENTO:

Il posizionamento dei moduli, per evitare fenomeni di ombreggiamento, è stato definito provvedendo a individuare una zona della copertura libera nella sua prossimità di ostacoli verticali e a calcolare il distanziamento minimo tra due fila successive di moduli. Per realizzare questo calcolo è stato utilizzato il grafico mostrato in Figura 69 che permette di definire il rapporto tra la distanza da applicare tra due fila consecutive e la lunghezza del modulo, in funzione dell'angolo di inclinazione e della latitudine. In particolare, nel caso studio, l'angolo di inclinazione corrisponde a 30° mentre la latitudine di Roma è circa 41°. In funzione di questi dati si è ottenuto

$$\frac{L}{D_{min}} = 1,75$$

I pannelli sono stati disposti con il lato lungo parallelo al terreno: per tale ragione la lunghezza da considerare nel calcolo è quella del lato minore. La lunghezza tra due fila consecutive è

$$D_{min} = L \cdot \frac{L}{D_{min}} = 1,8165 \text{ m}$$

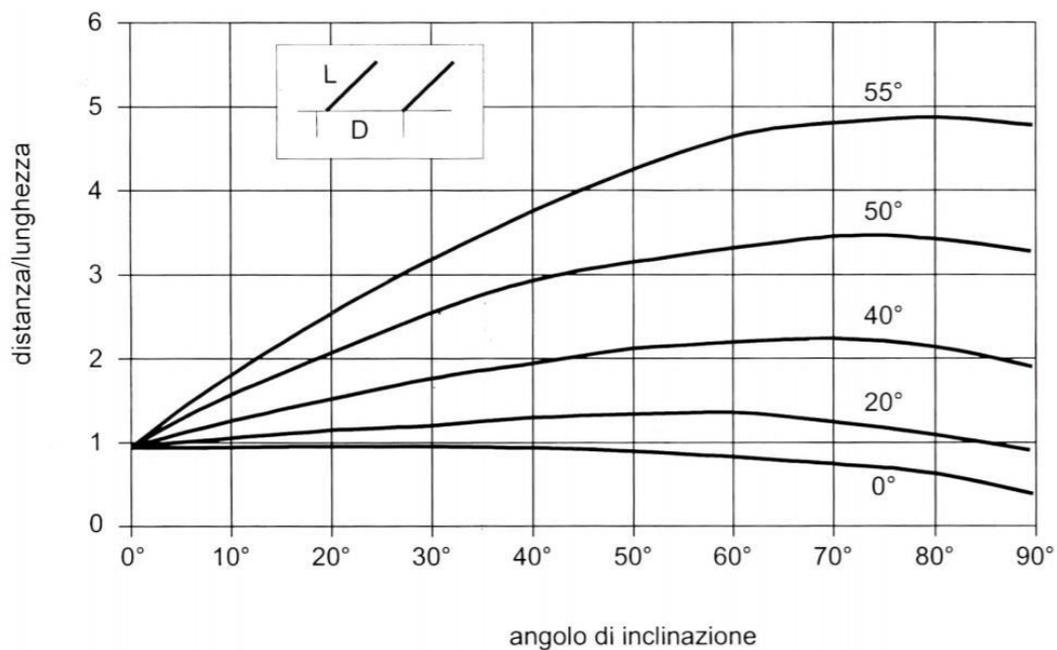


Figura 69 – Rapporto distanza/lunghezza in funzione dell'inclinazione e della latitudine

Per quanto concerne la messa in pianta, come mostrato in Figura 70, l'area individuata è localizzata nell'angolo nord-est del fabbricato, i moduli, a seguito dell'analisi precedentemente effettuata, sono installati in direzione sud con inclinazione di 30° rispetto all'orizzonte.

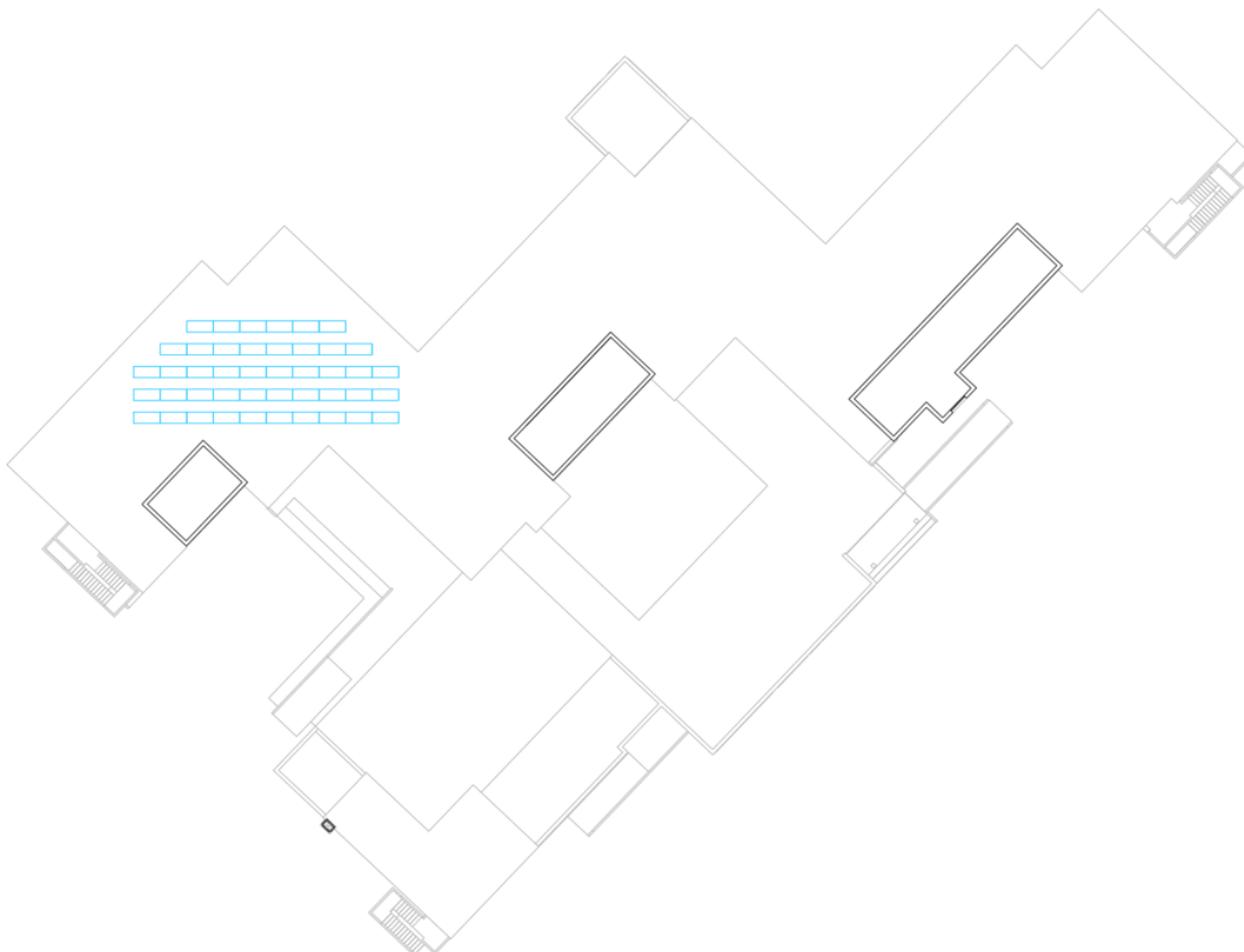


Figura 70 – Messa in pianta dei moduli fotovoltaici, orientamento vista Sud-Nord

• SCHEMA ELETTRICO:

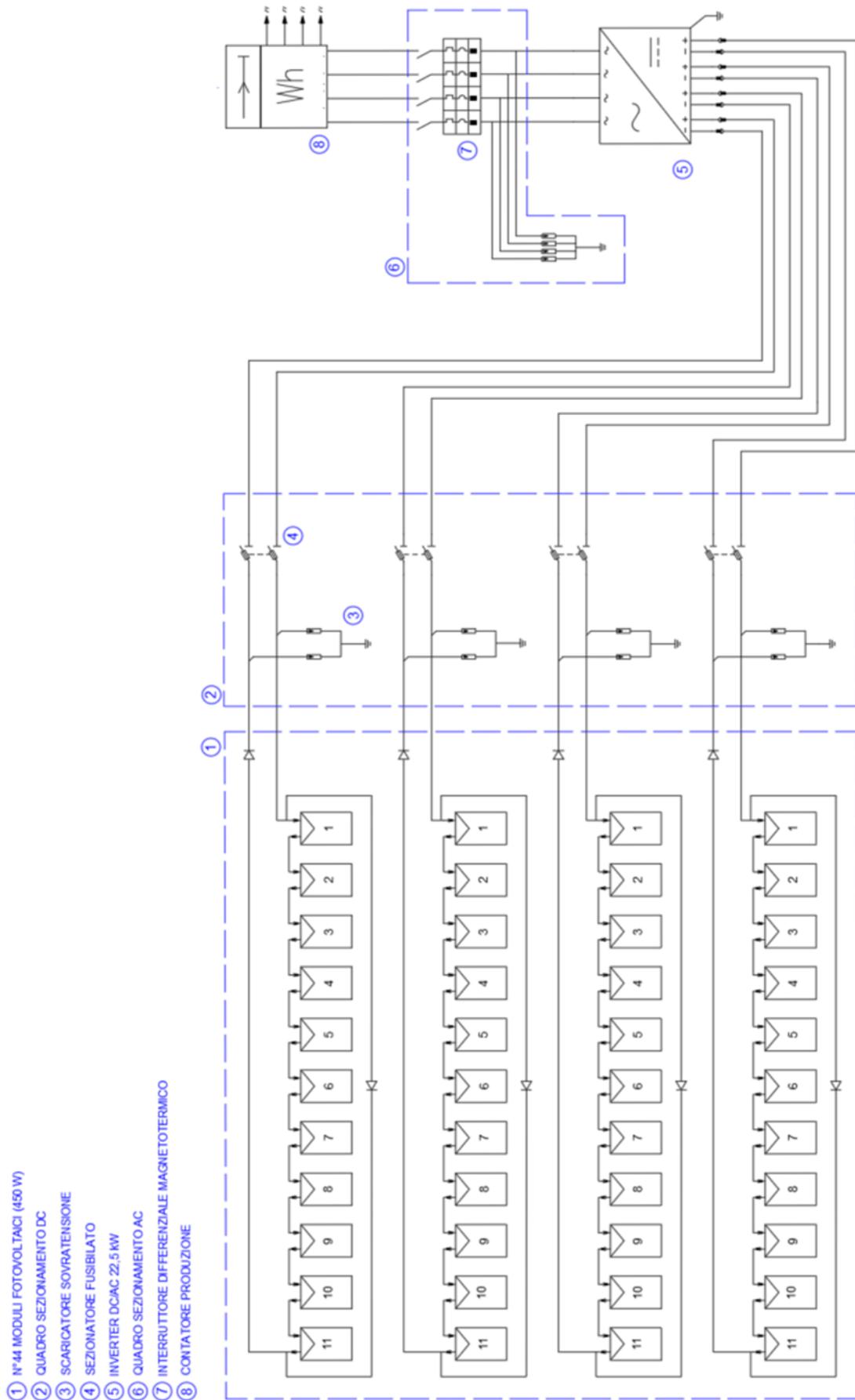


Figura 71 – Schema elettrico pt.1

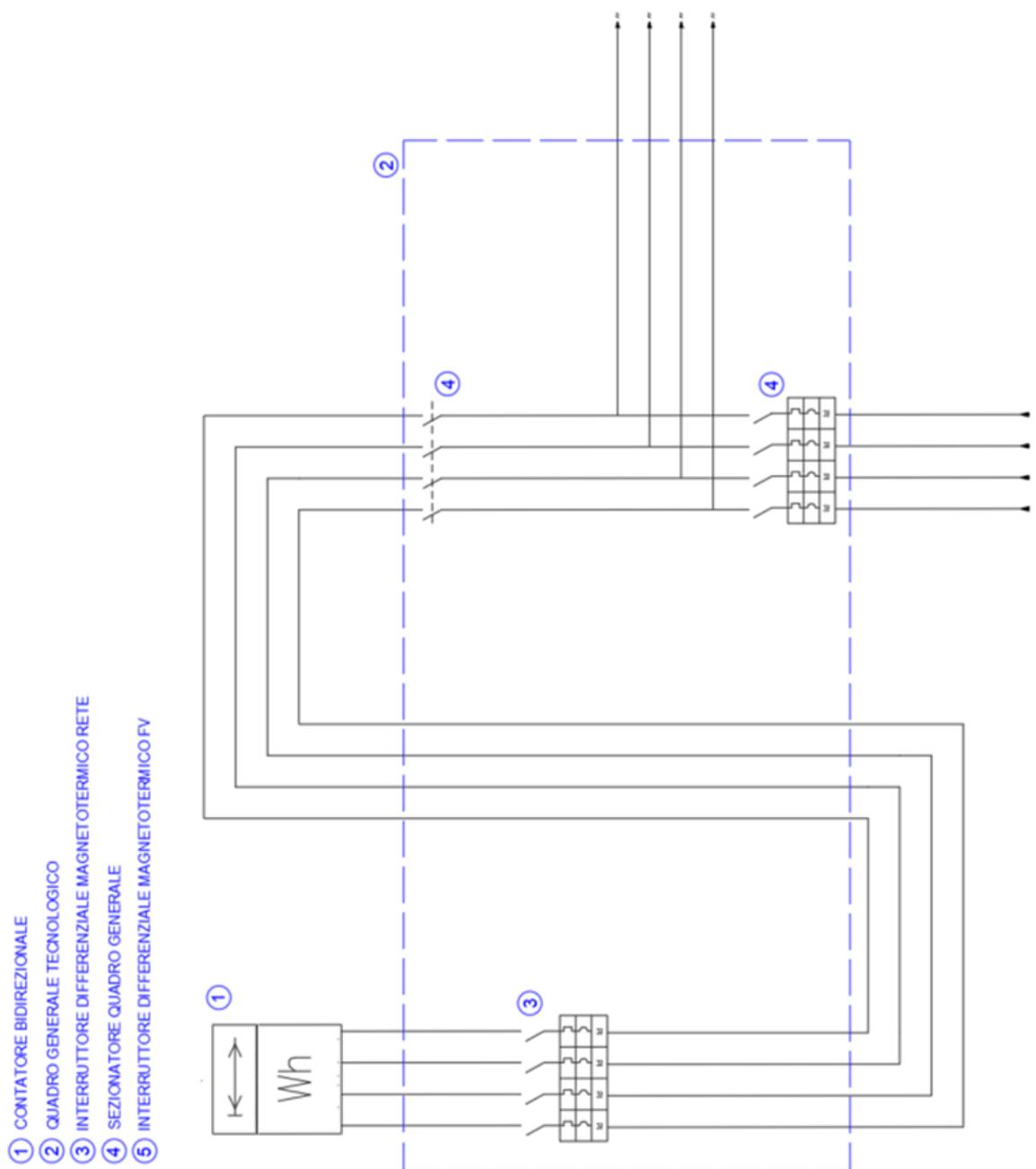


Figura 72 – Schema elettrico pt.2

In Figura 71 e 72 è rappresentato lo schema elettrico dell'impianto, i componenti principali sono:

- campo fotovoltaico contenente i 44 moduli installati, i diodi di bypass e i diodi di blocco;
- quadro di sezionamento DC contenente SPDs e i sezionatori fusibili;
- inverter da 22,5 kW con 2 canali DC, uno per ogni MPPT;
- quadro di sezionamento AC contenente SPD e interruttore differenziale magnetotermico;
- contatore di produzione del fotovoltaico;
- quadro generale tecnologico con interruttori differenziali magnetotermici e sezionatore;
- contatore bidirezionale della rete elettrica.

4.4.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti del dimensionamento dell’impianto fotovoltaico e dalla sua modellazione sul software Edilclima.

L’intervento, i cui risultati principali sono raffigurati in Tabella 99, ha permesso di produrre circa 37.677 kWh di energia elettrica rinnovabile, corrispondenti, a circa il 79% del fabbisogno necessario all’edificio. In dettaglio: l’energia autoconsumata corrisponde a 24.763 kWh, ovvero il 66% della produzione; l’energia destinata all’immissione in rete corrisponde a 12.914 kWh, ovvero il 34% del totale.

MESE	CONSUMO	PRODUZIONE FV	[%]	IRRAGGIAMENTO	[%]	AUTOCONSUMO	VENDITA
	[kWh]	[kWh]		[kWh/m ²]		[kWh]	[kWh]
GENNAIO	3.732	2.140	6%	129	5%	2.140	0
FEBBRAIO	3.809	2.400	6%	146	6%	2.400	0
MARZO	3.637	3.116	8%	195	8%	3.116	0
APRILE	2.281	3.478	9%	225	9%	2.281	1.197
MAGGIO	2.807	3.804	10%	250	10%	2.807	996
GIUGNO	1.553	3.971	11%	270	11%	1.553	2.418
LUGLIO	747	4.289	11%	295	12%	747	3.542
AGOSTO	453	4.069	11%	278	11%	453	3.616
SETTEMBRE	2.196	3.341	9%	221	9%	2.196	1.145
OTTOBRE	3.578	2.854	8%	182	7%	2.854	0
NOVEMBRE	3.550	2.141	6%	132	5%	2.141	0
DICEMBRE	3.156	2.075	6%	125	5%	2.075	0
TOTALE	31.499	37.677	100%	2.448	100%	24.763	12.914

Tabella 99 – Risultati fotovoltaico: produzione, irraggiamento, autoconsumo e vendita

L’implementazione dello scenario nel modello energetico è stata effettuata al fine di valutarne i benefici dal punto di vista energetico. La modellazione, avvenuta inserendo i contributi noti mensili ottenuti dal dimensionamento, ha generato i risultati espressi dalla Tabella 100.

I consumi di energia elettrica hanno subito una riduzione nell’ordine del 90,5%. Al contrario, come da aspettative i parametri relativi al Gas Metano non sono stati influenzati da questo intervento.

La classe energetica è rimasta la medesima, al netto di una riduzione dell’Indice di Prestazione Energetica dell’11,3%. Le emissioni di CO₂ hanno raggiunto la soglia dei $27 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

PARAMETRO	PRE	POST	VARIAZIONE
Metano [Sm ³]	18.170	18.170	0%
Elettricità [kWh]	32.358	3.070	-90,5%
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	150,49	133,47	-11,3%
CO ₂ [kg/m ² /anno]	31	27	-12,9%

Tabella 100 – Caratterizzazione intervento (Scenario 4)

4.4.3 – ANALISI ECONOMICA

L'analisi è stata condotta prendendo come riferimento i prezzi ricavati dal Prezzario DEI per gli impianti elettrici del 2^a semestre del 2023. L'intervento è caratterizzato da un costo di 1692 €/kW_p, che nel complessivo genera un importo pari a circa € 33.500,00. Le singole voci relative all'investimento sono riportate in Tabella 101. I costi del materiale e della manodopera per i moduli e per l'inverter sono in Tabella 102. I parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa sono riportati in Tabella 103. Gli indicatori economici di riferimento sono riportati in Tabella 104.

L'investimento dal punto di vista economico è particolarmente redditizio: esso presenta un VAN positivo e un IP particolarmente elevato; il tempo di rientro scontato si assesta a 6 anni.

	COSTO PER UNITÀ	QUANTITÀ	COSTO COMPLESSIVO
Modulo	428	44	18.844
Inverter	3.752	1	3.752
Cavi, protezioni e switch	5.000	1	5.000
Lavori e installazione	5.911	1	5.911

Tabella 101 – Elenco singole voci investimento iniziale (Scenario 4)

Modulo + struttura	manodopera	0,28	1,24	€/W
	materiale	0,95		
Inverter	manodopera	282,00	4.000,00	€
	materiale	3.752,00		

Tabella 102 – Costi di materiale e manodopera (Scenario 4)

Durata del progetto	0,5	anni
Vita utile intervento	25	anni
Costo GM comprato	0,85	€/Sm ³
Costo EE comprata	0,20	€/kWh
Costo EE venduta	0,10	€/kWh
Tasso di sconto	5	%
Tasso incremento vendita annuale	0,025	-
Investimento	33.507	€

Tabella 103 – Parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa (Scenario 4)

VAN (scontato)	$\sum \text{Benefici att} - \sum \text{Costi att}$	88.438	€
IP - Indice di Profitto (scontato)	$\frac{\sum \text{Benefici att}}{\sum \text{Costi att}}$	3,639	-
PBT - Tempo di ritorno semplice	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	5	anni
dPBT - Tempo di ritorno attualizzato	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	6	anni
TIR - Tasso Interno Rendimento	Valore di r che annulla il VAN (IP=1)	22	%

Tabella 104 – Indicatori economici (Scenario 4)

4.5 – RELAMPING

Il quinto scenario prevede la sostituzione integrale dell'illuminazione ordinaria a incandescenza con dei nuovi corpi illuminanti con tecnologia LED. La sostituzione dei corpi non verrà effettuata attraverso la modalità one-to-one in quanto nello stato di fatto l'illuminazione non è conforme ai requisiti richiesti della norma UNI EN 12464-1 relativa all'illuminazione dei luoghi di lavoro.

Gli obiettivi su cui è stato impostato il calcolo illuminotecnico sono:

- il raggiungimento del corretto comfort visivo in ogni locale in funzione della destinazione d'uso;
- la produzione di un livello di illuminamento minimo e uniforme;
- l'assenza di fenomeni di abbagliamento;
- la riduzione dei consumi di energia elettrica.

4.5.1 – CALCOLO E VERIFICA ILLUMINOTECNICA

L'analisi, conforme alla norma UNI EN 12464-1, permette di definire attraverso il calcolo e la successiva verifica illuminotecnica il tipo d'illuminazione, la quantità di lampade da utilizzare e il loro posizionamento effettivo per soddisfare i requisiti precedentemente esposti. Il calcolo è stato eseguito per ogni locale dell'edificio attraverso l'utilizzo del software Relux che ha permesso di simulare dettagliatamente l'illuminamento tenendo in considerazione l'arredamento e i limiti della normativa. Gli apparecchi illuminanti utilizzati per lo scenario in esame sono:

- Esse-ci ABSENT ESSENTIAL da 36 W, scheda tecnica in Tabella 105;
- Esse-ci ABSENT ESSENTIAL da 60 W, scheda tecnica in Tabella 106;
- Aura Light Collina CE D300 DALI da 15 W, scheda tecnica in Tabella 107;
- Aura Light Collina CE D300 DALI da 20 W, scheda tecnica in Tabella 108;

Esse-Ci ABSENT ESSENTIAL 36 W	
Produttore	Esse-ci
Modello	ABSENT ESSENTIAL
Potenza (W)	36
Flusso luminoso (lm)	4140
Efficienza (lm/W)	115
CCT (K)	4000
IRC	90

Tabella 105 – Scheda tecnica ABSENT ESSENTIAL 36 W

Esse-Ci ABSENT ESSENTIAL 60 W	
Produttore	Esse-ci
Modello	ABSENT ESSENTIAL
Potenza (W)	60
Flusso luminoso (lm)	41471500
Efficienza (lm/W)	19
CCT (K)	4000
IRC	90

Tabella 106 – Scheda tecnica ABSENT ESSENTIAL 60 W

Aura Light Collina 15 W	
Produttore	Aura Light
Modello	Collina CE D300 DALI
Potenza (W)	15
Flusso luminoso (lm)	1650
Efficienza (lm/W)	110
CCT (K)	4000
IRC	85

Tabella 107 – Scheda tecnica Collina 15 W

Aura Light Collina 20 W	
Produttore	Aura Light
Modello	Collina CE D300 DALI
Potenza (W)	20
Flusso luminoso (lm)	2200
Efficienza (lm/W)	110
CCT (K)	4000
IRC	85

Tabella 108 – Scheda tecnica Collina 20 W

In dettaglio:

- CCT (Correlated Colour Temperature): identifica il colore apparente della luce emessa in funzione della temperatura di colore correlata;
- IRC (Indice di Resa Cromatica): definisce la capacità della lampada di restituire i colori. Il valore massimo è 100 e decresce al ridursi di tale capacità.

I parametri più importanti tenuti in considerazione per la verifica illuminotecnica sono:

- Illuminamento medio (\bar{E}_m): valore d'illuminamento medio necessario a garantire il corretto comfort visivo all'interno della superficie di riferimento nella zona del compito visivo;
- Uniformità (U): valore ottenibile dal rapporto tra l'illuminamento medio e quello minimo;
- Abbagliamento molesto (UGR): impedisce una visione corretta del compito visivo.

Nel caso studio è stato condotto il calcolo illuminotecnico di tutti i locali unici identificabili nell'edificio, mentre per quanto concerne gli spazi aventi in comune superficie e destinazione d'uso è stato modellato un ambiente di riferimento. In Figura 73 ÷ 80 sono stati riportati i modelli 3D raffiguranti l'illuminamento in colori falsati di alcuni dei locali principali.

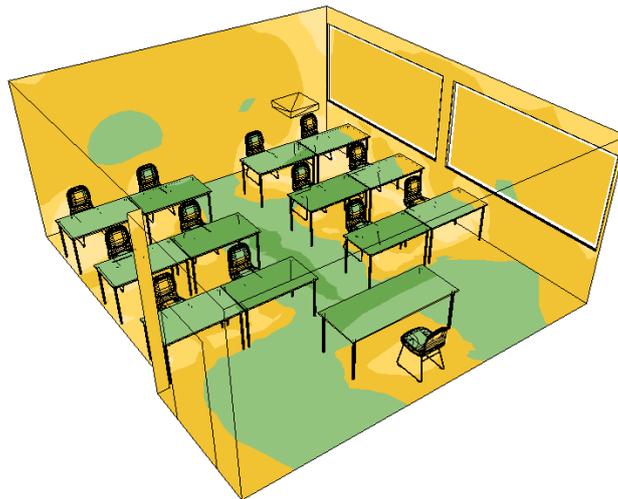


Figura 73 – Rappresentazione 3D con colori falsati aula didattica

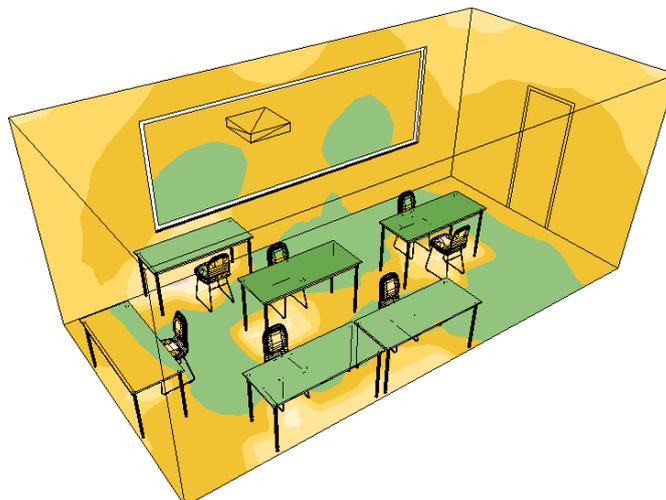


Figura 74 – Rappresentazione 3D con colori falsati aula della ceramica



Figura 75 – Rappresentazione 3D con colori falsati vano scala

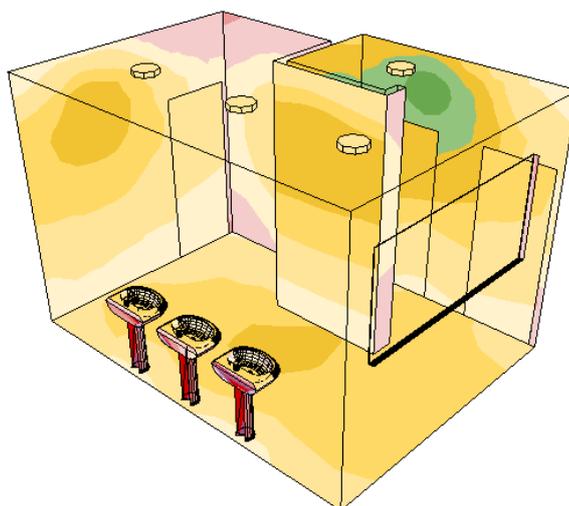


Figura 76 – Rappresentazione 3D con colori falsati anti-WC

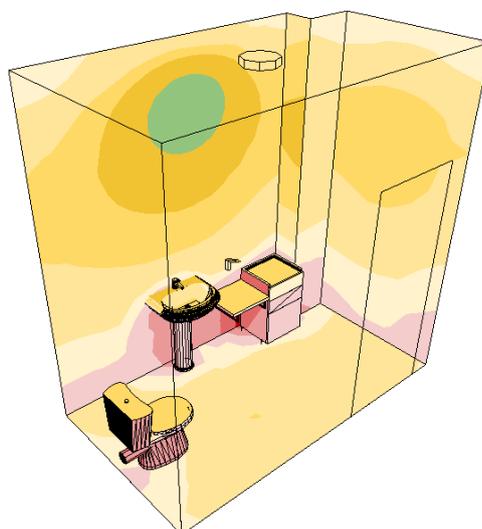


Figura 77 – Rappresentazione 3D con colori falsati WC accessibile

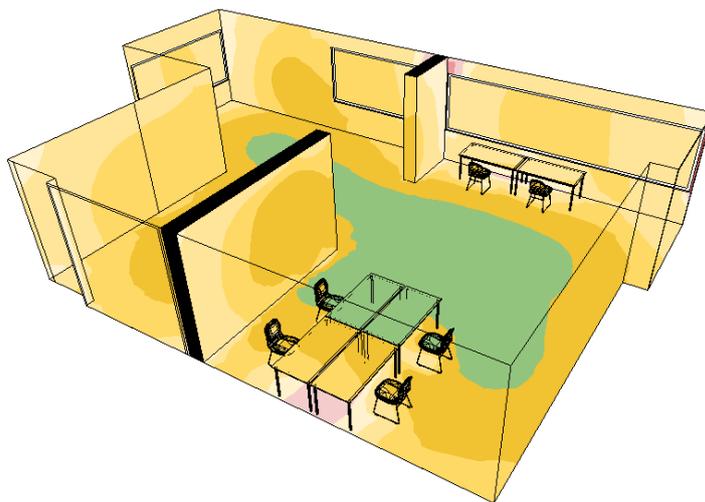


Figura 78 – Rappresentazione 3D con colori falsati atrio primo piano

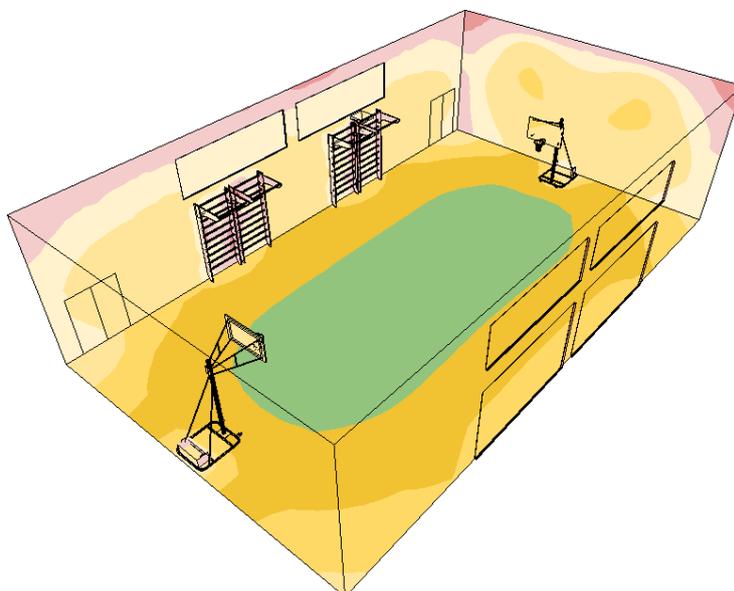


Figura 79 – Rappresentazione 3D con colori falsati palestra

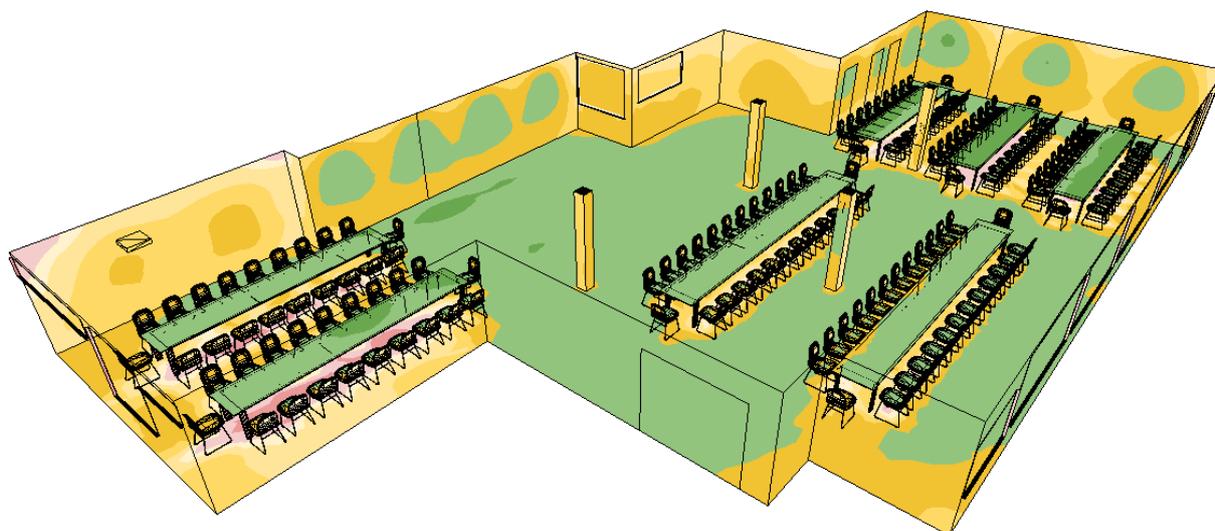


Figura 80 – Rappresentazione 3D con colori falsati mensa

In Tabella 109 sono riportati i risultati della verifica illuminotecnica espressi in forma tabellare.

LOCALE	DESTINAZIONE D'USO	\bar{E}_m (lux)	\bar{E}_m min (lux)	U0	U0 min
AULA TIPO	Aule scolastiche - attività generali	532	500	0,68	0,60
INGRESSO	Atri d'ingresso	298	200	0,61	0,40
ATRIO 1	Atri d'ingresso	211	200	0,56	0,40
DST 72	Area di circolazione, corridoio	243	100	0,69	0,40
ATRIO 73	Atri d'ingresso	252	200	0,62	0,40
DST 75	Area di circolazione, corridoio	182	100	0,46	0,40
ATRIO 47	Atri d'ingresso	334	200	0,46	0,40
ATRIO 41	Area di circolazione, corridoio	246	100	0,43	0,40
	Atri d'ingresso	236	200	0,46	0,40
DST 18/70	Area di circolazione, corridoio	281	100	0,50	0,40
LOCALI CUCINA	Area di circolazione, corridoio	166	100	0,66	0,40
VANO SCALA TIPO (6,55 m2)	Scale, scale mobili, tappeti mobili	166	100	0,83	0,40
		157	100	0,92	0,40
		135	100	0,80	0,40
		119	100	0,44	0,40
		119	100	0,65	0,40
VANO SCALA TIPO (15 m2)	Scale, scale mobili, tappeti mobili	135	100	0,79	0,40
		180	100	0,90	0,40
UFFICIO 2	Scrittura, lettura, elaborazione dati	575	500	0,68	0,60
UFFICIO 26	Scrittura, lettura, elaborazione dati	624	500	0,64	0,60
		549	500	0,70	0,60
UFFICIO 27	Scrittura, lettura, elaborazione dati	614	500	0,60	0,60
SPOGLIATOIO 42	Guardaroba, bagni, spogliatoi	302	200	0,81	0,40
SPOGLIATOIO TIPO	Guardaroba, bagni, spogliatoi	323	200	0,67	0,40
MAGAZZINO 6	Deposito e magazzini	235	100	0,93	0,40
DEPOSITO 76	Deposito e magazzini	147	100	0,90	0,40
DEPOSITO TIPO (14,5 m2)	Deposito e magazzini	103	100	0,88	0,40
LOCALE TECNICO	Deposito e magazzini	109	100	0,76	0,40
ANTI WC TIPO (1,8 m2)	Guardaroba, bagni, spogliatoi	243	200	0,89	0,40
ANTI WC TIPO (3 m2)	Guardaroba, bagni, spogliatoi	263	200	0,82	0,40
ANTI WC TIPO (6,75 m2)	Guardaroba, bagni, spogliatoi	225	200	0,87	0,40
ANTI WC TIPO (13,6 m2)	Guardaroba, bagni, spogliatoi	275	200	0,67	0,40
WC TIPO (2 m2)	Guardaroba, bagni, spogliatoi	270	200	0,92	0,40
WC TIPO (2,8 m2)	Guardaroba, bagni, spogliatoi	232	200	0,90	0,40
WC TIPO (3,8 m2)	Guardaroba, bagni, spogliatoi	225	200	0,80	0,40
WC ACCESSIBILE	Guardaroba, bagni, spogliatoi	230	200	0,76	0,40
PALESTRA	Palazzetti dello sport, palestre	301	300	0,60	0,60
MENSA	Mense scolastiche	443	200	0,43	0,40
CUCINA	Cucina	511	500	0,70	0,60
LOCALE 91	Laboratorio didattico	533	300	0,62	0,60
ATRIO 131	Atri d'ingresso	320	200	0,57	0,40
ATRIO 107	Atri d'ingresso	240	200	0,67	0,40
ATRIO 128	Atri d'ingresso	310	200	0,41	0,40
DST 114	Area di circolazione, corridoio	247	100	0,44	0,40
LOCALE 130	Sale professori	507	300	0,61	0,60
LOCALE 138	Deposito e magazzini	101	100	0,51	0,40
LOCALE 139	Deposito e magazzini	116	100	0,67	0,40
LOCALE 140	Deposito e magazzini	112	100	0,76	0,40

Tabella 109 – Risultati verifica illuminotecnica

4.5.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dall'intervento di relamping e dalla sua modellazione sul software Edilclima. L'intervento, i cui risultati principali sono raffigurati in Tabella 110, ha permesso di ridurre il consumo di energia elettrica di circa 13.690 kWh, passando dal consumo di 29.011 kWh dello stato di fatto a 15.319 kWh dello stato di progetto. Per il calcolo delle ore di illuminazione annuali sono state prese in considerazione le ipotesi formulate per la caratterizzazione dello stato di fatto. I locali, in seguito al calcolo illuminotecnico, sono stati suddivisi in funzione della loro destinazione d'uso e della zona climatizzata di riferimento.

ZONA	LOCALE	N. LOCALE	SUPERFICIE [m2]	POTENZA [W]	P SPEC [W/m2]	hh/anno	Fcorr	CONSUMO [kWh/anno]
CL	AULA DIDATTICA	17	771	3060	4,0	660	0,9	1818
CL	AULA DIDATTICA	2	114	408	3,6	660	0,9	242
CL	UFFICIO	3	123	612	5,0	660	0,9	364
CL	MENSA	1	338	1440	4,3	330	0,9	428
CL	PALESTRA	1	230	792	3,5	660	0,9	470
CL	AREA COMUNE	10	1.490	2889	1,9	908	0,9	2360
CL	SERVIZI IGIENICI	13	106	515	4,9	908	0,9	421
NR	AULA DIDATTICA	9	404	1620	4,0	82,5	0,9	120
NR	CUCINA	1	43	144	3,3	495	0,9	64
NR	SERVIZI IGIENICI	50	153	970	6,3	82,5	0,9	72
NR	DEPOSITI/SPOGLIATOI	17	315	516	1,6	82,5	0,9	38

Tabella 110 – Risultati consumo post intervento relamping

L'implementazione dello scenario nel modello energetico è stata effettuata al fine di valutarne i benefici dal punto di vista energetico. La modellazione dello stato di progetto ha previsto la sostituzione dei corpi illuminanti asserventi l'illuminazione ordinaria con dei nuovi apparecchi LED. Lo stato di progetto ha generato i risultati espressi dalla Tabella 111.

I consumi di Gas Metano hanno subito una riduzione contenuta, circa il 6,9%, a fronte di un intervento che ha portato all'aumento degli assorbimenti elettrici nell'ordine del 54,2%.

La classe energetica è rimasta la medesima, al netto di una riduzione dell'Indice di Prestazione Energetica del 12,2%. Le emissioni di CO₂ hanno raggiunto la soglia dei $27 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

PARAMETRO	PRE	POST	VARIAZIONE
Metano [Sm3]	18.170	18.170	0%
Elettricità [kWh]	32.358	18513	-43%
EP _{gl,nren} [kWh/m2]	150	142	-6%
CO ₂ [kg/m2/anno]	31	29	-6%

Tabella 111 - Caratterizzazione intervento (Scenario 5)

4.5.3 – ANALISI ECONOMICA

L'analisi è stata condotta prendendo come riferimento i prezzi ricavati dal Prezzario DEI per gli impianti elettrici del 2^a semestre del 2023. Per l'intervento è stato previsto un costo complessivo pari a circa € 28.410,00. Le singole voci di spesa e i parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa sono riportati in Tabella 112 e 113. Gli indicatori economici di riferimento sono riportati in Tabella 114. L'investimento dal punto di vista economico è redditizio: presenta un VAN positivo e un IP superiore a uno; il tempo di rientro scontato si assesta a 9 anni.

	COSTO PER UNITÀ	QUANTITÀ	COSTO COMPLESSIVO
Esse-ci Absent Essential 36W	85,00	216	18.360,00
Esse-ci Absent Essential 60W	155,00	3	465,00
Collina 15W	35,00	114	3.990,00
Collina 20W	35,00	12	420,00
Rimozione	15,00	345	5.175,00

Tabella 112 – Elenco singole voci investimento iniziale (Scenario 5)

Durata del progetto	0,5	anni
Vita utile intervento	20	anni
Costo GM comprato	0,85	€/Sm3
Costo EE comprata	0,20	€/kWh
Tasso di sconto	5	%
Tasso incremento acquisto annuale	0,025	-
Investimento	28.410,00	€

Tabella 113 – Parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa (Scenario 5)

VAN (scontato)	$\sum \text{Benefici att} - \sum \text{Costi att}$	17.001	€
IP - Indice di Profitto (scontato)	$\sum \text{Benefici att} / \sum \text{Costi att}$	1,598	-
PBT - Tempo di ritorno semplice	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	12	anni
dPBT - Tempo di ritorno attualizzato	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	9	anni
TIR - Tasso Interno Rendimento	Valore di r che annulla il VAN (IP=1)	11	%

Tabella 114 – Indicatori economici (Scenario 5)

4.6 – VENTILAZIONE MECCANICA (VMC)

Il sesto ed ultimo intervento prevede la realizzazione di un impianto di ventilazione meccanizzato decentralizzato dedicato al miglioramento della salubrità e del ricambio d'aria in tutte le aule. Questa tipologia di installazione non prevede l'utilizzo di canalizzazioni e può essere installata direttamente sulla parete esterna del locale.

4.6.1 – DIMENSIONAMENTO

Il dimensionamento delle portate di mandata per ogni locale deve essere effettuato rispettando quanto disposto dalla norma UNI 10339. Per ogni aula scolastica, devono essere ricavati:

- S : superficie calpestabile espressa in m^2 .
- V : volume del locale espresso in m^3 .
- n_s : indice di affollamento, che indica quante persone sono presenti per metro quadrato di superficie calpestabile; può essere ricavato dall'appendice A, prospetto VIII della normativa.
- N : numero di persone presenti in un locale, definito come $N = n_s \cdot S$.
- Q_{op} : portata di aria esterna, espressa in $\frac{m^3}{s}$, da adottare in funzione della tipologia edilizia; ricavabile dal prospetto III della normativa.

In Tabella 115 sono riportati i parametri ottenuti per ogni aula oggetto d'intervento.

Locale	Superficie	Altezza	Volume	n_s	N	Q_{op}	Q_{op}	$Q_{mandata}$
-	m^2	m	m^3	pers/ m^2	pers	$m^3/s/pers$	$m^3/h/pers$	m^3/h
Aula 60	44,69	3	134,07	0,45	21	0,005	18	378
Aula 32	45,65	3	136,95	0,45	21	0,005	18	378
Aula 66	46,35	3	139,05	0,45	21	0,005	18	378
Aula 67	43,90	3	131,7	0,45	20	0,005	18	360
Aula 65	47,35	3	142,05	0,45	22	0,005	18	396
Aula 4	46,88	3	140,64	0,45	22	0,005	18	396
Aula 3	46,68	3	140,04	0,45	22	0,005	18	396
Aula 68	44,35	3	133,05	0,45	20	0,005	18	360
Aula 63	44,74	3	134,22	0,45	21	0,005	18	378
Aula 62	46,25	3	138,75	0,45	21	0,005	18	378
Aula 89	45,01	3	135,03	0,45	21	0,005	18	378
Aula 106	44,73	3	134,19	0,45	21	0,005	18	378
Aula 115	43,61	3	130,83	0,45	20	0,005	18	360
Aula 112	44,75	3	134,25	0,45	21	0,005	18	378
Aula 113	44,94	3	134,82	0,45	21	0,005	18	378
Aula 110	44,80	3	134,4	0,45	21	0,005	18	378
Aula 111	46,29	3	138,87	0,45	21	0,005	18	378
Aula 77	44,43	3	133,29	0,45	20	0,005	18	360
Aula 78	44,45	3	133,35	0,45	21	0,005	18	378
Aula 79	45,57	3	136,71	0,45	21	0,005	18	378
Aula 90	45,03	3	135,09	0,45	21	0,005	18	378
Aula 103	42,49	3	127,47	0,45	20	0,005	18	360
Aula 104	43,82	3	131,46	0,45	20	0,005	18	360
Aula 108	44,52	3	133,56	0,45	21	0,005	18	378
Aula 109	46,85	3	140,55	0,45	22	0,005	18	396
Aula 116	46,37	3	139,11	0,45	21	0,005	18	378

Tabella 115 – Dimensionamento della portata d'aria per ogni aula

Per le scuole elementari il sistema di filtraggio deve appartenere ad una classe compresa tra 7 e 9. In Tabella 116 viene raffigurato il prospetto V della normativa indicante l'efficienza di filtrazione in funzione della classe di riferimento.

Classe	Efficienza del filtro E	Campo di efficienza %	Metodo di prova
1	M	$E < 65$	ponderale
2	M	$65 \leq E < 80$	ponderale
3	M	$80 \leq E < 90$	ponderale
4	M	$90 \leq E$	ponderale
5	A	$40 \leq E < 60$	atmosferico
6	A	$60 \leq E < 80$	atmosferico
7	A	$80 \leq E < 90$	atmosferico
8	A	$90 \leq E < 95$	atmosferico
9	A	$95 \leq E$	atmosferico
10	AS	$95 \leq E < 99,9$	fiamma sodio
11	AS	$99,9 \leq E < 99,97$	fiamma sodio
12	AS	$99,97 \leq E < 99,99$	fiamma sodio
13	AS	$99,99 \leq E < 99,999$	fiamma sodio
14	AS	$99,999 \leq E$	fiamma sodio

M = media efficienza
A = alta efficienza
AS = altissima efficienza e filtri assoluti

Tabella 46 – Prospetto V UNI 10339 – Efficienza di filtrazione

Il componente selezionato, raffigurato in Figura 81, è il modello HRC+ 60 H/HV di Innova: ogni unità è dotata di un recuperatore di calore a flussi incrociati controcorrente in polipropilene ad alta efficienza, ventilatori con comando modulante e sistema di filtraggio ePM1 70%. È possibile installare una resistenza elettrica per il trattamento dell'aria in funzione della temperatura esterna. In Tabella 117 sono riportate le principali caratteristiche estrapolate dalla scheda tecnica dell'unità.

Tipo di Ventilatori	Ventilatori centrifughi pale avanti
Numero Ventilatori	2+1
Regolazione portata aria	3 velocità
Portata aria	620/355/165 m ³ /h
Tipo di Scambiatori	Piastre controcorrente – polipropilene
Numero Scambiatori	2
Eff.recupero EN 13141-7	86,1%
Eff. recupero EN 305	91,8%
Filtro	ePM1 70
Pmax	340 W
Pmax + resistenza	1,340 kW

Tabella 117 – Scheda tecnica VMC HRC+ 60 H/HV Innova



Figura 81 – VMC HRC+ 60 H/HV
(Fonte: Innova)

4.6.2 – MODELLO ENERGETICO DELLO SCENARIO

L'implementazione dello scenario nel modello energetico è stata effettuata al fine di valutarne i benefici dal punto di vista energetico. La modellazione dello stato di progetto ha previsto l'installazione di unità di ventilazione meccanica decentralizzate nelle aule della scuola. Lo stato di progetto ha generato i risultati espressi dalla Tabella 118.

I consumi di Gas Metano hanno subito una riduzione contenuta, circa il 6,9%, a fronte di un intervento che ha portato all'aumento degli assorbimenti elettrici nell'ordine del 54,2%.

La classe energetica è rimasta la medesima, al netto di una riduzione dell'Indice di Prestazione Energetica del 12,2%. Le emissioni di CO₂ hanno raggiunto la soglia dei $27 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

PARAMETRO	PRE	POST	VARIAZIONE
Metano [Sm3]	18.170	16.908	-6,9%
Elettricità [kWh]	32.358	49.896	54,2%
EP _{gl,nren} [kWh/m ²]	150,49	132,09	-12,2%
CO ₂ [kg/m ² /anno]	31	27	-12,9%

Tabella 118 - Caratterizzazione intervento (Scenario 6)

4.6.3 – ANALISI ECONOMICA

L'analisi è stata condotta prendendo come riferimento l'offerta fornita dalla casa produttrice Innova. Per l'intervento è stato previsto un costo complessivo pari a circa € 145.444,00. Le singole voci di spesa e i parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa sono riportati in Tabella 119 e 120. Gli indicatori economici di riferimento sono riportati in Tabella 121. L'investimento dal punto di vista economico, considerando i flussi di cassa scontati, risulta non redditizio: il VAN è negativo e prevede un rientro nel tempo utile di vita trascurabile. Tale tendenza è confermata dall'IP che si assesta su un valore prossimo allo zero; il tempo di rientro, scontato e non, supera i 20 anni.

	COSTO PER UNITÀ	QUANTITÀ	COSTO COMPLESSIVO
INNOVA HRC+ 120 H/HV	4.800,00	26	124.800,00
COMANDO A FILO + SONDA CO2	144,00	26	3.744,00
AVVIAMENTO VMC	150,00	26	3.900,00
MANODOPERA	500,00	26	13.000,00

Tabella 119 – Elenco singole voci investimento iniziale (Scenario 6)

Durata del progetto	0,5	anni
Vita utile intervento	20	anni
Costo GM comprato	0,85	€/Sm ³
Costo EE comprata	0,20	€/kWh
Tasso di sconto	5	%
Tasso incremento acquisto annuale	0,025	-
Investimento	145.444,00	€

Tabella 120 – Parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa (Scenario 6)

VAN (scontato)	$\sum \text{Benefici att} - \sum \text{Costi att}$	-144.215	€
IP - Indice di Profitto (scontato)	$\frac{\sum \text{Benefici att}}{\sum \text{Costi att}}$	0,008	-
PBT - Tempo di ritorno semplice	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	> 20	anni
dPBT - Tempo di ritorno attualizzato	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	> 20	anni
TIR - Tasso Interno Rendimento	Valore di r che annulla il VAN (IP=1)	-25	%

Tabella 121 – Indicatori economici (Scenario 6)

4.7 – SCENARIO COMPLESSIVO

Nel presente paragrafo viene proposto lo scenario complessivo tra quelli esaminati. Il progetto, come già specificato, prevede la realizzazione di tutti gli interventi qui proposti con l'obiettivo minimo dell'aumento di una classe energetica e della riduzione del 20% delle emissioni di CO₂.

- GAS METANO:

Per quanto concerne il vettore Gas Metano, si è ottenuta una riduzione dei consumi di circa il 30%. Questo risultato è frutto della riduzione delle perdite dovute a trasmissione e ventilazione, nonché alla riduzione della potenza nominale e al miglioramento dell'efficienza del sistema di generazione destinato al riscaldamento. In Tabella 122 sono proposti i risultati complessivi.

VEETTORE	SERVIZIO	PRE	POST	VARIAZIONE
Metano [Sm ³]	Riscaldamento	18.170	12.729	-30%
	ACS	0	0	0%
	Ventilazione	0	0	0%
	Illuminazione	0	0	0%
	Trasporto	0	0	0%
	Globale	18.170	12.729	-30%

Tabella 522 – Consumi di Gas Metano nello scenario complessivo

- ENERGIA ELETTRICA:

Per quanto riguarda il vettore energia elettrica, al netto dell'installazione ex-novo dell'impianto di ventilazione forzata e delle pompe di calore, si è ottenuta una riduzione dei consumi complessiva del 54,3%. Questo risultato è legato ad una notevole riduzione dei consumi ottenuta attraverso il rifacimento dell'illuminazione ordinaria e l'installazione di un sistema di generazione fotovoltaico. In Tabella 123 sono proposti i risultati complessivi.

VEETTORE	SERVIZIO	PRE		POST		VARIAZIONE
Elettricità [kWh]	Riscaldamento	1.842	6%	6.552	44%	256%
	ACS	0	0%	2.829	19%	100%
	Ventilazione	0	0%	1.309	9%	100%
	Illuminazione	29.010	90%	3.745	25%	-87%
	Trasporto	1.505	5%	341	2%	-77%
	Globale	32.357	100%	14.776	100%	-54%

Tabella 123 – Consumi di energia elettrica nello scenario complessivo

Viene proposto il confronto tra la disaggregazione dei consumi di energia elettrica dello stato di fatto e dello stato di progetto, rispettivamente in Figura 82 e 83. È osservabile come, nonostante la riduzione dei consumi complessivi, si sia ottenuto un miglioramento della quantità e della qualità dei servizi offerti dalla scuola.

Disaggregazione energia elettrica PRE

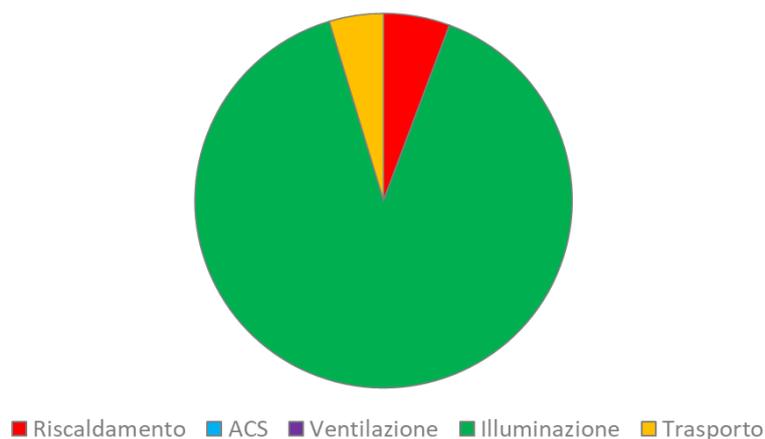


Figura 82 – Disaggregazione consumi di energia elettrica (PRE)

Disaggregazione energia elettrica POST

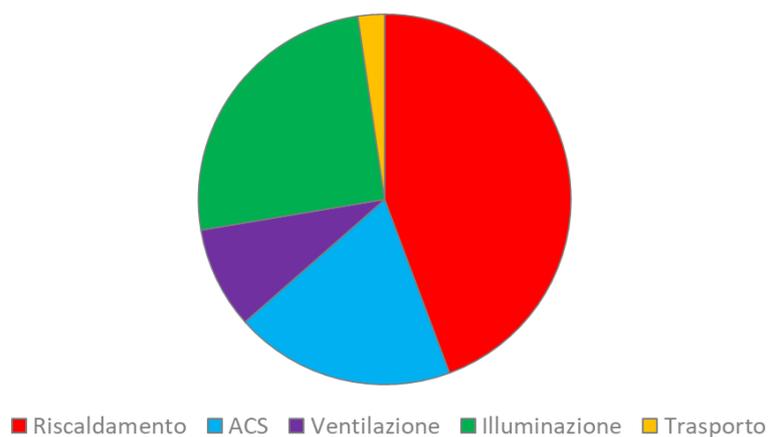


Figura 83 – Disaggregazione consumi di energia elettrica (POST)

• CLASSE ENERGETICA – EMISSIONI DI CO₂:

Il risultato del progetto evidenzia un miglioramento, in merito alla classe energetica e alle emissioni di CO₂, maggiore di quanto preventivato. In dettaglio:

- lo stato di fatto è stato definito come classe E con un indice $EP_{gl,nren}$ pari a $150,49 \frac{kWh}{m^2}$;
- lo stato di progetto è stato definito come classe C con un indice $EP_{gl,nren}$ pari a $87,48 \frac{kWh}{m^2}$;
- lo stato di fatto presenta un quantitativo di emissioni di CO₂ pari a $31 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$;
- lo stato di progetto presenta un quantitativo di emissioni di CO₂ pari a $18 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

I risultati completi sono riportati in Tabella 124; in Figura 84 è raffigurato l'attestato di prestazione energetica post interventi migliorativi.

PARAMETRO	PRE	POST	VARIAZIONE
Classe energetica	E	C	2 classi
EPgI,nren [kWh/m ²]	150,49	87,48	-42%
CO ₂ [kg/m ² /anno]	31	18	-42%

Tabella 124 – Variazione classe energetica ed emissioni CO₂ nello scenario complessivo



ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

CODICE IDENTIFICATIVO: VALIDO FINO AL: 03/04/2034



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="H501"/>	Sezione	<input type="text"/>	Foglio	<input type="text"/>	Particella	<input type="text"/>
Subalterni	da <input type="text"/> a <input type="text"/>						
Altri subalterni	<input type="text"/>						

Servizi energetici presenti

Climatizzazione invernale

Ventilazione meccanica

Illuminazione

Climatizzazione estiva

Prod. acqua calda sanitaria

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

C

87,48 kWh/m²anno

EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO

— Meno efficiente

Riferimenti

Gli immobili simili avrebbero in media la seguente classificazione:

Se nuovi:

A2 (41,98)

Se esistenti:

[Barra vuota]

Figura 1 Attestato di Prestazione Energetica (POST)

5 – APPROFONDIMENTO SUL SOLARE FOTOVOLTAICO

Il seguente approfondimento ha per oggetto l'installazione dell'impianto fotovoltaico con potenza di picco pari a 19,8 kWp analizzato nel capitolo precedente. Lo scenario ha fornito la percentuale di copertura del fabbisogno elettrico garantita dall'impianto fotovoltaico e la relativa analisi economica tenendo in considerazione i valori cumulati mensili di consumo dalla rete, autoconsumo e immissione in rete. Questo approccio, non in grado di fornire i risultati con il livello di precisione e realismo desiderati, è stato reso necessario dalla mancata ricezione dei dati di consumo orari della scuola. Il profilo orario di consumo, legato in particolar modo ai valori di autoconsumo conseguito attraverso la generazione fotovoltaica, assume particolare rilievo per ottenere stime energetiche ed economiche più interessanti.

5.1 – ANALISI CONSUMI E PRODUZIONE ISTITUTO SOCIALE

Per definire un modello di consumo orario adeguato si è deciso di misurare, per una giornata tipo di maggio, i valori di potenza istantanea con cadenza quartoraria, prendendo come riferimento una scuola di Torino. L'edificio scolastico scelto è l'Istituto Sociale, situato in Corso Siracusa n. 10. In Figura 85 e 86 sono mostrate, rispettivamente, la vista dall'altro dell'edificio ricavata da Google Earth e il posizionamento dei pannelli fotovoltaici sulla copertura dell'edificio principale.



Figura 85 – Visione aerea Istituto Sociale (Fonte: Google Earth)



Figura 86 – Posizionamento pannelli fotovoltaici Istituto Sociale

Per definire la potenza complessiva consumata, sono stati considerati, in aggiunta alla potenza letta dal contatore, anche i valori di potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico installato in copertura. Partendo dalle misurazioni effettuate si è poi costruito il profilo giornaliero, con cadenza quartoraria, di consumo e di produzione fotovoltaica.

Il profilo giornaliero della potenza assorbita è stato costruito attraverso le seguenti assunzioni:

- Dalle ore 00:00 alle ore 6:45 la scuola è stata ipotizzata chiusa. La potenza è stata assunta costante e pari al 65% del valore registrato nel tardo pomeriggio, al termine di tutte le lezioni.
- Dalle ore 7:00 alle ore 7:30 è stata ipotizzata l'attività di pre-scuola. La potenza è stata definita identica alla misurazione effettuata alle ore 7:45 (anch'essa ipotizzata come pre-scuola).
- Dalle ore 7:45 alle ore 17:15 le misurazioni sono state prese direttamente dal contatore.
- Dalle ore 17:30 alle ore 20:00 è stata assunta la presenza di attività extra-scolastiche. La potenza è stata definita pari alla media delle ultime 5 misurazioni pomeridiane.
- Dalle ore 20:15 alle ore 23:45 la scuola è stata ipotizzata chiusa. La potenza è stata assunta costante e pari al 65% del valore registrato nel tardo pomeriggio, al termine di tutte le lezioni.

Il profilo giornaliero della potenza fotovoltaica è stato costruito attraverso le seguenti assunzioni:

- Dalle ore 00:00 alle ore 6:15 il generatore fotovoltaico è stato assunto non produttivo.
- Dalle ore 6:30 alle ore 7:30 i valori sono stati approssimati rispettando la pendenza crescente della curva precedentemente costruita dalle misurazioni effettuate sul posto.
- Dalle ore 7:45 alle ore 17:15 le misurazioni sono state prese direttamente dagli inverter.
- Dalle ore 17:30 alle ore 19:30 i valori sono stati approssimati rispettando la pendenza decrescente della curva precedentemente costruita dalle misurazioni effettuate sul posto.
- Dalle ore 19:45 alle ore 23:45 il generatore fotovoltaico è stato assunto non produttivo.

In Figura 87 viene riportato il profilo di potenza di una giornata tipo di maggio.

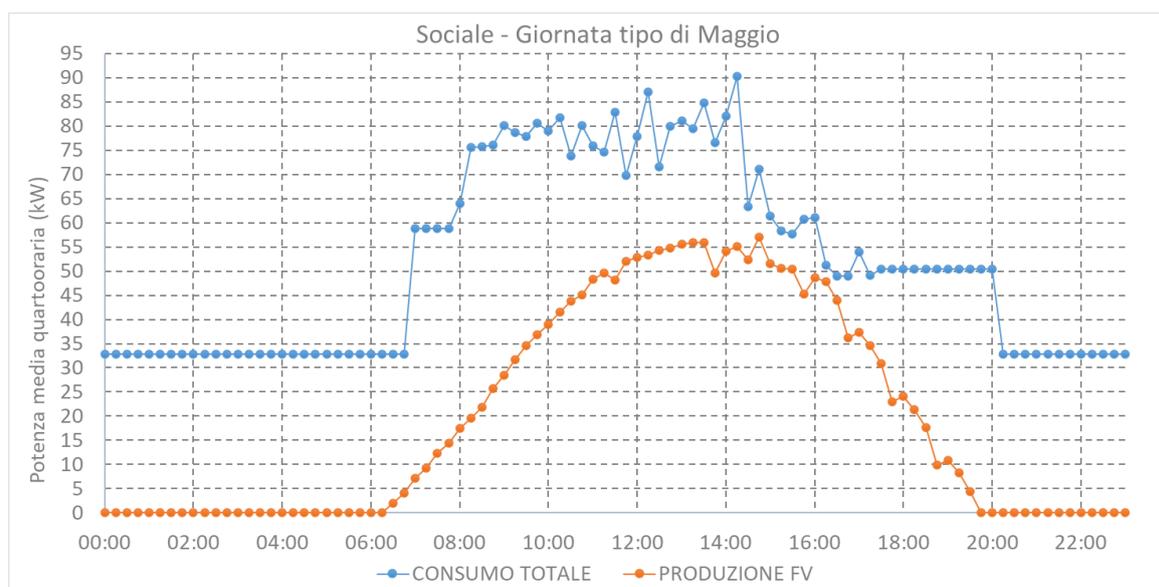


Figura 87 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Maggio - Istituto Sociale

Integrando i valori istantanei di potenza si è ricavata l'energia consumata e prodotta dall'impianto, e conseguentemente, la frazione di autoconsumo e di immissione in rete. Per l'integrazione si è proceduto utilizzando sia la regola del rettangolo che quella del trapezio.

La regola del rettangolo, detta anche del punto medio, è in grado di approssimare, attraverso un procedimento relativamente semplice, un integrale definito nella forma: $\int_a^b f(x) dx$.

L'espressione finale ottenuta approssima l'integrale con un rettangolo avente base $(b - a)$ e altezza $f(c)$, dove a e b sono gli estremi e c è il punto medio.

$$I = (b - a) f(c) = (b - a) f\left(\frac{a + b}{2}\right)$$

La regola del trapezio, detta anche di Stevino, è in grado di approssimare, con precisione maggiore rispetto al metodo precedente, un integrale definito nella forma: $\int_a^b f(x) dx$.

L'espressione finale ottenuta approssima l'integrale con l'area del trapezio indicato in Figura 88, avente vertici $(a, f(a))$, $(b, f(b))$, $(b, 0)$, $(a, 0)$.

$$I = (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

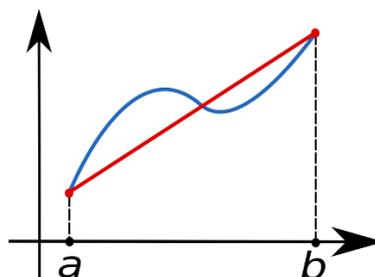


Figura 88 – Rappresentazione grafica regola del trapezio

In Tabella 125 sono riportati i valori di energia acquistata e prodotta, con i relativi valori di autoconsumo, immissione in rete e percentuale di copertura.

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	28.312	22.505
CONSUMO DA RETE	kWh	17.499	11.581
PRODUZIONE FV	kWh	14.575	14.724
AUTOCONSUMO	kWh	10.813	10.924
VENDITA	kWh	3.761	3.800
COPERTURA FV	-	38%	49%

Tabella 625 - Energia consumata e prodotta - Maggio - Istituto Sociale

5.2 – ANALISI ISTITUTO MORVILLO (RIFERIMENTO SOCIALE)

Ricavato il profilo giornaliero di potenza e calcolati i valori di energia consumata e prodotta della scuola di riferimento si è provveduto a realizzare la medesima analisi per l'istituto oggetto d'intervento. L'analisi è stata condotta tenendo in considerazione prima i consumi dello stato di fatto e successivamente quelli dello stato di progetto.

Per quanto concerne il profilo giornaliero di potenza, i valori di consumo e produzione sono stati approssimati mediante l'utilizzo di due fattori correttivi. Il primo sarà funzione dei consumi dell'istituto Morvillo e varierà tra lo stato di fatto e quello di progetto; il secondo fattore è funzione dell'impianto dimensionato e sarà assunto costante.

I due fattori sono stati calcolati come segue:

- Il fattore correttivo legato al consumo è stato ricavato dal rapporto tra l'energia consumata giornalmente nell'istituto Morvillo e quella consumata nell'istituto Sociale. Il primo valore è stato calcolato dividendo il fabbisogno medio nel mese di maggio per il numero dei giorni di attività scolastica; il secondo è stato ricavato dall'integrazione della potenza consumata in un singolo giorno.
- Il fattore correttivo per la produzione fotovoltaica è stato ricavato dal rapporto tra il valore stimato dell'energia giornaliera prodotta della scuola Morvillo e l'energia giornaliera misurata dell'istituto Sociale. In dettaglio, il primo valore è stato calcolato dividendo la produzione mensile nel mese di maggio ricavata da PVGIS per il numero di giorni del mese; il secondo è stato ricavato dall'integrazione della potenza prodotta in un singolo giorno.

In Figura 89 è riportato il profilo di potenza dello stato di fatto della scuola Morvillo; in Tabella 126 sono riportati i valori di energia acquistata e prodotta, con i relativi valori di autoconsumo, immissione in rete e percentuale di copertura.

Rispetto all'analisi effettuata per il mese di maggio nel capitolo precedente, è possibile osservare (mantenendo costante il fabbisogno energetico dell'edificio e la quantità assorbita dalla rete) come il valore di autoconsumo sia decisamente inferiore a quanto atteso e che di riflesso la percentuale di copertura sia inferiore all'unità. Questa prima indicazione ci permette di comprendere come questa analisi consenta di ottenere un quadro generale più pessimistico ma maggiormente verosimile.

In Figura 90 è riportato il profilo di potenza dello stato di progetto della scuola Morvillo; in Tabella 127 sono riportati i valori di energia acquistata e prodotta, con i relativi valori di autoconsumo, immissione in rete e percentuale di copertura.

Dal secondo gruppo di risultati è possibile osservare come gli interventi migliorativi, riducendo i consumi di energia elettrica, abbiano favorito la capacità di copertura dell'impianto fotovoltaico.

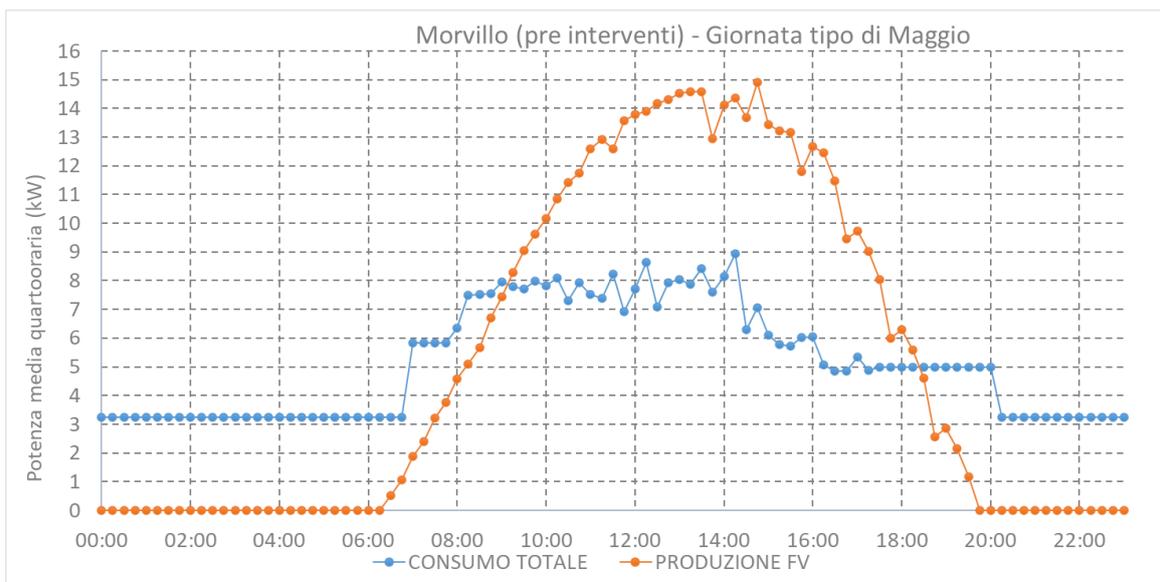


Figura 89 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Maggio - Istituto Morvillo (PRE)

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	2.807	2.833
CONSUMO DA RETE	kWh	981	989
PRODUZIONE FV	kWh	3.804	3.842
AUTOCONSUMO	kWh	1.826	1.844
VENDITA	kWh	1.978	1.999
COPERTURA FV	-	65%	65%

Tabella 726 - Energia consumata e prodotta - Maggio - Istituto Morvillo (PRE)

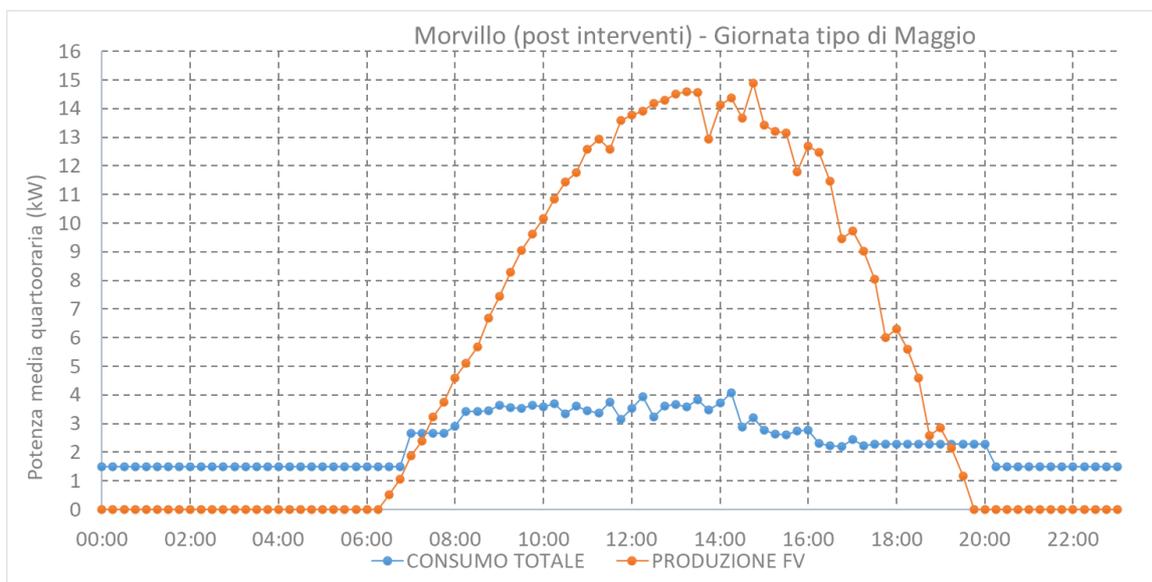


Figura 90 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Maggio - Istituto Morvillo (POST)

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	1.282	1.294
CONSUMO DA RETE	kWh	364	1.557
PRODUZIONE FV	kWh	3.804	3.842
AUTOCONSUMO	kWh	918	943
VENDITA	kWh	2.885	2.899
COPERTURA FV	-	72%	73%

Tabella 827 - Energia consumata e prodotta - Maggio - Istituto Morvillo (POST)

5.3 – ANALISI ISTITUTO MORVILLO (RIFERIMENTO PVGIS)

Nel paragrafo precedente, i profili di potenza, nonché i valori di generazione elettrica garantiti dall'impianto fotovoltaico sono stati costruiti utilizzando come base i valori misurati presso la scuola di riferimento. L'analisi della generazione fotovoltaica, può essere ulteriormente affinata utilizzando i profili di potenza ricavabili dal tool online PVGIS per tenere in considerazione la localizzazione dell'edificio, l'inclinazione dei pannelli, la loro direzione e le perdite di sistema.

Per l'analisi è stata calcolata la potenza istantanea media oraria. Il calcolo è stato effettuato utilizzando il database mensile di radiazione solare SARAH2 per moduli in silicio cristallino. L'impianto è stato dimensionato per una potenza di picco di 19,8 kW_p con perdite di sistema nell'ordine del 14%. L'angolo di tilt e quello azimutale sono assunti costanti a 30° e 0° (Sud).

Questo procedimento ha permesso di sviluppare un profilo orario di una giornata tipo di ogni mensilità e i parametri di generazione elettrica, autoconsumo, vendita in rete e copertura del fabbisogno relativi a ciascuna di esse. I valori saranno poi confrontati, come nel paragrafo precedente, con i consumi costruiti a partire da quelli misurati nella scuola di riferimento.

In Figura 91 ÷ 102 sono riportati i profili di potenza di una giornata tipo di ciascuna mensilità dello stato di fatto della scuola Morvillo; in Tabella 128 ÷ 139 sono riportati i corrispondenti valori di energia acquistata e prodotta, con i relativi valori di autoconsumo, immissione in rete e percentuale di copertura.

Considerando l'analisi relativa al mese di maggio del paragrafo precedente, si è evidenziata un'ulteriore riduzione delle percentuali di autoconsumo, indice di un grado di precisione ancora superiore. Questo si traduce rispetto ai risultati ottenuti dall'analisi mensile iniziale, in un peggioramento evidente della percentuale di copertura dell'impianto su ogni mensilità analizzata.

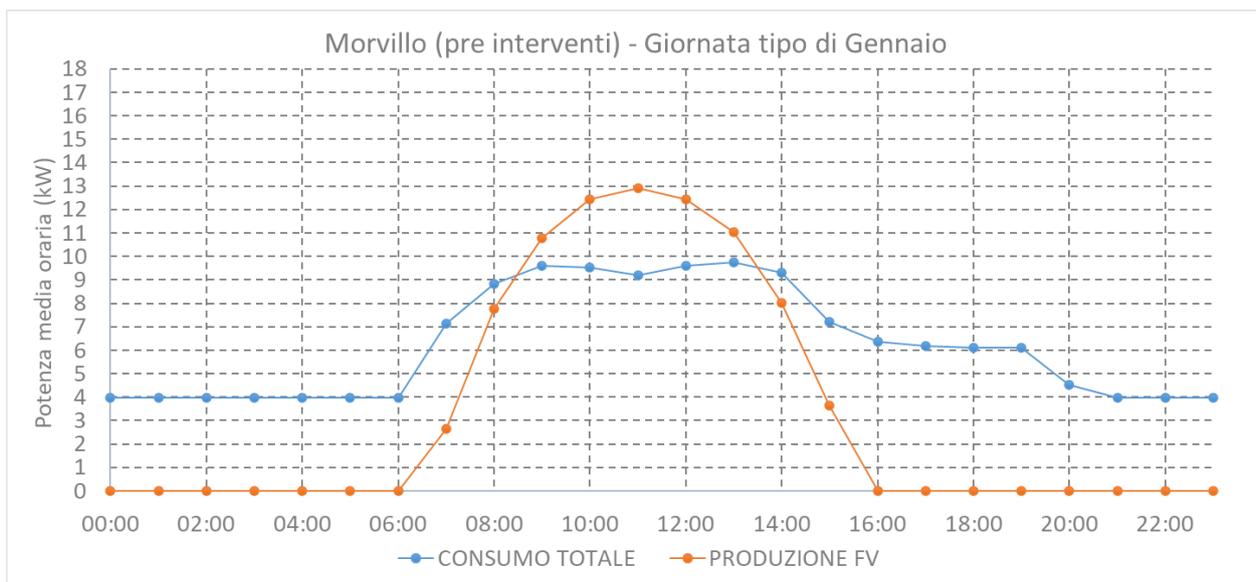


Figura 91 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Gennaio - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	3.732	3.682
CONSUMO DA RETE	kWh	1.987	1.908
PRODUZIONE FV	kWh	2.449	2.449
AUTOCONSUMO	kWh	1.745	1.774
VENDITA	kWh	705	675
COPERTURA FV	-	47%	48%

Tabella 928 - Energia consumata e prodotta - Gennaio - Istituto Morvillo

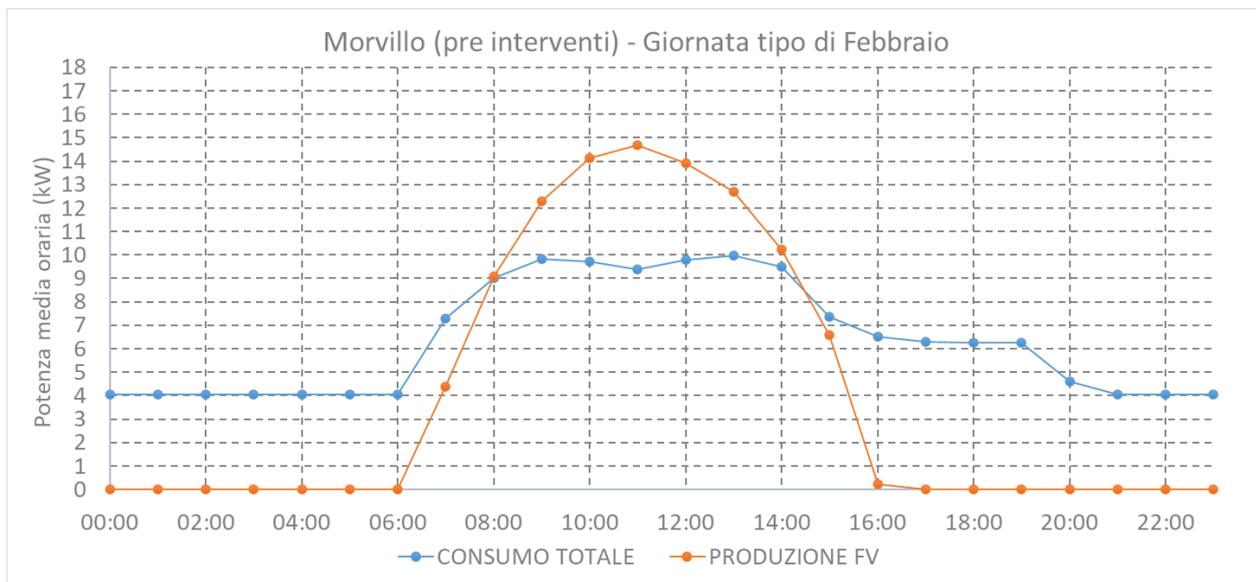


Figura 92 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Febbraio - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	3.809	3.758
CONSUMO DA RETE	kWh	1.850	1.789
PRODUZIONE FV	kWh	2.947	2.947
AUTOCONSUMO	kWh	1.959	1.970
VENDITA	kWh	987	977
COPERTURA FV	-	51%	52%

Tabella 1029 - Energia consumata e prodotta - Febbraio - Istituto Morvillo

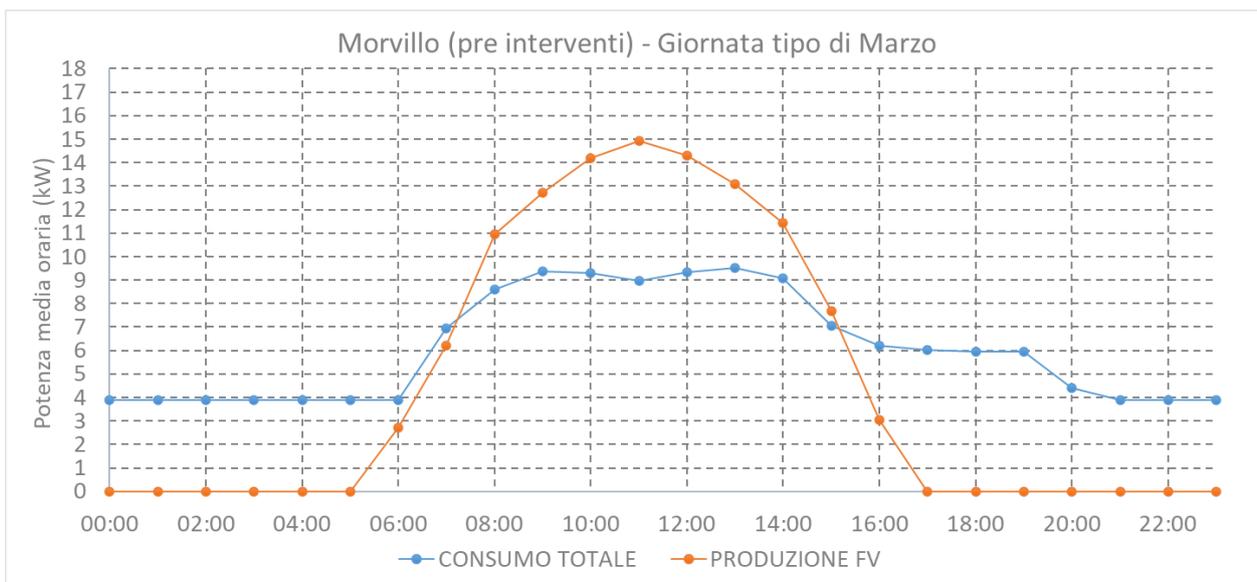


Figura 93 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Marzo - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	3.637	3.589
CONSUMO DA RETE	kWh	1.558	1.492
PRODUZIONE FV	kWh	3.339	3.339
AUTOCONSUMO	kWh	2.079	2.096
VENDITA	kWh	1.260	1.242
COPERTURA FV	-	57%	58%

Tabella 1130 - Energia consumata e prodotta - Marzo - Istituto Morvillo

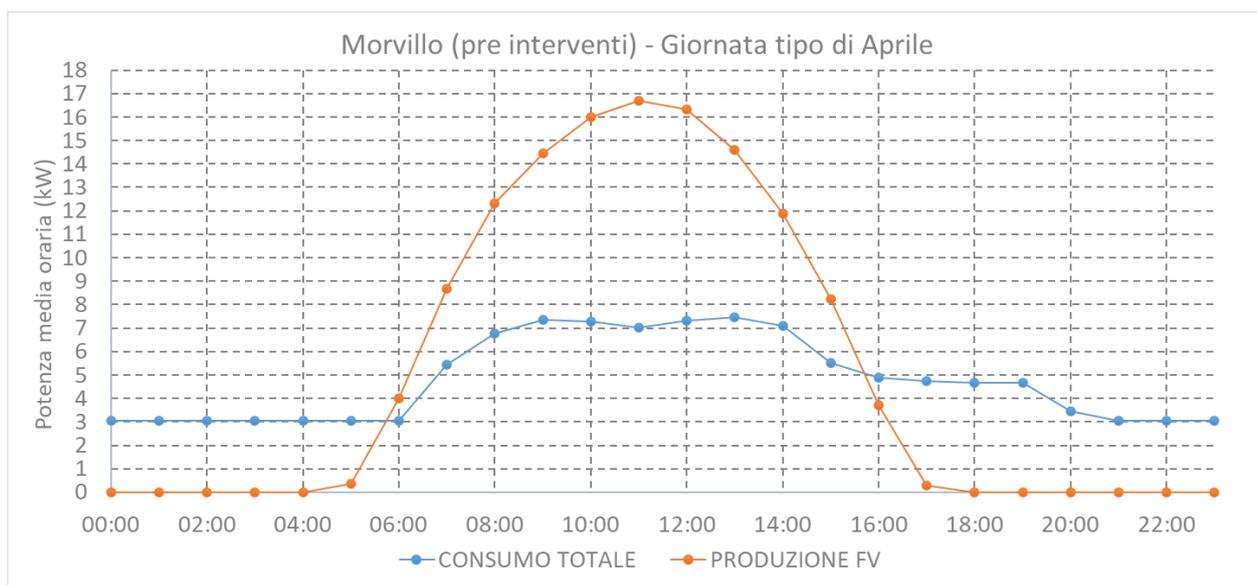


Figura 94 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Aprile - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	2.281	2.251
CONSUMO DA RETE	kWh	907	855
PRODUZIONE FV	kWh	3.828	3.828
AUTOCONSUMO	kWh	1.374	1.396
VENDITA	kWh	2.454	2.432
COPERTURA FV	-	60%	62%

Tabella 1231 - Energia consumata e prodotta - Aprile - Istituto Morvillo

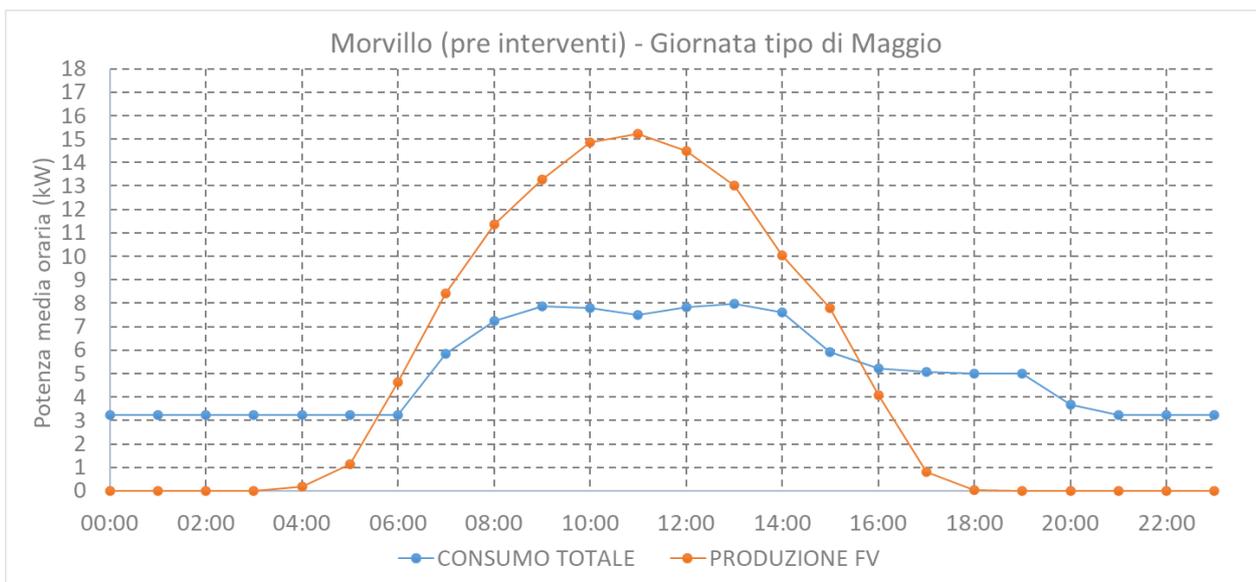


Figura 95 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Maggio - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	2.807	2.770
CONSUMO DA RETE	kWh	1.080	1.013
PRODUZIONE FV	kWh	3.584	3.584
AUTOCONSUMO	kWh	1.727	1.756
VENDITA	kWh	1.856	1.827
COPERTURA FV	-	62%	63%

Tabella 1332 - Energia consumata e prodotta - Maggio - Istituto Morvillo

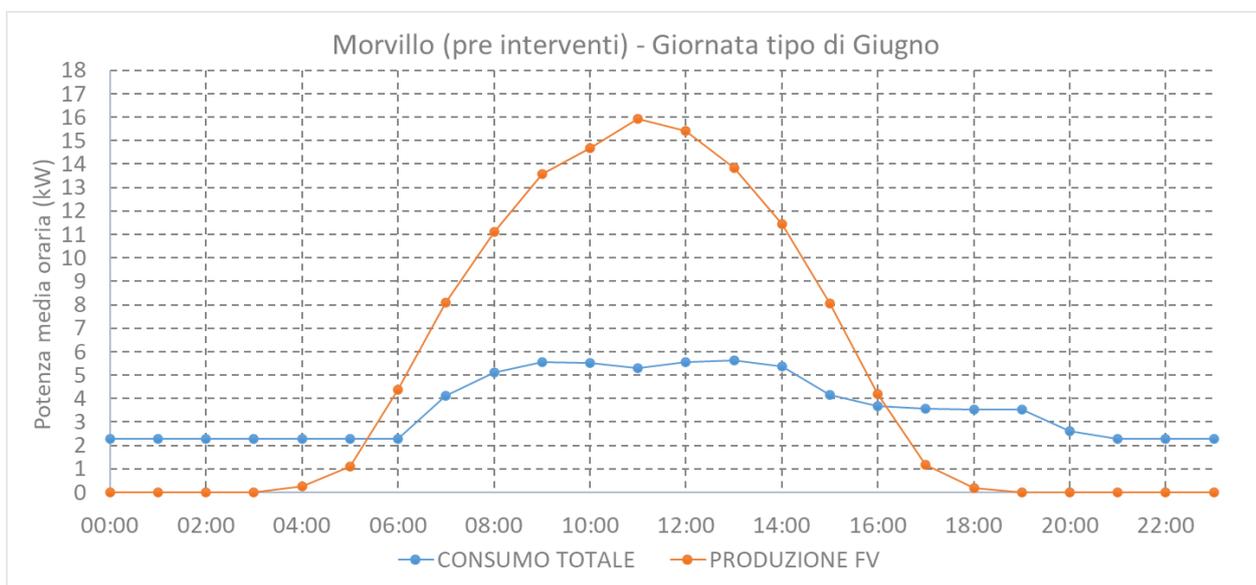


Figura 96 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Giugno - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	1.553	1.532
CONSUMO DA RETE	kWh	562	526
PRODUZIONE FV	kWh	3.703	3.703
AUTOCONSUMO	kWh	991	1.007
VENDITA	kWh	2.712	2.696
COPERTURA FV	-	64%	66%

Tabella 1433 - Energia consumata e prodotta - Giugno - Istituto Morvillo

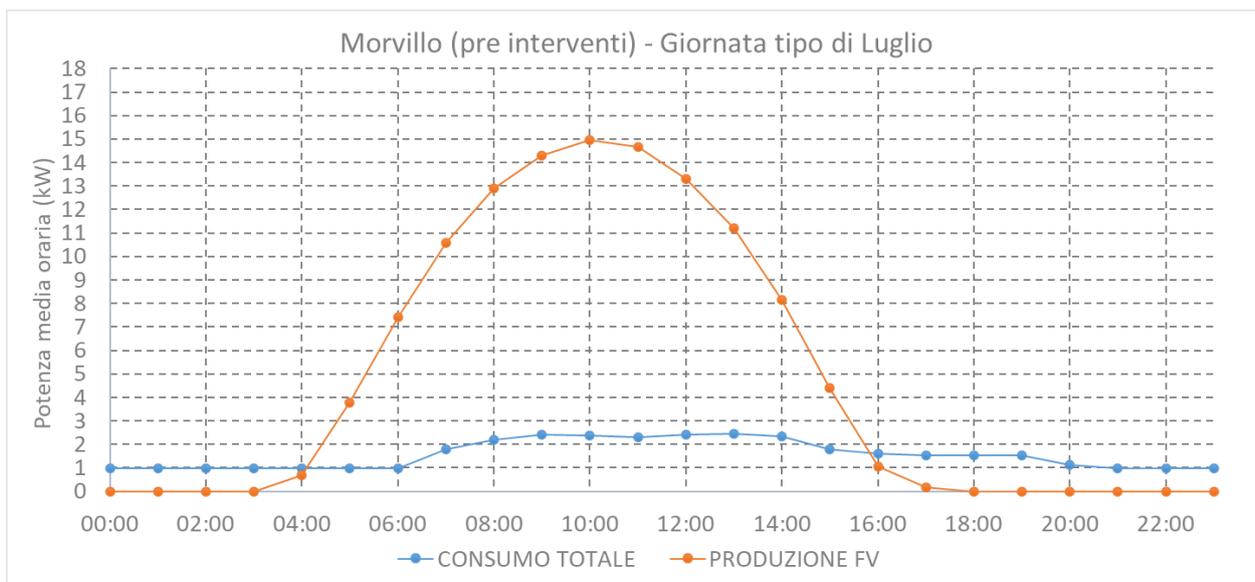


Figura 97 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Luglio - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	747	737
CONSUMO DA RETE	kWh	268	249
PRODUZIONE FV	kWh	3.527	3.527
AUTOCONSUMO	kWh	479	488
VENDITA	kWh	3.048	3.040
COPERTURA FV	-	64%	66%

Tabella 1534 - Energia consumata e prodotta - Luglio - Istituto Morvillo

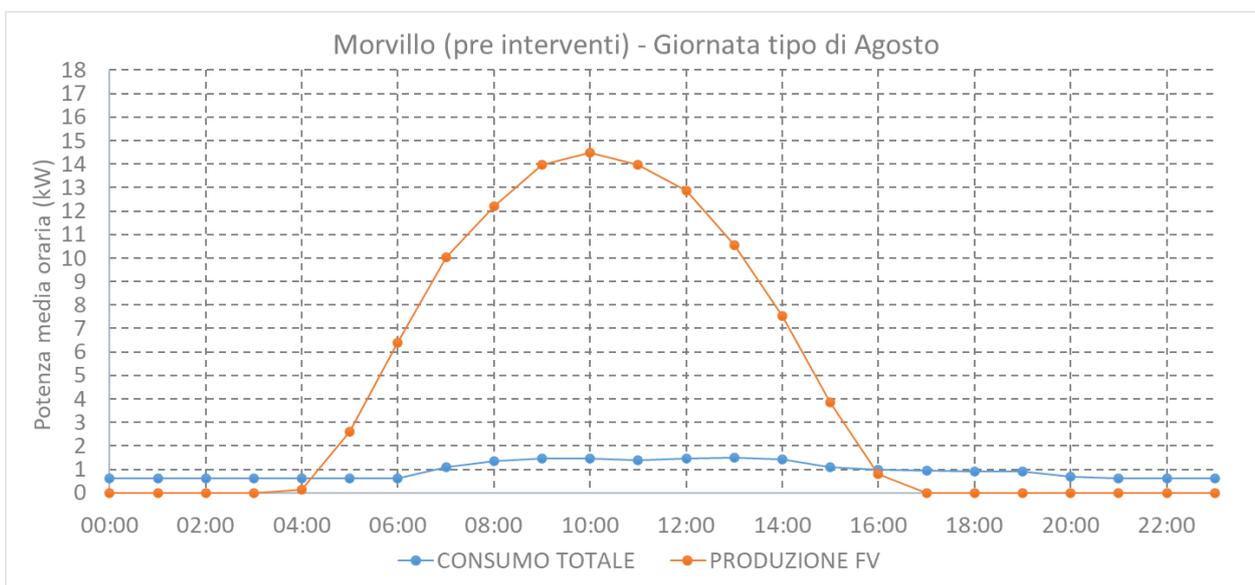


Figura 98 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Agosto - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	453	447
CONSUMO DA RETE	kWh	167	155
PRODUZIONE FV	kWh	3.280	3.280
AUTOCONSUMO	kWh	286	292
VENDITA	kWh	2.994	2.988
COPERTURA FV	-	63%	65%

Tabella 1635 - Energia consumata e prodotta - Agosto - Istituto Morvillo

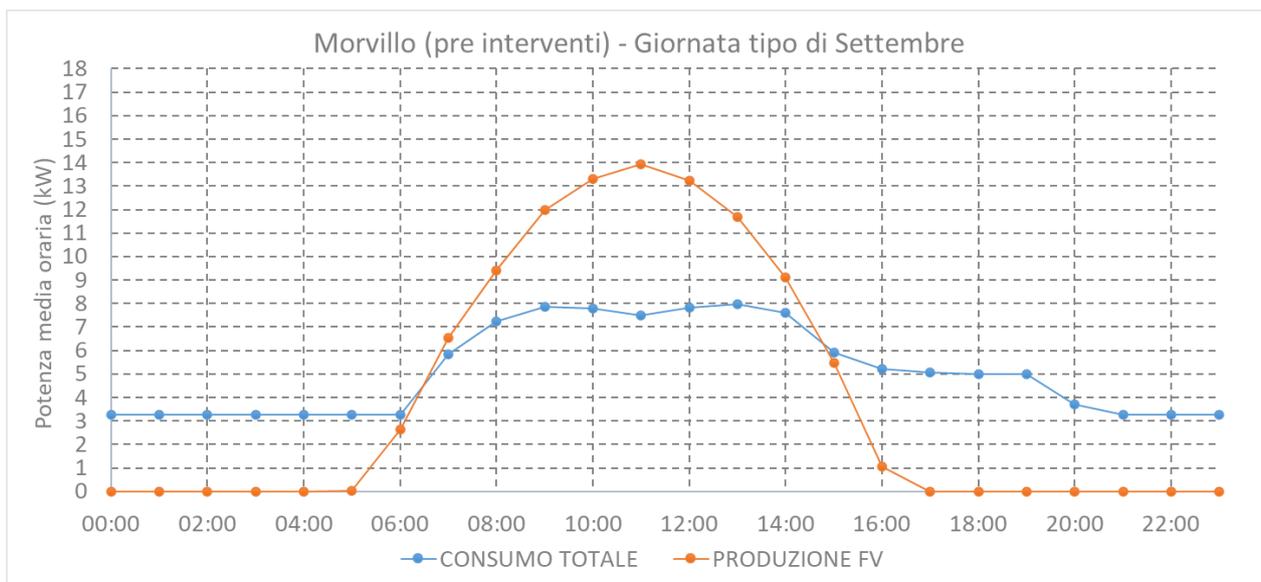


Figura 99 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Settembre - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	2.196	2.167
CONSUMO DA RETE	kWh	957	918
PRODUZIONE FV	kWh	2.951	2.951
AUTOCONSUMO	kWh	1.239	1.248
VENDITA	kWh	1.712	1.702
COPERTURA FV	-	56%	58%

Tabella 1736 - Energia consumata e prodotta - Settembre - Istituto Morvillo

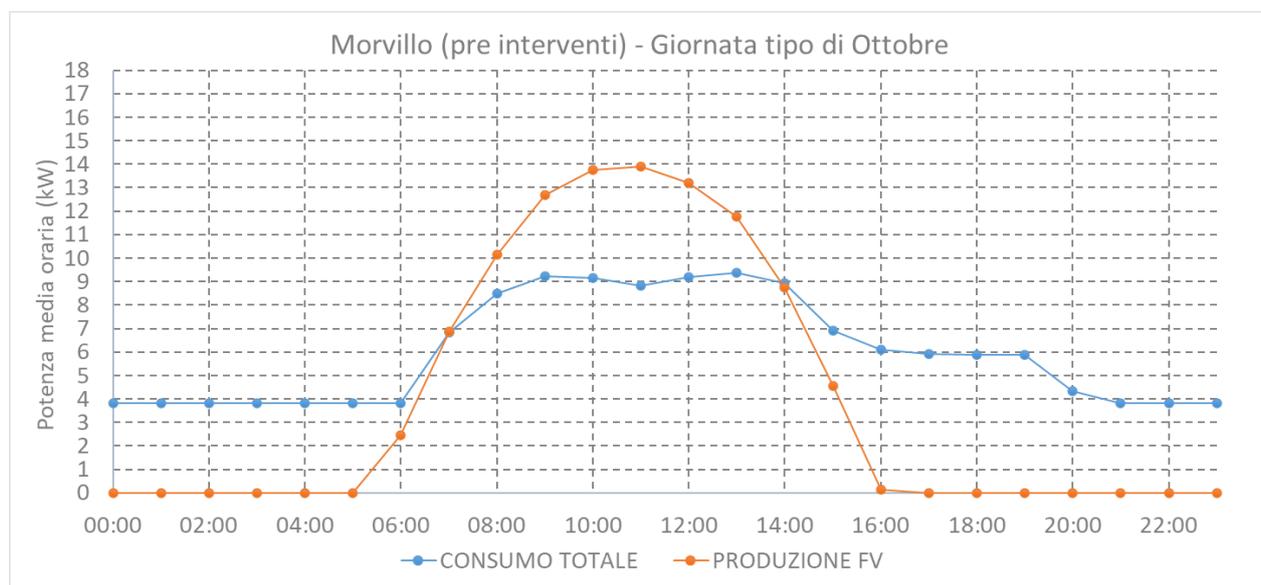


Figura 100 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Ottobre - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	3.578	3.530
CONSUMO DA RETE	kWh	1.654	1.604
PRODUZIONE FV	kWh	2.946	2.946
AUTOCONSUMO	kWh	1.924	1.926
VENDITA	kWh	1.022	1.020
COPERTURA FV	-	54%	55%

Tabella 1837 - Energia consumata e prodotta - Ottobre - Istituto Morvillo

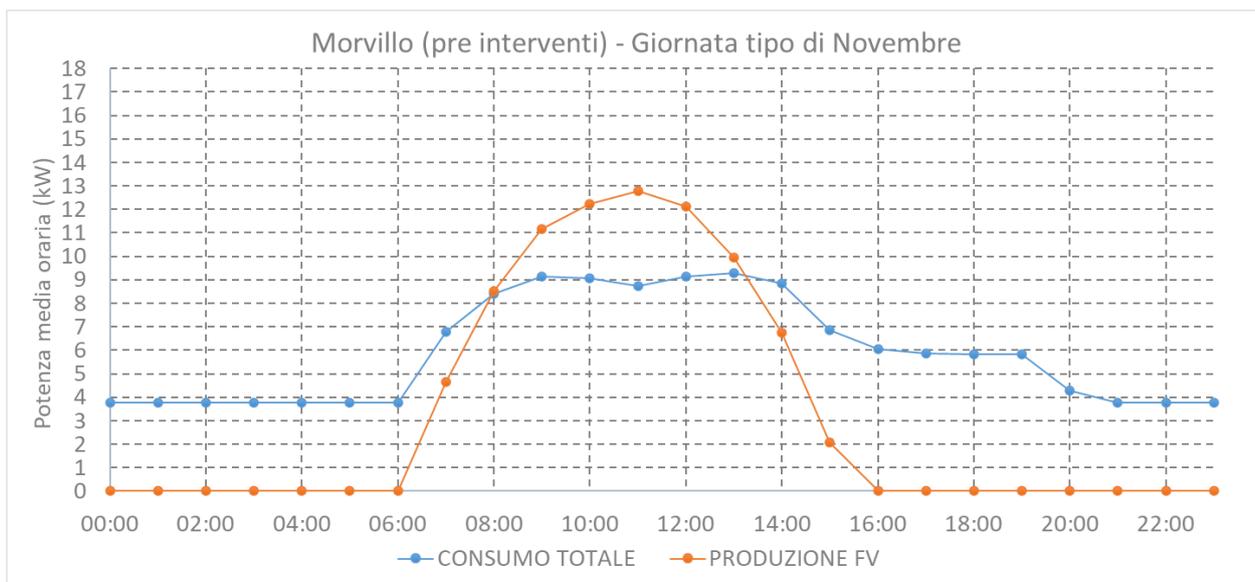


Figura 101 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Novembre - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	3.550	3.503
CONSUMO DA RETE	kWh	1.868	1.811
PRODUZIONE FV	kWh	2.407	2.407
AUTOCONSUMO	kWh	1.682	1.692
VENDITA	kWh	725	715
COPERTURA FV	-	47%	48%

Tabella 1938 - Energia consumata e prodotta - Novembre - Istituto Morvillo

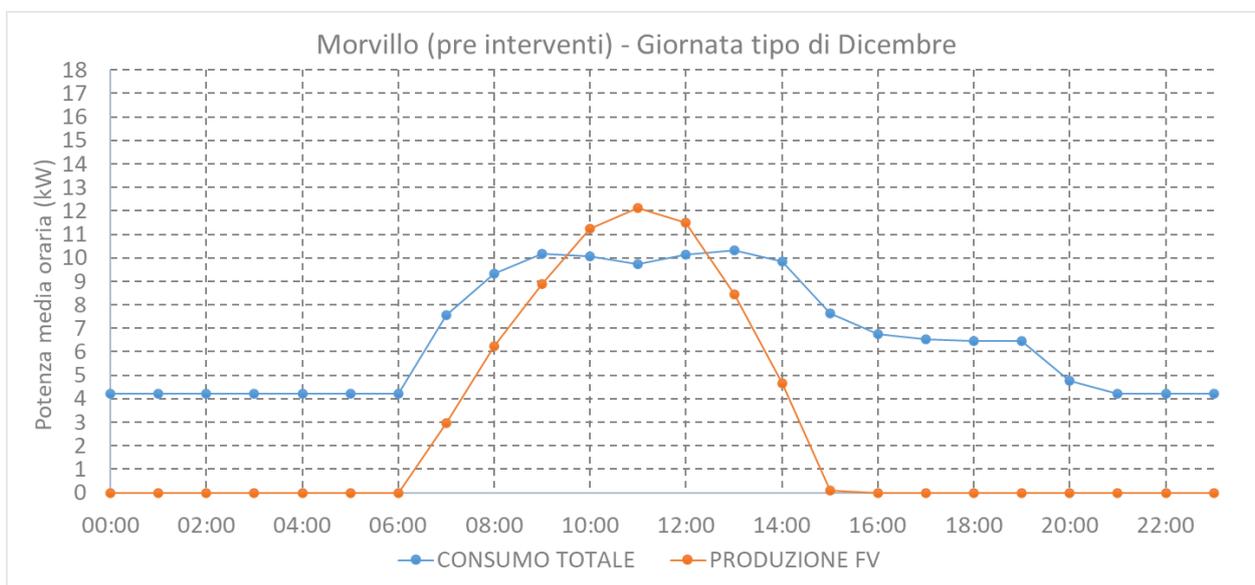


Figura 102 – Profilo di potenza consumata e prodotta - Dicembre - Istituto Morvillo

		RETTANGOLI	TRAPEZI
CONSUMO TOTALE	kWh	3.156	3.114
CONSUMO DA RETE	kWh	1.932	1.864
PRODUZIONE FV	kWh	1.985	1.985
AUTOCONSUMO	kWh	1.224	1.250
VENDITA	kWh	761	736
COPERTURA FV	-	39%	40%

Tabella 2039 - Energia consumata e prodotta - Dicembre - Istituto Morvillo

5.4 – ANALISI ECONOMICA

Rispetto all'analisi economica effettuata nel capitolo precedente, a parità di investimento e di parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa, riportati in Tabella 140, è riscontrabile una riduzione di circa € 18.000,00 del VAN al termine dei 25 anni previsti per la durata di vita dell'intervento. Conseguentemente è registrabile un peggioramento, come mostrato in Tabella 141, degli altri indicatori economici.

Durata del progetto	0,5	anni
Vita utile intervento	25	anni
Costo GM comprato	0,85	€/Sm ³
Costo EE comprata	0,20	€/kWh
Costo EE venduta	0,10	€/kWh
Tasso di sconto	5	%
Tasso incremento vendita annuale	0,025	-
Investimento	33.507	€

Tabella 140 – Parametri utilizzati per il calcolo dei flussi di cassa (App. Scenario 4)

VAN (scontato)	$\sum \text{Benefici att} - \sum \text{Costi att}$	70.283	€
IP - Indice di Profitto (scontato)	$\sum \text{Benefici att} / \sum \text{Costi att}$	3,037	-
PBT - Tempo di ritorno semplice	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	6	anni
dPBT - Tempo di ritorno attualizzato	Anno $\sum \text{Benefici att}$ supera $\sum \text{Costi att}$	7	anni
TIR - Tasso Interno Rendimento	Valore di r che annulla il VAN (IP=1)	20	%

Tabella 141 – Indicatori economici (App. Scenario 4)

Questo risultato è coerente con quanto osservato precedentemente nell'analisi oraria condotta: l'impianto, a parità di produzione, è in grado di offrire una minor percentuale di autoconsumo rispetto alla vendita in rete che si traduce in un rientro ritardato dell'investimento di circa 1 anno.

CONCLUSIONE

Nel presente lavoro di tesi è stata condotta una diagnosi energetica finalizzata ad analizzare lo stato di fatto di un edificio di tipo scolastico e, attraverso la progettazione di molteplici interventi migliorativi, è stata rappresentata la realizzazione di uno stato di progetto che comportasse il miglioramento di una classe energetica e la riduzione del 20% delle emissioni di CO₂.

Il processo ha previsto la realizzazione di un modello energetico utile alla caratterizzazione dello stato di fatto dell'edificio dal punto di vista strutturale e impiantistico, al calcolo degli indici di prestazione energetica e alla definizione della classe energetica.

Attraverso il confronto degli indici di prestazione con gli standard di settore si è notata la tendenza ad un minore consumo di Gas Metano: aspetto in netta controtendenza rispetto allo stato non ottimale del fabbricato e degli impianti dedicati al riscaldamento. Contrariamente i consumi di energia elettrica si posizionano all'interno della media dei best performers di settore.

Il lavoro svolto ha messo in luce i reali benefici della realizzazione di una diagnosi energetica preliminare rispetto alla realizzazione di interventi dedicati all'efficientamento energetico. Gli interventi sono stati analizzati singolarmente, descrivendone in primo luogo la fase di progettazione preliminare ed in secondo luogo l'impatto dal punto di vista energetico ed economico.

L'intervento di installazione dell'impianto fotovoltaico è stato approfondito per mostrare i benefici di un'analisi di tipo oraria e dell'impatto positivo che questa può avere sui risultati energetici ed economici. In particolare l'ultima analisi condotta ha generato un nuovo scenario maggiormente pessimistico ma più verosimile.

Dal lato energetico gli interventi hanno generato complessivamente una riduzione dei consumi del 30% di Gas Metano e del 54% di energia elettrica.

Per quanto riguarda l'aspetto ambientale, il progetto ha comportato la diminuzione del 42% delle emissioni di CO₂: passando da $31 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$ ad appena $18 \frac{kg}{m^2 \text{ anno}}$.

Dal punto di vista economico una parte degli interventi si è rivelata non redditizia, ma comunque fondamentale per il miglioramento della classe energetica.

Gli interventi hanno generato un incremento di 2 classi energetiche: dalla classe E alla classe C, con un miglioramento del 42% dell'indice di prestazione $EP_{gl,nren}$.

Il progetto, infine, ha comportato un miglioramento non trascurabile del confort dell'edificio, grazie all'installazione ex novo di un impianto di generazione di acqua calda sanitaria e di un impianto di ventilazione meccanica.

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 1 - LOCALIZZAZIONE DELL'EDIFICIO (FONTE: GOOGLE EARTH).....	19
FIGURA 2 – VISIONE AEREA DELL'EDIFICIO N°1 (FONTE: GOOGLE EARTH).....	19
FIGURA 3 - VISIONE AEREA DELL'EDIFICIO N°2 (FONTE: GOOGLE EARTH).....	19
FIGURA 4 - ALLEGATO D7 (SCALA 1:20.000) (FONTE: PRG ROMA)	20
FIGURA 5 – DETTAGLIO DELLA TAVOLA 24-374 (SCALA 1:25.000) (FONTE: PTPR ROMA)	21
FIGURA 6 – DETTAGLIO FACCIATA SUD-OVEST	23
FIGURA 7 – DETTAGLIO FACCIATA SUD-EST.....	23
FIGURA 8 – DETTAGLIO FACCIATA NORD E COPERTURA	23
FIGURA 9 – PROSPETTO SUD	24
FIGURA 10 – PROSPETTO EST	24
FIGURA 11 – PROSPETTO NORD	24
FIGURA 12 – PROSPETTO OVEST.....	24
FIGURA 13 – PIANTA PIANO TERRA (1 ^A P. F.T.).....	25
FIGURA 14 – PIANTA PRIMO PIANO (2 ^A P. F.T.).....	26
FIGURA 15 – PIANTA SECONDO PIANO (3 ^A P. F.T.)	27
FIGURA 16 – CALDAIE TRADIZIONALI A GAS METANO.....	28
FIGURA 17 – POMPE DI CIRCOLAZIONE	28
FIGURA 18 – RADIATORI AD ACQUA	29
FIGURA 19 – AEROTERMI.....	29
FIGURA 20 – IMPIANTO ILLUMINAZIONE ATRIO.....	32
FIGURA 21 – IMPIANTO ILLUMINAZIONE PALESTRA.....	32
FIGURA 22 – CONSUMO GAS METANO E ANDAMENTO TEMPERATURE MEDIE ESTERNE 2020	34
FIGURA 23 – CONSUMO GAS METANO E ANDAMENTO TEMPERATURE MEDIE ESTERNE 2021	35
FIGURA 24 – CONSUMO GAS METANO E ANDAMENTO TEMPERATURE MEDIE ESTERNE 2022	36
FIGURA 25 – CONSUMO GAS METANO E ANDAMENTO TEMPERATURE MEDIE ESTERNE 2023	37
FIGURA 26 – CONSUMO GAS METANO E ANDAMENTO TEMPERATURE MEDIE ESTERNE 2020-21-22-23	38
FIGURA 27 – CONSUMI EE 2022	39

FIGURA 28 – CONSUMI EE 2023	40
FIGURA 29 – CONFRONTO CONSUMI ENERGIA ELETTRICA 2022-23	41
FIGURA 30 – CONFRONTO CONSUMI ENERGIA ELETTRICA DEL 2023 RISPETTO AL 2022	41
FIGURA 31 – CONFRONTO CONSUMI PER FASCIA ORARIA 2022-23	42
FIGURA 32 - DETTAGLIO REGIME NORMATIVO DEL MODELLO	47
FIGURA 33 – EDIFICIO PER LA SELEZIONE DEI PONTI TERMICI ATTRAVERSO EC 709.....	52
FIGURA 34 – PONTE TERMICO Z5 – ANGOLO TRA PARETI SPORGENTE SENZA PILASTRO	52
FIGURA 35 – PONTE TERMICO Z6 – ANGOLO TRA PARETI SPORGENTE CON PILASTRO	53
FIGURA 36 – PONTE TERMICO Z7 – ANGOLO TRA PARETI RIENTRANTE SENZA PILASTRO	53
FIGURA 37 – PONTE TERMICO Z8 – ANGOLO TRA PARETI RIENTRANTE CON PILASTRO	53
FIGURA 38 – PONTE TERMICO Z9 – PARETE-PILASTRO.....	54
FIGURA 39 – PONTE TERMICO Z1 – PARETE-SOLAIO CONTROTERRA	54
FIGURA 40 – PONTE TERMICO Z2 – PARETE-SOLAIO INTERPIANO	55
FIGURA 41 – PONTE TERMICO Z13 – TELAIO-SOLAIO INTERPIANO	55
FIGURA 42 – PONTE TERMICO Z10, Z11, Z12 – PARETE-TELAIO	56
FIGURA 43 – PONTE TERMICO Z3 – PARETE-COPERTURA	56
FIGURA 44 – PONTE TERMICO Z4 – PARETE-COPERTURA NR.....	57
FIGURA 45 - DETTAGLIO VETRO DOPPIO	58
FIGURA 46 - DETTAGLIO IMMISSIONE CASSONETTO E PONTE TERMICO	58
FIGURA 47 – MODELLO 3D NORD-OVEST	63
FIGURA 48 – MODELLO 3D SUD-EST.....	63
FIGURA 49 – MODELLO 2D PIANO TERRA.....	64
FIGURA 50 – MODELLO 2D PRIMO PIANO	65
FIGURA 51 – MODELLO 2D SECONDO PIANO	66
FIGURA 52 – DISAGGREGAZIONE CONSUMI ENERGIA ELETTRICA.....	71
FIGURA 53 – ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA (PRE).....	72
FIGURA 54 – RISULTATI IENR	77
FIGURA 55 – RISULTATI IEN _E	79

FIGURA 56 – FIRMA ENERGETICA DELLO STATO DI FATTO	85
FIGURA 57 – ACCUMULO WP1X 01000 R (FONTE: TML)	95
FIGURA 58 – ACCUMULO WP2X 00600 R (FONTE: TML)	95
FIGURA 59 – POMPA DI CALORE MODUEXPO HT (FONTE: PARADIGMA)	96
FIGURA 60 – COLLETTORE TERMICO AQUA PLASMA (FONTE: PARADIGMA)	97
FIGURA 61 – SCHEMA FUNZIONALE IMPIANTO DI PRODUZIONE ACS	101
FIGURA 62 – CONFRONTO FABBISOGNO DI ACS CUCINA E PRODUZIONE SOLARE TERMICO	102
FIGURA 63 - PRODUCIBILITÀ FV E IRRAGGIAMENTO CON ANGOLO TILT DI 30°	106
FIGURA 64 - PRODUCIBILITÀ FV E IRRAGGIAMENTO CON ANGOLO TILT DI 60°	106
FIGURA 65 – CONFRONTO PRODUCIBILITÀ FV CON ANGOLO TILT DI 30° E 60°	107
FIGURA 66 – DELTA PRODUCIBILITÀ FV CON ANGOLO TILT DI 30° E 60°	107
FIGURA 67 - LONGI SOLAR LR4-72HIH-450M (FONTE: SOLAR ENERGY)	108
FIGURA 68 - TL3-X 15K (FONTE: GROWATT)	109
FIGURA 69 – RAPPORTO DISTANZA/LUNGHEZZA IN FUNZIONE DELL’INCLINAZIONE E DELLA LATITUDINE ..	111
FIGURA 70 – MESSA IN PIANTA DEI MODULI FOTOVOLTAICI, ORIENTAMENTO VISTA SUD-NORD	111
FIGURA 71 – SCHEMA ELETTRICO PT.1	112
FIGURA 72 – SCHEMA ELETTRICO PT.2	113
FIGURA 73 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI AULA DIDATTICA	117
FIGURA 74 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI AULA DELLA CERAMICA.....	117
FIGURA 75 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI VANO SCALA	118
FIGURA 76 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI ANTI-WC.....	118
FIGURA 77 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI WC ACCESSIBILE	118
FIGURA 78 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI ATRIO PRIMO PIANO	119
FIGURA 79 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI PALESTRA	119
FIGURA 80 – RAPPRESENTAZIONE 3D CON COLORI FALSATI MENSA	119
FIGURA 81 – VMC HRC+ 60 H/HV (FONTE: INNOVA)	124
FIGURA 82 – DISAGGREGAZIONE CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (PRE)	128
FIGURA 83 – DISAGGREGAZIONE CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (POST)	128

FIGURA 84 - ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA (POST)	129
FIGURA 85 – VISIONE AEREA ISTITUTO SOCIALE (FONTE: GOOGLE EARTH)	130
FIGURA 86 – POSIZIONAMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI ISTITUTO SOCIALE	130
FIGURA 87 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO SOCIALE.....	131
FIGURA 88 – RAPPRESENTAZIONE GRAFICA REGOLA DEL TRAPEZIO.....	132
FIGURA 89 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO MORVILLO (PRE).....	134
FIGURA 90 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO MORVILLO (POST) ...	134
FIGURA 91 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - GENNAIO - ISTITUTO MORVILLO.....	136
FIGURA 92 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - FEBBRAIO - ISTITUTO MORVILLO	136
FIGURA 93 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - MARZO - ISTITUTO MORVILLO	137
FIGURA 94 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - APRILE - ISTITUTO MORVILLO	137
FIGURA 95 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO MORVILLO.....	138
FIGURA 96 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - GIUGNO - ISTITUTO MORVILLO	138
FIGURA 97 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - LUGLIO - ISTITUTO MORVILLO	139
FIGURA 98 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - AGOSTO - ISTITUTO MORVILLO	139
FIGURA 99 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - SETTEMBRE - ISTITUTO MORVILLO	140
FIGURA 100 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - OTTOBRE - ISTITUTO MORVILLO.....	140
FIGURA 101 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - NOVEMBRE - ISTITUTO MORVILLO	141
FIGURA 102 – PROFILO DI POTENZA CONSUMATA E PRODOTTA - DICEMBRE - ISTITUTO MORVILLO	141

ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 1- DATI CLIMATICI CNR – TOR VERGATA 2020-21-22-23 (FONTE: ARPA LAZIO)	22
TABELLA 2 - CARATTERISTICHE TECNICHE GRUPPO TERMICO 1.....	30
TABELLA 3 - CARATTERISTICHE TECNICHE GRUPPO TERMICO 2.....	30
TABELLA 4 - CARATTERISTICHE TECNICHE GRUPPO TERMICO 3.....	30
TABELLA 5 - CARATTERISTICHE TECNICHE IMPIANTO DI DISTRIBUZIONE.....	31
TABELLA 6 - CARATTERISTICHE TECNICHE IMPIANTO DI EMISSIONE.....	31
TABELLA 7 – CATEGORIE DI CLASSIFICAZIONE DEGLI ASCENSORI.....	32
TABELLA 8 - CONSUMO GAS METANO 2020.....	34
TABELLA 9 - CONSUMO GAS METANO 2021.....	35
TABELLA 10 - CONSUMO GAS METANO 2022.....	36
TABELLA 11 - CONSUMO GAS METANO 2023.....	37
TABELLA 12 – CONSUMI EE 2022.....	39
TABELLA 13 – CONSUMI EE 2023.....	40
TABELLA 14 - STRATIGRAFIA M1 E M2.....	48
TABELLA 15 - STRATIGRAFIA M5 E M7.....	48
TABELLA 16 - STRATIGRAFIA M6 E M9.....	49
TABELLA 17 - STRATIGRAFIA M8.....	49
TABELLA 18 - STRATIGRAFIA M3, M4, M10, M11 E M12.....	49
TABELLA 19 – RIEPILOGO COMPONENTI MURATURA VERTICALE	49
TABELLA 20 - STRATIGRAFIA P1	50
TABELLA 21 - STRATIGRAFIA P2 E P3.....	50
TABELLA 22 - RIEPILOGO COMPONENTI PAVIMENTO	50
TABELLA 23 – STRATIGRAFIA S1 E S2	50
TABELLA 24 – STRATIGRAFIA S3 E S4	51
TABELLA 25 - RIEPILOGO COMPONENTI SOFFITTO.....	51
TABELLA 26 - RIEPILOGO PONTI TERMICI	57
TABELLA 27 - RIEPILOGO COMPONENTI TRASPARENTI W1-W38	59

TABELLA 28 – RIEPILOGO COMPONENTI TRASPARENTI W39-W76	60
TABELLA 29 - RIEPILOGO COMPONENTI TRASPARENTI W77-W114	61
TABELLA 30 - RIEPILOGO COMPONENTI TRASPARENTI W114-W151	62
TABELLA 31 - RISULTATI FABBRICATO – POTENZA INVERNALE - DISPERSIONI.....	68
TABELLA 32 - RISULTATI FABBRICATO – POTENZA INVERNALE – TOTALI.....	68
TABELLA 33 - RISULTATI FABBRICATO – ENERGIA INVERNALE - DISPERSIONI	69
TABELLA 34 - RISULTATI FABBRICATO – ENERGIA INVERNALE - APPORTI.....	69
TABELLA 35 - RISULTATI FABBRICATO – ENERGIA INVERNALE – BILANCIO ENERGETICO	69
TABELLA 36 – RISULTATI ENERGIA PRIMARIA	69
TABELLA 37 – RISULTATI ENERGIA PRIMARIA – INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA	70
TABELLA 38 – RISULTATI ENERGIA PRIMARIA – CONSUMI + EMISSIONI CO ₂	70
TABELLA 39 – VALIDAZIONE MODELLO – CONSUMI TERMICI	73
TABELLA 40 – VALIDAZIONE MODELLO – CONSUMI ELETTRICI	73
TABELLA 41 – CLASSI DI MERITO DEI CONSUMI SPECIFICI PER RISCALDAMENTO (FONTE: ENEA-FIRE)	74
TABELLA 42 – CLASSI DI MERITO DEI CONSUMI SPECIFICI PER ENERGIA ELETTRICA (FONTE: ENEA-FIRE)	74
TABELLA 43 – CONVERSIONE CONSUMI DI GAS METANO IN KWH TERMICI	75
TABELLA 44 – GRADI-GIORNO 2020-21-22-23-MEDIA.....	75
TABELLA 45 – FATTORE DI NORMALIZZAZIONE F _E (FONTE: ENEA-FIRE)	76
TABELLA 46 – FATTORE DI NORMALIZZAZIONE F _H (FONTE: ENEA-FIRE)	76
TABELLA 47 – RISULTATI IENR.....	77
TABELLA 48 – CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA IN KWH ELETTRICI	78
TABELLA 49 – FATTORE DI NORMALIZZAZIONE F _H (FONTE: ENEA-FIRE)	78
TABELLA 50 – RISULTATI IEN _E	79
TABELLA 51 – STRATIGRAFIA M3, M4, M10, M11 E M12 (POST).....	82
TABELLA 52 – RISULTATO MODELLAZIONE (SCENARIO 1)	83
TABELLA 53 – ELENCO SINGOLE VOCI INVESTIMENTO INIZIALE (SCENARIO 1)	84
TABELLA 54 – PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DEI FLUSSI DI CASSA (SCENARIO 1)	84
TABELLA 55 – INDICATORI ECONOMICI (SCENARIO 1).....	84

TABELLA 56 – SCHEDA TECNICA VITOMODUL 240 KW	86
TABELLA 57 – SCHEDA TECNICA VITODENS 80 KW	86
TABELLA 58 – SCHEDA TECNICA VITODENS 50 KW	86
TABELLA 59 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO VASI DI ESPANSIONE CENTRALE TERMICA.....	87
TABELLA 60 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO CIRCOLATORI CENTRALE TERMICA	88
TABELLA 61 – SCHEDA TECNICA POMPA PRIMARIO SCUOLA	88
TABELLA 62 – SCHEDA TECNICA POMPA SECONDARIO SCUOLA	88
TABELLA 63 – SCHEDA TECNICA POMPA PRIMARIO PALESTRA	88
TABELLA 64 – SCHEDA TECNICA POMPA SECONDARIO PALESTRA	88
TABELLA 65 – SCHEDA TECNICA POMPA PRIMARIO UFFICI	88
TABELLA 66 – SCHEDA TECNICA POMPA SECONDARIO UFFICI	88
TABELLA 67 - RISULTATI DIMENSIONAMENTO TUBAZIONI CENTRALE TERMICA.....	89
TABELLA 68 – CARATTERIZZAZIONE INTERVENTO (SCENARIO 2).....	90
TABELLA 69 – ELENCO SINGOLE VOCI INVESTIMENTO INIZIALE (SCENARIO 2)	91
TABELLA 70 – PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DEI FLUSSI DI CASSA (SCENARIO 2)	91
TABELLA 71 – INDICATORI ECONOMICI (SCENARIO 2).....	91
TABELLA 72 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO BOLLITORE SERVIZI IGIENICI (ALMENO 4 LAVABI)	93
TABELLA 73 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO BOLLITORE SERVIZI IGIENICI (1-2 LAVABI)	94
TABELLA 74 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO BOLLITORE CUCINA.....	94
TABELLA 75 – SCHEDA TECNICA ACCUMULO WP1X 01000	95
TABELLA 76 – SCHEDA TECNICA ACCUMULO WP2X 00600	95
TABELLA 77 – SCHEDA TECNICA POMPA DI CALORE PARADIGMA MODUEXPO HT 49	96
TABELLA 78 – SCHEDA TECNICA POMPA DI CALORE PARADIGMA MODUEXPO HT 38	96
TABELLA 79 – SCHEDA TECNICA COLLETTORE TERMICO PARADIGMA AQUA PLASMA	97
TABELLA 80 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO VASI ESPANSIONE PRIMARIO ACS.....	98
TABELLA 81 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO CIRCOLATORI PRIMARIO ACS.....	98
TABELLA 82 – SCHEDA TECNICA POMPA PRIMARIO PDC 1.....	98
TABELLA 83 – SCHEDA TECNICA POMPA PRIMARIO PDC 2.....	98

TABELLA 84 – SCHEDA TECNICA POMPA PRIMARIO ST	98
TABELLA 85 - RISULTATI DIMENSIONAMENTO TUBAZIONI PRIMARIO ACS	99
TABELLA 86 - COEFFICIENTE N AL VARIARE DELLA TEMPERATURA, SENZA GLICOLE (FONTE: CALEFFI)	99
TABELLA 87 – RISULTATI DIMENSIONAMENTO VASI ESPANSIONE SECONDARIO ACS	100
TABELLA 88 - RISULTATI DIMENSIONAMENTO TUBAZIONI ACS SERVIZI SANITARI	100
TABELLA 89 - RISULTATI DIMENSIONAMENTO TUBAZIONI ACS CUCINA	100
TABELLA 90 – RISULTATI FABBISOGNO DI ACS E COPERTURA DEL SOLARE TERMICO	102
TABELLA 91 – CARATTERIZZAZIONE INTERVENTO (SCENARIO 3)	103
TABELLA 92 – ELENCO SINGOLE VOCI INVESTIMENTO INIZIALE (SCENARIO 3)	104
TABELLA 93 – PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DEI FLUSSI DI CASSA (SCENARIO 3)	104
TABELLA 94 – INDICATORI ECONOMICI (SCENARIO 3)	104
TABELLA 95 - CONSUMI MEDI DI ENERGIA ELETTRICA	105
TABELLA 96 – SCHEDA TECNICA LONGI SOLAR LR4-72HIH-450M (FONTE: SOLAR ENERGY)	108
TABELLA 97 – SCHEDA TECNICA TL3-X 15K (FONTE: GROWATT)	109
TABELLA 98 – VERIFICHE ACCOPPIAMENTO MODULO-INVERTER	110
TABELLA 99 – RISULTATI FOTOVOLTAICO: PRODUZIONE, IRRAGGIAMENTO, AUTOCONSUMO E VENDITA..	114
TABELLA 100 – CARATTERIZZAZIONE INTERVENTO (SCENARIO 4)	114
TABELLA 101 – ELENCO SINGOLE VOCI INVESTIMENTO INIZIALE (SCENARIO 4)	115
TABELLA 102 – COSTI DI MATERIALE E MANODOPERA (SCENARIO 4)	115
TABELLA 103 – PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DEI FLUSSI DI CASSA (SCENARIO 4)	115
TABELLA 104 – INDICATORI ECONOMICI (SCENARIO 4)	115
TABELLA 105 – SCHEDA TECNICA ABSENT ESSENTIAL 36 W	116
TABELLA 106 – SCHEDA TECNICA ABSENT ESSENTIAL 60 W	116
TABELLA 107 – SCHEDA TECNICA COLLINA 15 W	116
TABELLA 108 – SCHEDA TECNICA COLLINA 20 W	116
TABELLA 109 – RISULTATI VERIFICA ILLUMINOTECNICA	120
TABELLA 110 – RISULTATI CONSUMO POST INTERVENTO RELAMPING	121
TABELLA 111 - CARATTERIZZAZIONE INTERVENTO (SCENARIO 5)	121

TABELLA 112 – ELENCO SINGOLE VOCI INVESTIMENTO INIZIALE (SCENARIO 5)	122
TABELLA 113 – PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DEI FLUSSI DI CASSA (SCENARIO 5)	122
TABELLA 114 – INDICATORI ECONOMICI (SCENARIO 5).....	122
TABELLA 115 – DIMENSIONAMENTO DELLA PORTATA D’ARIA PER OGNI AULA.....	123
TABELLA 116 – PROSPETTO V UNI 10339 – EFFICIENZA DI FILTRAZIONE	124
TABELLA 117 – SCHEDA TECNICA VMC HRC+ 60 H/HV INNOVA.....	124
TABELLA 118 - CARATTERIZZAZIONE INTERVENTO (SCENARIO 6)	125
TABELLA 119 – ELENCO SINGOLE VOCI INVESTIMENTO INIZIALE (SCENARIO 6)	126
TABELLA 120 – PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DEI FLUSSI DI CASSA (SCENARIO 6)	126
TABELLA 121 – INDICATORI ECONOMICI (SCENARIO 6).....	126
TABELLA 122 – CONSUMI DI GAS METANO NELLO SCENARIO COMPLESSIVO.....	127
TABELLA 123 – CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA NELLO SCENARIO COMPLESSIVO	127
TABELLA 124 – VARIAZIONE CLASSE ENERGETICA ED EMISSIONI CO ₂ NELLO SCENARIO COMPLESSIVO.....	129
TABELLA 125 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO SOCIALE.....	132
TABELLA 126 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO MORVILLO (PRE).....	134
TABELLA 127 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO MORVILLO (POST)	134
TABELLA 128 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - GENNAIO - ISTITUTO MORVILLO.....	136
TABELLA 129 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - FEBBRAIO - ISTITUTO MORVILLO	136
TABELLA 130 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - MARZO - ISTITUTO MORVILLO	137
TABELLA 131 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - APRILE - ISTITUTO MORVILLO	137
TABELLA 132 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - MAGGIO - ISTITUTO MORVILLO	138
TABELLA 133 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - GIUGNO - ISTITUTO MORVILLO	138
TABELLA 134 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - LUGLIO - ISTITUTO MORVILLO	139
TABELLA 135 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - AGOSTO - ISTITUTO MORVILLO	139
TABELLA 136 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - SETTEMBRE - ISTITUTO MORVILLO	140
TABELLA 137 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - OTTOBRE - ISTITUTO MORVILLO.....	140
TABELLA 138 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - NOVEMBRE - ISTITUTO MORVILLO	141
TABELLA 139 - ENERGIA CONSUMATA E PRODOTTA - DICEMBRE - ISTITUTO MORVILLO	141

TABELLA 140 – PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DEI FLUSSI DI CASSA (APP. SCENARIO 4)	142
TABELLA 141 – INDICATORI ECONOMICI (APP. SCENARIO 4).....	142

BIBLIOGRAFIA

Edilclima, Manuale d'uso EC 700

Edilclima, Manuale d'uso EC 720

ENEA-FIRE, Guida per il contenimento della spesa energetica nelle scuole

Caleffi, Vasi di espansione

Caleffi, Quaderno impianti idrosanitari

SITOGRAFIA

<https://biblus.acca.it/efficienza-energetica-normativa/>

<https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/storia-normativa-energetica-settore-edilizio/#normativa-energetica-EED-la-Direttiva-2012/27/UE-sull-efficienza-energetica-e-il-DL-102/14>

<https://euroconsulting.be/stato-dellunione-dellenergia-2023-lue-risponde-efficacemente-alla-crisi-guarda-al-futuro-e-accelera-la-transizione-verde/#:~:text=I%20prezzi%20dell'energia%20elett>

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/IP_22_3131

<https://www.google.com/intl/it/earth/about/>

<http://www.urbanistica.comune.roma.it/prg.html>

<https://www.regione.lazio.it/cittadini/urbanistica/pianificazione-paesaggistica/ptpr>

<https://www.arpalazio.it/rete-micro-meteorologica>

SCHEDE TECNICHE

https://static.viessmann.com/resources/technical_documents/IT/it/VDP/4469791VDP00002_1.pdf

https://www.dabpumps.com/sites/default/files/document/60150747_EVOPLUS_TS_ITA.pdf

https://www.tmlgroup.it/uploads/model_3/.files/5_item_13.pdf

<https://plus.paradigmaitalia.it/sites/default/files/arca/Scheda%20tecnica%20ModuExpo%20HT%20Rev.00.pdf>

<https://plus.paradigmaitalia.it/sites/default/files/arca/Scheda%20tecnica%20solare%20Rev.01.pdf>

<https://growatt.it/growatt-mod-tl3-x-10000-15000/>

<https://www.solarenergypoint.it/immagini/pdf/download/fotovoltaico/moduli-fotovoltaici/longi-solar/lr4-72h/longi-solar-lr4-72h-425-455m-scheda-tecnica-modulo-fotovoltaico-monocristallino-half-cut-425-455-wp.pdf>

<https://www.esse-ci.com/product/absent-essential/>

<https://www.auralight.com/fi/luminaires/collina>

https://www.innovaenergie.com/site/assets/files/2792/scheda-tecnica-hrc_2022_rev00.pdf