



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Riqualificazione energetica degli edifici industriali:
Sviluppo di una metodologia per la valutazione
tecnico-economica alla luce del Conto Termico 3.0

Laureanda

Linda Fattori

Relatore

Prof. Ing. Paolo Emilio Santangelo

Correlatrice

Dott. Ing. Ornella Restani

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Motivazioni della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio nel contesto europeo e nazionale	8
1.2	Obiettivi della tesi e struttura dell'elaborato	12
2	Quadro normativo	17
2.1	Normativa europea in materia di efficienza energetica	17
2.2	Recepimento a livello nazionale	24
2.3	Quadro normativo regionale dell'Emilia Romagna.....	36
2.4	La normativa tecnica di riferimento	39
2.4.1	UNI/TS 11300.....	39
2.4.2	UNI 10349.....	44
3	Fondamenti tecnico-ingegneristici	47
3.1	Trasmittanza termica degli elementi opachi e trasparenti.....	47
3.2	Apporti Solari	51
3.2.1	Apporti gratuiti	55
3.3	Calcolo degli scambi termici tra esterno e interno	57
3.4	Fabbisogni energetici per la climatizzazione dell'edificio	58
3.5	Calcolo del fabbisogno energetico per la produzione di ACS	59
3.6	Calcolo dell'energia primaria.....	60
4	Strumenti di incentivazione per l'efficientamento energetico: il ruolo del Conto Termico 3.0.....	63
4.1	Interventi ammissibili.....	63
4.2	Soggetti Ammessi e Soggetti Responsabili.....	66
4.3	Requisiti e modalità di accesso agli incentivi	68
4.3.1	Requisiti di accesso agli incentivi	68
4.3.2	Modalità di accesso agli incentivi.....	69
4.4	Quantificazione ed erogazione dell'incentivo	70
4.4.1	Erogazione dell'incentivo	72
4.5	Contingente annuo di spesa	75
4.6	Cumulabilità degli incentivi.....	75
4.7	Calcolo degli incentivi.....	76
4.7.1	Interventi di efficientamento energetico.....	76

4.7.2	Diagnosi energetiche e attestati di prestazione energetica	92
5	Metodologia di analisi e descrizione dei casi studio	93
5.1	Struttura del metodo	96
5.2	Inquadramento dei casi di studio	99
5.3	Strumenti di calcolo e software di supporto alle analisi	103
5.3.1	Modellazione energetica degli edifici: Edilclima e IRIS	104
5.3.2	Calcolo degli incentivi tramite foglio di calcolo	112
6	Casi di studio - Analisi dello stato di fatto	115
6.1	Edificio A.....	115
6.1.1	Caratteristiche dell'involucro edilizio.....	116
6.1.2	Input grafico e definizione dei locali climatizzati	136
6.1.3	Impianto termico esistente.....	137
6.1.4	Prestazioni energetiche	138
6.2	Edificio B	141
6.2.1	Descrizione dell'edificio.....	141
6.2.2	Prestazioni energetiche	145
6.3	Edificio C.....	148
6.3.1	Descrizione dell'edificio.....	148
6.3.2	Prestazioni energetiche	152
7	Strategie di riqualificazione energetica e analisi dei risultati.....	155
7.1	Descrizione delle strategie di intervento implementate.....	155
7.1.1	Stato di progetto Edificio A	156
7.1.2	Stato di progetto Edificio B.....	158
7.1.3	Stato di progetto Edificio C	160
7.2	Analisi energetica, ambientale ed economica degli interventi.....	163
7.2.1	Analisi energetica.....	164
7.2.2	Analisi Ambientale	168
7.2.3	Analisi Economica.....	170
7.3	Confronto tra i casi studio e considerazioni strategiche	175
7.4	Analisi di sensibilità e SWOT	179
8	Conclusioni e prospettive future	183
	Sitografia	187
	Bibliografia	189

Indice delle Figure

Figura 1.1 - Principali tassi di crescita globali e quota di crescita della domanda di energia per fonte, 2024 [s2].	6
Figura 1.2 - Consumo finale di energia per settore, UE 2023 [s3].	6
Figura 1.3 - Consumo energetico per fonte, Italia 2023-2025 [s4].	7
Figura 1.4 - Quota delle fonti energetiche rinnovabili sul consumo finale di energia, Italia 2005-2023 (%) [s4].	8
Figura 4.1 - Schema riassuntivo della procedura di accesso diretto [30].	69
Figura 4.2 - Schema riassuntivo della procedura di accesso tramite prenotazione [30].	70
Figura 5.1 - Diagramma di flusso della metodologia.	94
Figura 5.2 - Gradi giorno per impianti riscaldamento e fabbisogno termico.	100
Figura 5.3 - Maschera dati climatici Edilclima.	105
Figura 5.4 - Maschera regime normativo Edilclima.	107
Figura 5.5 - Dati di partenza calcolo incentivo Conto Termico 3.0.	113
Figura 5.6 - Calcolo incentivo pompe di calore elettriche Conto Termico 3.0.	114
Figura 6.1 - Vista 3D dell'edificio A.	116
Figura 6.2 - Stratigrafia muro M1 (Edificio A).	117
Figura 6.3 - Verifica termoigrometrica muro M1 (Edificio A).	117
Figura 6.4 - Schermata risultati muro M1 (Edificio A).	118
Figura 6.5 - Stratigrafia muro M4 (Edificio A).	118
Figura 6.6 - Stratigrafia muro M2 (Edificio A).	119
Figura 6.7 - Stratigrafia muro M3 (Edificio A).	119
Figura 6.8 - Schermata risultati muro M4 (Edificio A).	119
Figura 6.9 - Schermata dati generali, tipo di calcolo per locali non climatizzati, muro M101 (Edificio A).	120
Figura 6.10 - Stratigrafia muro 101 (Edificio A).	120
Figura 6.11 - Schermata dati generali, tipo di calcolo per locali climatizzati verso locali vicini, muro 201 (Edificio A).	121
Figura 6.12 - Stratigrafia muro 201 (Edificio A).	121
Figura 6.13 - Schermata dati generali, tipo di calcolo per locali climatizzati verso locali vicini, muro 204 (Edificio A).	122
Figura 6.14 - Stratigrafia muro 204 (Edificio A).	122
Figura 6.15 - Stratigrafia muro 401, porta (Edificio A).	123
Figura 6.16 - Stratigrafia muro 402, portone (Edificio A).	123
Figura 6.17 - Schermata dati generali, tipo di pavimento (Edificio A).	125
Figura 6.18 - Stratigrafia pavimento (Edificio A).	125
Figura 6.19 - Verifica termoigrometrica pavimento (Edificio A).	125
Figura 6.20 - Schermata risultati pavimento (Edificio A).	126
Figura 6.21 - Stratigrafia copertura (Edificio A).	126
Figura 6.22 - Verifica termoigrometrica copertura (Edificio A).	126

Figura 6.23 - Schermata risultati copertura (Edificio A).....	127
Figura 6.24 - Stratigrafia solaio interpiano (Edificio A).....	127
Figura 6.25 - Verifica termoigrometrica solaio interpiano (Edificio A).....	127
Figura 6.26 - Schermata risultati solaio interpiano (Edificio A).	128
Figura 6.27 - Ponte termico parete-telaio (Edificio A).	129
Figura 6.28 - Ponte termico angolo tra pareti (Edificio A).	129
Figura 6.29 - Ponte termico parete-pilastro (Edificio A).....	130
Figura 6.30 - Ponte termico parete M1-copertura (Edificio A).	130
Figura 6.31 - Ponte termico parete M4-copertura (Edificio A).	131
Figura 6.32 - Ponte termico parete-solaio interpiano (Edificio A).	131
Figura 6.33 - Maschera dati generali serramento W1 (Edificio A).....	132
Figura 6.34 - Maschera geometria serramento W1 (Edificio A).	133
Figura 6.35 - Maschera dati modulo serramento W1 (Edificio A).	133
Figura 6.36 - Maschera vetri serramento W1 (Edificio A).....	134
Figura 6.37 - Maschera schermature e chiusure serramento W1 (Edificio A).....	134
Figura 6.38 - Maschera risultati serramento W1 (Edificio A).	135
Figura 6.39 Maschera geometria portone W4 (Edificio A).....	135
Figura 6.40 - Input grafico Edilclima (Edificio A).	137
Figura 6.41 - Incidenza dei componenti edilizi sulle dispersioni dell'edificio A.	138
Figura 6.42 - Dispersioni e apporti energia invernale (Edificio A).	139
Figura 6.43 - Dispersioni e apporti energia estiva (Edificio A).	140
Figura 6.44 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO2 (Edificio A).	140
Figura 6.45 - Indici di prestazione energetica (Edificio A).....	141
Figura 6.46 - Vista 3D dell'edificio B.	144
Figura 6.47 - Input grafico Edilclima (Edificio B).....	145
Figura 6.48 - Incidenza dei componenti edilizi sulle dispersioni dell'edificio B.	146
Figura 6.49 - Dispersioni e apporti energia invernale (Edificio B).....	146
Figura 6.50 - Dispersioni e apporti energia estiva (Edificio B).	146
Figura 6.51 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici e emissioni di CO2 (Edificio B).....	147
Figura 6.52 - Indici di prestazione energetica (Edificio B).	147
Figura 6.53 - Vista 3D dell'edificio C.	151
Figura 6.54 - Input grafico piano terra Edilclima (Edificio C).	151
Figura 6.55 - Input grafico piano primo Edilclima (Edificio C).....	151
Figura 6.56 - Incidenza dei componenti edilizi sulle dispersioni dell'edificio C.	152
Figura 6.57 - Dispersioni e apporti energia invernale (Edificio C).	153
Figura 6.58 - Dispersioni e apporti energia estiva (Edificio C).....	153
Figura 6.59 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO2 (Edificio C).	153
Figura 6.60 - Indici di prestazione energetica (Edificio C).....	154
Figura 7.1 - Dispersioni e apporti energia invernale nello stato di progetto (Edificio A).	157

Figura 7.2 - Dispersioni e apporti energia estiva nello stato di progetto (Edificio A).	157
Figura 7.3 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO2 nello stato di progetto (Edificio A).	157
Figura 7.4 - Indici di prestazione energetica nello stato di progetto (Edificio A).	158
Figura 7.5 - Dispersioni e apporti energia invernale nello stato di progetto (Edificio B).	159
Figura 7.6 - Dispersioni e apporti energia estiva nello stato di progetto (Edificio B).	159
Figura 7.7 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO2 nello stato di progetto (Edificio B).	160
Figura 7.8 - Indici di prestazione energetica nello stato di progetto (Edificio B).	160
Figura 7.9 - Dispersioni e apporti energia invernale nello stato di progetto (Edificio C).	161
Figura 7.10 - Dispersioni e apporti energia estiva nello stato di progetto (Edificio C).	162
Figura 7.11 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO2 nello stato di progetto (Edificio C).	162
Figura 7.12 - Indici di prestazione energetica nello stato di progetto (Edificio C).	162
Figura 7.13 - Comparazione pre- e post-intervento dell'energia primaria non rinnovabile [kWh/anno].	164
Figura 7.14 - Comparazione pre- e post-intervento dell'energia primaria rinnovabile [kWh/anno].	165
Figura 7.15 - Comparazione pre- e post-intervento dell'energia primaria globale [kWh/anno].	165
Figura 7.16 - Variazioni emissioni di CO2 pre- e post-intervento [kg/anno].	169
Figura 7.17 - VAN Edificio A.	173
Figura 7.18 - VAN Edificio B.	173
Figura 7.19 - VAN Edificio C.	174
Figura 7.20 - Variazione del risparmio energetico percentuale rispetto al valore di H't.	176
Figura 7.21 -VAN Edificio A (senza Conto Termico 3.0).	179
Figura 7.22 - VAN Edificio B (senza Conto Termico 3.0).	180
Figura 7.23 - VAN Edificio C (senza Conto Termico 3.0).	180

Indice delle Tabelle

Tabella 3.1 - Resistenze termiche superficiali e coefficienti di adduzione in funzione della direzione del flusso e della velocità dell'aria.....	47
Tabella 4.1 - Interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti (Titolo II - art.5, comma 1 del Decreto).	64
Tabella 4.2 - Interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza (Titolo III - art.8, comma 1 del Decreto). ...	65
Tabella 4.3 - Durata dell'incentivo in anni in base alla tipologia di intervento. [30]...	73
Tabella 4.4 - Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e corrispondente valore massimo dell'incentivo. [30]	78
Tabella 4.5 - Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e corrispondente valore massimo dell'incentivo. [30]	80
Tabella 4.6 - Coefficiente di utilizzo per le pompe di calore elettriche e a gas. [29]....	84
Tabella 4.7 - Coefficienti di valorizzazione dell'energia termica prodotta da pompe di calore elettriche e a gas. [29]	84
Tabella 4.8 - Ore di funzionamento stimate in relazione alla zona climatica di appartenenza. [29].....	86
Tabella 4.9 - Coefficienti di valorizzazione dell'energia termica prodotta da impianti a biomassa. [29]	87
Tabella 4.10 - Coefficiente moltiplicativo C_e applicabile ai generatori di calore alimentati a biomassa con potenza inferiore o uguale a 500 kW, in relazione ai livelli di emissione di particolato primario. [29]	87
Tabella 4.11 - Coefficiente moltiplicativo C_e applicabile ai generatori di calore alimentati a biomassa con potenza superiore a 500 kW in relazione ai livelli di emissione di particolato primario. [29]	87
Tabella 4.12 - Emissioni in atmosfera per i generatori a biomassa di potenza termica nominale pari a 500 kW, misurati utilizzando le metodiche indicate nella 15 dell'Allegato I del Decreto (rif. 13% di O ₂). [29].....	87
Tabella 4.13 - Coefficienti di valorizzazione dell'energia termica prodotta da impianti solari termici. [29].....	89
Tabella 4.14 - Temperature medie di riferimento in relazione alla destinazione del calore prodotto. [29].....	89
Tabella 4.15 - Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e corrispondente valore massimo dell'incentivo [29].	91
Tabella 4.17 - Costi unitari massimi ammissibili e valore massimo erogabile per diagnosi energetiche ante intervento e certificazione energetica. [29].....	92
Tabella 6.1 - Zone dell'edificio A.	116
Tabella 6.2 - Riepilogo murature (Edificio A).	124
Tabella 6.3 - Tabella riepilogativa dei serramenti (edificio A).	136
Tabella 6.4 - Zone edificio B.....	142
Tabella 6.5 - Riepilogo murature edificio B.	142
Tabella 6.6 - Riepilogo pavimento edificio B.....	143

Tabella 6.7 - Riepilogo copertura edificio B.....	143
Tabella 6.8 - Riepilogo ponti termici edificio B.....	143
Tabella 6.9 - Riepilogo serramenti edificio B.....	144
Tabella 6.10 - Zone edificio C.	148
Tabella 6.11 - Riepilogo murature edificio C.....	149
Tabella 6.12 - Riepilogo pavimenti edificio C.	149
Tabella 6.13 - Riepilogo soffitti edificio C.....	149
Tabella 6.14 - Riepilogo ponti termici edificio C.	150
Tabella 6.15 - Riepilogo serramenti edificio C.	150
Tabella 6.16 - Principali indicatori energetici degli edifici.	154
Tabella 7.1 - Rendimenti di generazione pre e post intervento.....	163
Tabella 7.2 - Vettori energetici pre- e post-intervento.	167
Tabella 7.3 - Voci economiche per i tre edifici.	173
Tabella 7.4 - Riassunto linee guida.	178

Sommario

La presente tesi propone una metodologia per la valutazione integrata degli interventi di riqualificazione energetica nel settore industriale. L'obiettivo è sviluppare un approccio replicabile a supporto delle decisioni progettuali, basato sull'integrazione tra simulazione energetica del sistema edificio-impianto e analisi economico-finanziaria degli interventi. La metodologia è stata applicata a casi studio reali, localizzati nella medesima area geografica, così da escludere l'influenza delle variabili climatiche e operare in condizioni a contorno omogenee, analizzando scenari alternativi in termini di prestazioni energetiche ed esiti economici. L'analisi ha consentito di stimare i risparmi energetici conseguibili, i costi di intervento e la convenienza economica delle soluzioni, valutata attraverso il VAN, anche in relazione al meccanismo incentivante del Conto Termico 3.0, con l'obiettivo di individuare le condizioni di fattibilità e le principali criticità legate alla transizione energetica nel settore industriale. I risultati evidenziano come la transizione energetica possa tradursi in riduzioni dei consumi finali fino all'85% negli edifici con elevata dispersione dell'involucro, mentre nei casi più performanti i risparmi si attestano tra il 20% e il 30%, a conferma della dipendenza dalle condizioni iniziali del sistema edificio-impianto. Nel complesso, il lavoro individua linee guida operative per la progettazione degli interventi impiantistici, evidenziando la necessità di un approccio caso-specifico e di una valutazione integrata delle variabili energetiche, economiche e ambientali. In particolare, la trasmittanza termica media dell'involucro emerge come indicatore sintetico utile per orientare le scelte progettuali e massimizzare i benefici degli interventi, pur mantenendo un approccio caso-specifico.

Parole chiave: Edifici industriali, Efficienza, Decarbonizzazione, Simulazione edificio-impianto, Incentivi.

1 Introduzione

Negli ultimi anni il tema dell'efficienza energetica ha assunto un ruolo sempre più centrale all'interno delle politiche industriali, delle strategie aziendali e dei programmi di sviluppo economico, affermandosi come uno degli elementi chiave per affrontare le sfide poste dalla transizione energetica. Tale crescente attenzione è strettamente connessa alla progressiva consapevolezza delle criticità ambientali e alla necessità di ripensare i modelli di crescita tradizionali, orientandoli verso una gestione più razionale e responsabile delle risorse disponibili. In questo contesto, l'energia non può più essere considerata esclusivamente come un fattore produttivo da utilizzare in modo passivo, ma assume il ruolo di risorsa strategica, la cui gestione incide in modo diretto sulla sostenibilità economica, ambientale e organizzativa dei sistemi produttivi. Dal punto di vista tecnico, l'efficienza energetica può essere definita come un indicatore quantitativo della performance dei sistemi energetici. In particolare, secondo ENEA, «l'efficienza energetica di un dato processo, trasformazione, servizio, può definirsi come il rapporto tra l'effetto utile ottenuto (o prestazione erogata) e l'energia immessa in ingresso». Nel caso in cui l'effetto utile consista nell'erogazione di energia, «l'efficienza coincide con il rendimento della trasformazione associata in base al primo principio della termodinamica» [s1]. Per miglioramento dell'efficienza energetica si intende «un incremento dell'efficienza degli usi finali dell'energia, risultante da cambiamenti che possono essere sia tecnologici che comportamentali o economici» [s1], evidenziando come non vi sia una dipendenza esclusivamente dall'adozione di nuove tecnologie, ma anche da scelte gestionali, organizzative e comportamentali, capaci di ottimizzare il consumo e migliorare le prestazioni complessive dei sistemi.

L'adozione di soluzioni energeticamente efficienti consente di ottenere diversi benefici concreti e immediati, che interessano ambiti sia economici, ambientali sia sociali. Tra i principali vantaggi si hanno:

- la riduzione delle spese energetiche, con effetti diretti sui costi operativi e benefici indiretti quali l'aumento della competitività delle imprese e la mitigazione del rischio di povertà energetica;

- la diminuzione della domanda energetica complessiva a livello nazionale, con conseguente riduzione delle importazioni di energia e incremento della sicurezza legata agli approvvigionamenti;
- la riduzione della necessità di nuove infrastrutture di produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia, grazie alla progressiva riduzione del fabbisogno complessivo;
- la diminuzione delle emissioni climalteranti, con ricadute positive sia sulla qualità dell'aria sia sulla salute della popolazione;
- lo sviluppo di nuove filiere occupazionali nei settori industriali e dei servizi legati all'energia.

L'efficienza energetica si inserisce in un quadro più ampio di trasformazione dei modelli industriali, in cui la riduzione degli sprechi e l'ottimizzazione dei processi rappresentano obiettivi prioritari; a differenza di approcci basati unicamente sull'incremento dell'offerta energetica, l'efficienza consente di intervenire sulla domanda, migliorando le prestazioni dei sistemi esistenti e riducendo il fabbisogno complessivo di energia. Dal punto di vista gestionale, ciò si traduce nella possibilità di conseguire risparmi economici, migliorare l'affidabilità dei processi e ridurre l'esposizione ai rischi legati alla volatilità dei prezzi dell'energia e alle evoluzioni normative.

L'energia ha storicamente rappresentato uno dei principali fattori abilitanti dello sviluppo economico e industriale, influenzando profondamente l'organizzazione delle attività produttive e l'evoluzione dei modelli di business; la disponibilità di energia ha consentito l'aumento della produttività, la meccanizzazione dei processi e l'espansione dei sistemi industriali, rendendo tuttavia le economie moderne sempre più dipendenti da un approvvigionamento energetico continuo e affidabile. Nel tempo, la possibilità di trasformare l'energia in forme diverse e di ricavarla da fonti differenti ha ampliato le opportunità di utilizzo, ma ha anche contribuito ad aumentare la complessità del sistema energetico nel suo insieme, rendendo quindi necessaria una gestione sempre più strutturata e integrata. Con l'aumento dei consumi energetici e della pressione esercitata sui sistemi ambientali, sono emerse diverse criticità legate all'utilizzo intensivo delle fonti fossili;

difatti, l'esaurimento progressivo delle risorse, l'aumento delle emissioni climalteranti e l'inquinamento ambientale hanno reso necessario un cambiamento di prospettiva, spingendo istituzioni e imprese a interrogarsi sull'attuale sostenibilità dei modelli energetici.

Il concetto di sviluppo sostenibile inizia ad assumere, quindi, un ruolo centrale nel dibattito economico e industriale, introducendo una visione di lungo periodo nei processi decisionali; lo sviluppo sostenibile può essere interpretato come uno «sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri» [1]. Tale approccio richiede un bilanciamento tra obiettivi economici, ambientali e sociali, ponendo l'accento sulla necessità di integrare la sostenibilità all'interno delle strategie di sviluppo. In questo contesto, il sistema energetico rappresenta uno degli ambiti di intervento prioritari, in quanto fortemente interconnesso con le attività produttive, i consumi e l'impatto ambientale complessivo; quando si parla di sistema energetico, la scelta delle fonti e delle tecnologie associate è influenzata dalla qualità dell'energia prodotta, valutabile sulla base di diversi fattori che assumono rilevanza anche dal punto di vista gestionale. Tra questi si possono individuare:

- la disponibilità e l'affidabilità dell'approvvigionamento energetico;
- la flessibilità di utilizzo nei diversi contesti applicativi;
- la facilità di integrazione con infrastrutture e sistemi esistenti;
- l'impatto sui costi operativi e sugli investimenti;
- il grado di adattabilità del sistema a possibili futuri sviluppi tecnologici e normativi.

Negli ultimi anni il consumo energetico globale ha continuato a crescere, secondo l'International Energy Agency (IEA, 2025), nel 2024 la domanda mondiale di energia è aumentata del 2.2% (rispetto ad una crescita media dell'ultimo decennio pari all'1.3% annuo), principalmente a causa della maggiore elettrificazione dei settori residenziale e industriale e dell'impiego crescente di tecnologie digitali, come data center e intelligenza artificiale. La domanda di elettricità, in particolare, è cresciuta del

4,3%, segnando l'incremento più alto mai registrato fino ad oggi, trainata dall'uso crescente di climatizzazione, pompe di calore e veicoli elettrici.

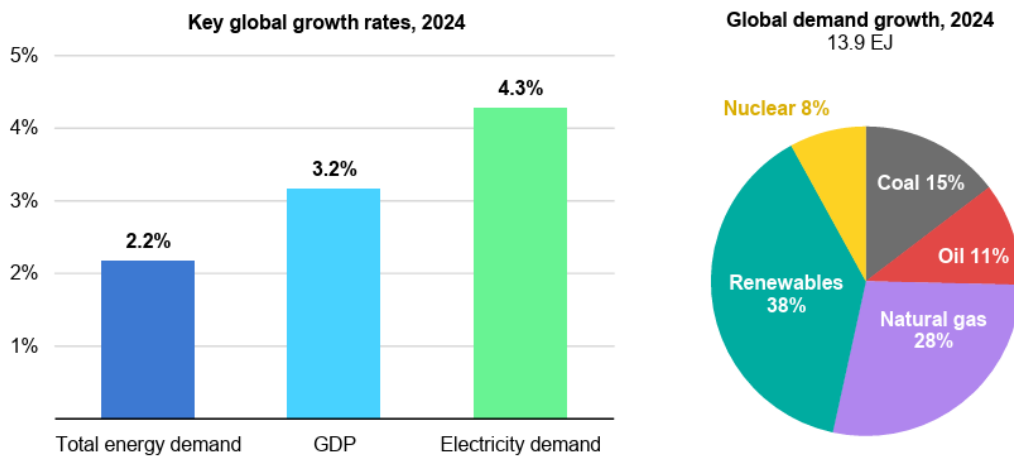


Figura 1.1 - Principali tassi di crescita globali e quota di crescita della domanda di energia per fonte, 2024 [s2].

Nonostante la crescita dei consumi, le fonti rinnovabili stanno assumendo un ruolo sempre più rilevante, difatti, la quota di energia globale fornita da fonti rinnovabili e nucleare rappresenta, ad oggi, oltre la metà dell'incremento della produzione elettrica, sebbene i combustibili fossili rimangano la fonte principale a livello mondiale, confermando una forte dipendenza strutturale.

A livello europeo, i dati forniti da Eurostat (2023) [s3] indicano un consumo finale di energia pari a circa 36.566 PJ, con un calo del 3.3% rispetto all'anno precedente, dove il settore dei trasporti risulta essere il principale consumatore (32%), seguito dalle famiglie (26%) e dal settore industriale (25%).

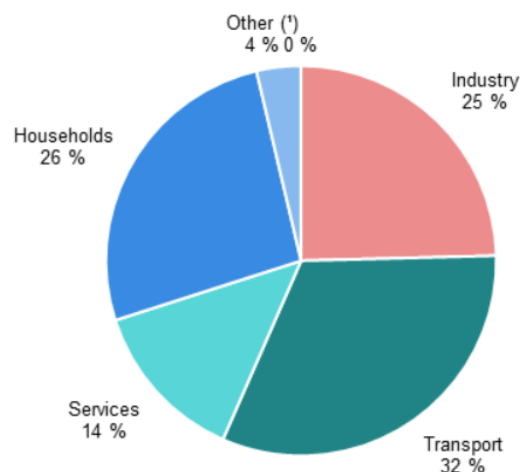


Figura 1.2 - Consumo finale di energia per settore, UE 2023 [s3].

Dando uno sguardo a ciò che succede a livello nazionale, nel corso degli ultimi due decenni, il consumo di energia ha subito un'evoluzione significativa, osservando un progressivo decremento a seguito del raggiungimento del livello massimo nel 2005. Questo trend è stato accentuato da eventi economici e sociali quali la crisi globale tra il 2009 e il 2014 e la pandemia di COVID-19 nel 2020; nel periodo successivo, infatti, il consumo energetico primario ha mostrato una diminuzione di circa -1.5% annuo, mentre il consumo finale è diminuito di circa -1.2% annuo, indicando una riduzione complessiva dell'energia richiesta dal sistema economico e sociale in Italia [s4]. Nel 2023 il Paese ha consumato circa 134.8 Mtep di energia primaria e 118.7 Mtep di energia finale, valori che rappresentano un calo rispetto ai livelli storici e che devono essere confrontati con gli obiettivi europei per il 2030 fissati nell'ambito delle strategie europee, secondo i quali l'Italia dovrebbe raggiungere un consumo di circa 111 Mtep di energia primaria e 93 Mtep di energia finale entro il 2030 [s4].

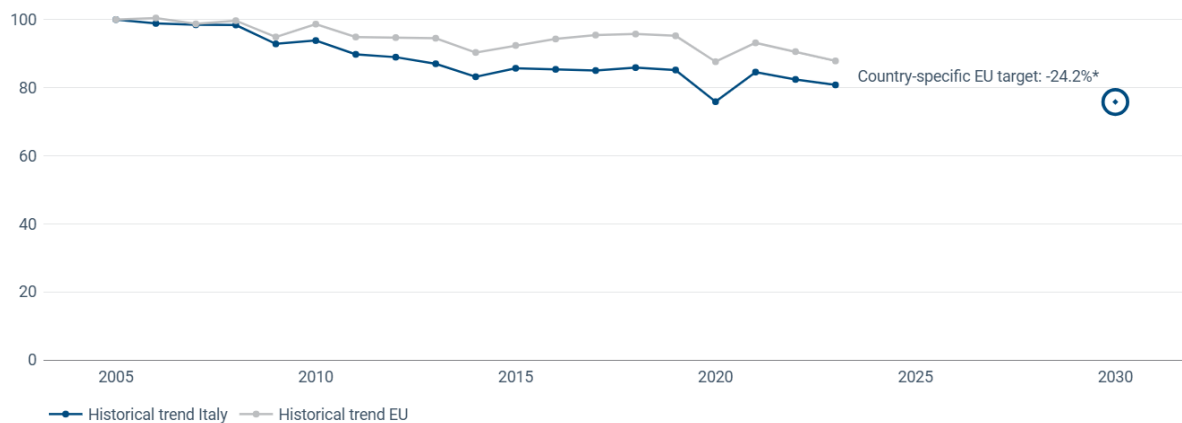


Figura 1.3 - Consumo energetico per fonte, Italia 2023-2025 [s4]

Per quanto riguarda il contributo delle fonti rinnovabili al mix energetico italiano, il profilo nazionale della European Environment Agency (EEA) indica che la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia ha raggiunto 19.6% nel 2023, calcolata secondo la metodologia stabilita dalla Direttiva (UE) 2018/2001¹ [s4]. Questo valore rappresenta un sensibile aumento rispetto ai livelli di inizio secolo (intorno al 7.5% nel 2005) e riflette la crescita soprattutto delle fonti rinnovabili nel settore elettrico e nel riscaldamento/raffrescamento [s4].

¹ Direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018 (in Gazzetta ufficiale dell'Unione europea - L 328, 21 dicembre 2018) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.

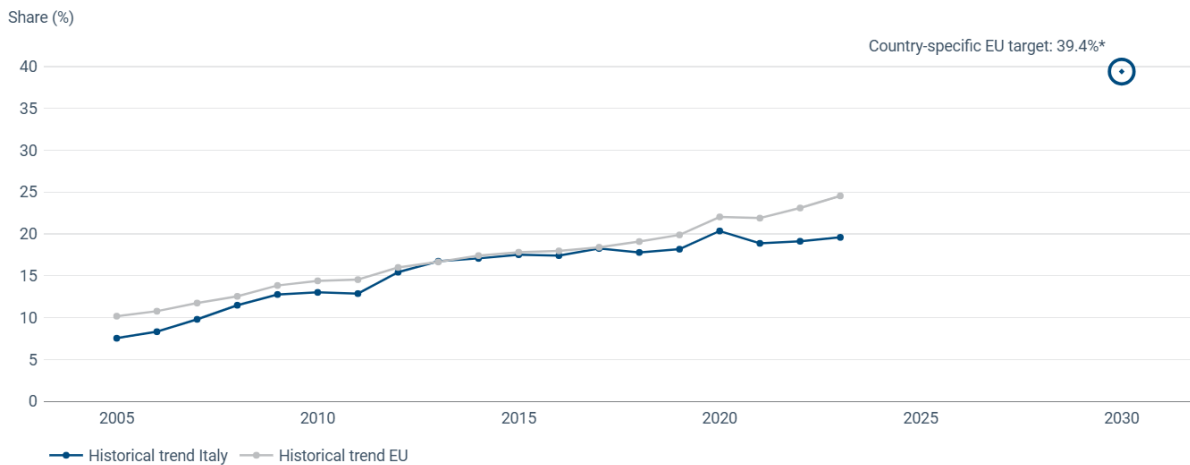


Figura 1.4 - Quota delle fonti energetiche rinnovabili sul consumo finale di energia, Italia 2005-2023 (%) [s4].

Nel complesso, l'analisi evidenzia una situazione caratterizzata da un equilibrio ancora fragile: da un lato emerge con chiarezza l'urgenza di contenere gli impatti ambientali legati all'uso dell'energia, dall'altro permane una forte dipendenza dalle fonti fossili, che d'altro canto continuano a garantire stabilità e continuità nella copertura della domanda. In questo contesto, il miglioramento delle prestazioni energetiche rappresenta uno strumento concreto e immediatamente attuabile per limitare i consumi e le emissioni, contribuendo al percorso di transizione verso un sistema più sostenibile.

1.1 Motivazioni della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio nel contesto europeo e nazionale

Ed è proprio in questo contesto che la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio rappresenta una delle principali leve strategiche per il conseguimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale, sicurezza energetica e sviluppo economico a livello globale. Tale importanza deriva dal ruolo essenziale che il settore edilizio riveste negli attuali sistemi energetici, in quanto responsabile di una quota considerevole dei consumi finali di energia e delle emissioni di gas ad effetto serra, oltre che essere caratterizzato da una marcata inerzia tecnologica e da una lunga vita utile degli edifici. Secondo i dati ufficiali delle Commissione Europea, il settore edilizio è responsabile di circa il 40% dei consumi energetici finali e di circa il 36% sulle emissioni di CO_2 legate all'utilizzo dell'energia a livello europeo [s5]; questi

valori, se confrontati con quelli di altri settori, rendono evidente come gli edifici rappresentino uno dei principali ambiti di intervento per la riduzione dell'impatto ambientale complessivo del sistema energetico. Inoltre, c'è da notare che il potenziale di riduzione dei consumi è più elevato, grazie alla possibilità di intervenire sia sull'involucro edilizio che sui sistemi impiantistici, con effettivi sinergici sulla domanda energetica complessiva. Il ruolo del settore edilizio nella transizione energetica trova riconoscimento nei principali quadri strategici adottati a livello internazionale, come l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile adottata dalle Nazioni Unite nel 2015; essa integra gli obiettivi ambientali, economici e sociali attraverso 17 *Sustainable Development Goals* (SDGs), dove l'efficacia degli interventi di riqualificazione si manifesta in modo particolare attraverso i seguenti tre obiettivi [s6]:

- L'SDG 7, dedicato all'energia pulita e accessibile, evidenzia l'importanza di aumentare l'efficienza energetica globale, considerando la riduzione della domanda una condizione essenziale per la sostenibilità dei sistemi energetici. In questo quadro, la riqualificazione degli edifici, soprattutto in Paesi con patrimonio edilizio maturo e energivoro, e lo sviluppo delle fonti rinnovabili rappresentano strumenti complementari ed efficaci per ridurre i consumi e garantire energia sostenibile a basse emissioni;
- l'SDG 11 punta a rendere le città più inclusive, sicure e sostenibili, individuando nella riqualificazione del patrimonio esistente una delle strategie per soddisfare le necessità abitative senza sottrarre terreno naturale al territorio; intervenire sul patrimonio esistente significa anche migliorare la sicurezza, in quanto un edificio riqualificato oltre che ad essere più efficiente è anche più solido e capace di proteggere i suoi abitanti da eventuali eventi climatici estremi, e soprattutto significa rigenerare un tessuto urbanistico datato, eliminando degrado e aumentando la qualità della vita;
- nell'SDG 13, definito "agire per il clima", viene poi mostrato come la riqualificazione consenta di preservare il carbonio incorporato, ovvero l'energia già spesa in passato per produrre materiali ad alto impatto come cemento e acciaio, evitando emissioni legate alla loro nuova produzione e al

trasporto; questo approccio permette di combinare la conservazione delle risorse fisiche con l'abbattimento dei consumi operativi.

Accanto all'Agenda 2030, si ha l'Accordo di Parigi sul clima, adottato anch'esso dal 2015, che ha introdotto un quadro giuridico vincolante per la riduzione delle emissioni climalteranti a livello globale; l'Accordo stabilisce l'obiettivo di contenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, col fine di limitarlo a circa 1.5°C [s7], richiedendo quindi la trasformazione profonda dei sistemi energetici di tutti quei settori ad alta intensità energetica. Nel settore edilizio, le implicazioni dell'Accordo di Parigi risultano significative, in quanto la lunga vita utile degli edifici comporta che le scelte progettuali e tecnologiche adottate oggi influenzeranno i consumi e le emissioni per decenni, portando alla necessità di intervenire in modo prioritario sul patrimonio edilizio esistente. Nel contesto europeo, tali indirizzi globali sono stati tradotti in una strategia articolata attraverso il Green Deal Europeo, presentato dalla Commissione nel 2019, che costituisce una vera e propria strategia di crescita orientata al raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 [s8]. All'interno di tale quadro, l'efficienza energetica si configura come uno dei pilastri fondamentali, con obiettivi principali la riduzione della domanda di energia, l'aumento della sicurezza degli approvvigionamenti e il contenimento dell'impatto ambientale complessivo. In questo contesto si inserisce la strategia della "Renovation Wave", che nasce dalla consapevolezza che il tasso di ristrutturazione del patrimonio edilizio europeo, storicamente inferiore all'1% annuo, risulta insufficiente per il conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione [s9]. Tale strategia mira non solo ad aumentare il numero degli interventi, ma anche a migliorarne la qualità, promuovendo riqualificazione energetiche capaci di ridurre in modo significativo i fabbisogni energetici degli edifici e di favorire progressivamente l'integrazione delle fonti rinnovabili.

La centralità della riqualificazione del patrimonio edilizio esistente è ulteriormente confermata dall'analisi della struttura anagrafica del parco edilizio europeo, dove circa l'85% degli edifici attualmente in uso è stato costruito prima degli anni 2000, mentre oltre il 75% presenta prestazioni energetiche inferiori agli standard attuali, in

quanto realizzati prima dell'introduzione di normative più stringenti sul contenimento dei consumi energetici [s5]. Considerando, in media, che oltre il 90% degli edifici esistenti sarà ancora in uso nel 2050, è evidente come la via della riqualificazione energetica rappresenti una strategia efficace per ridurre l'impatto del settore edilizio nel medio e lungo periodo.

Anche nel contesto nazionale, le criticità legate all'efficienza energetica del patrimonio edilizio risultano accentuate delle caratteristiche strutturali e anagrafiche degli edifici, che interessano sia il settore residenziale sia quello non residenziale; sebbene il comparto residenziale rappresenti la quota più consistente del nostro parco edilizio, quello non residenziale assume un ruolo strategico dal punto di vista energetico in quanto caratterizzato da consumi specifici elevati. Secondo i dati elaborati dall'ENEA, il patrimonio edilizio italiano comprende circa 12.4 milioni di edifici residenziali e circa 1.7 milioni di edifici non residenziali, la maggior parte dei quali è stata costruita prima dell'entrata in vigore della Legge n. 373/1976², che ha introdotto per la prima volta in Italia criteri di contenimento dei consumi energetici negli edifici [s10]. Dal punto di vista energetico, il settore non residenziale presenta consumi finali complessivi inferiori rispetto a quello residenziali, ma è caratterizzato da intensità energetiche più elevate, legate sia alle caratteristiche tipologiche degli edifici sia alla presenza di impianti e processi produttivi ad alto fabbisogno energetico. Secondo i bilanci energetici nazionali, gli edifici non residenziali contribuiscono in modo significativo ai consumi di energia per climatizzazione, illuminazione e servizi ausiliari, rendendo la riqualificazione energetica di tali strutture un ambito di intervento prioritario non solo dal punto di vista ambientale, ma anche in un'ottica di riduzione dei costi operativi e di miglioramento della competitività del sistema produttivo nazionale [s10].

In tale contesto si inserisce anche il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) [2], che rappresenta lo strumento di pianificazione attraverso il quale l'Italia declina a livello nazionale gli obiettivi proposti a livello europeo. L'aggiornamento del PNIEC, trasmesso alla Commissione Europea nel 2023,

² Legge 30 marzo 1976, n. 373: "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici".

individua nell'efficienza energetica uno degli assi portanti della strategia nazionale, attribuendo un ruolo centrale alla riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, sia residenziale che non residenziale. Per quanto riguarda il settore non residenziale, si riconosce esplicitamente l'elevato potenziale di riduzione dei consumi energetici attraverso interventi sull'involucro edilizio, sugli impianti di climatizzazione, sull'illuminazione e sui sistemi di gestione e controllo dei consumi. Tali interventi risultano strategici permettono:

- il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra;
- per il contenimento della domanda energetica;
- per il miglioramento della competitività del sistema produttivo nazionale.

Il PNIEC sottolinea inoltre come il conseguimento degli obiettivi al 2030 richieda un'accelerazione significativa degli investimenti in efficienza energetica nel settore produttivo; per questo, il Piano promuove strumenti normativi, finanziari e fiscali in grado di favorire la riqualificazione energetica degli edifici a servizio delle imprese.

1.2 Obiettivi della tesi e struttura dell'elaborato

La presente tesi si propone di sviluppare un approccio ingegneristico strutturato alla sostituzione degli impianti energetici in edifici industriali, con l'obiettivo di fornire un metodo di analisi replicabile, in grado di valutare in maniera integrata gli effetti degli interventi in termini di efficienza energetica, riduzione delle emissioni climalteranti e economici, in coerenza con le attuali esigenze di sostenibilità e transizione energetica nel settore industriale.

L'obiettivo principale consiste nell'elaborazione di un framework metodologico che superi la logica del singolo caso applicativo risultando applicabile a più edifici industriali caratterizzati da differenti configurazioni impiantistiche e differenti profili di consumo, consentendo così la standardizzazione dell'approccio. Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito di un tirocinio curriculare presso More Energy S.r.l., società italiana specializzata in consulenza energetica, diagnosi energetiche e progettazione di interventi di efficientamento; l'esperienza di tirocinio ha

rappresentato un elemento centrale nello sviluppo della tesi, permettendo di operare su casi reali e di applicare metodologie professionali comunemente utilizzate nel contesto della consulenza energetica. Le attività svolte hanno incluso l'analisi del sistema edificio-impianto, la modellazione energetica e la valutazione degli effetti degli interventi di sostituzione impiantistica, con obiettivo finale quello di costruire un metodo di analisi solido e coerente con la pratica progettuale. La valutazione energetica è stata supportata da strumenti di simulazione avanzata, quali Edilclima, software impiegato per la modellazione integrata dell'edificio e dei sistemi impiantistici, per la stima dei fabbisogni energetici e per l'analisi degli effetti di eventuali interventi di miglioramento; a supporto, è stato utilizzato il software IRIS per l'analisi dei ponti termici mediante il metodo degli elementi finiti, consentendo una rappresentazione accurata dei flussi di calore e una stima più accurata delle perdite energetiche complessive. In questo contesto, la tesi si concentra sull'analisi di tre edifici industriali selezionati come casi studio, caratterizzati da differenti tipologie impiantistiche e profili di consumo, sui quali è stata effettuata la sostituzione degli impianti. Su uno degli edifici è stata condotta una modellazione energetica dettagliata, finalizzata alla rappresentazione delle condizioni pre e post intervento, mentre gli altri due edifici sono stati utilizzati come casi di confronto, con l'obiettivo di verificare la coerenza dei risultati ottenuti e dimostrare la robustezza e la replicabilità del metodo proposto.

Un ulteriore obiettivo dell'elaborato è l'integrazione, all'interno della valutazione complessiva, degli aspetti legati ai meccanismi di incentivazione, con riferimento al Conto Termico 3.0, al fine di analizzare il ruolo degli incentivi nel supporto alla diffusione degli interventi di sostituzione impiantistica nel settore industriale. L'approccio tecnico-economico, combinato alla modellazione dettagliata, consente quindi una valutazione completa dei benefici energetici, ambientali ed economici, fornendo strumenti utili per decisioni progettuali in ambito industriale.

La struttura dell'elaborato è pensata per accompagnare il lettore attraverso un percorso logico e progressivo, che dall'inquadramento generale del tema conduce alla definizione e all'applicazione del metodo di analisi e alla discussione dei risultati. Il Capitolo 1 introduce, appunto, il tema della riqualificazione energetica del

patrimonio edilizio inquadrandolo nel contesto europeo e nazionale. In particolare, vengono analizzate le principali motivazioni che rendono prioritari gli interventi di efficientamento energetico, con riferimento al ruolo del settore edilizio nella transizione energetica.

Il Capitolo 2 è dedicato al quadro normativo per l'efficienza energetica degli edifici ed analizza dapprima la normativa europea di riferimento, per poi esaminare il recepimento a livello nazionale e, infine, il quadro normativo regionale della Regione Emilia-Romagna.

Il Capitolo 3 fornisce i fondamenti tecnico-ingegneristici del sistema edificio-impianto necessari alla comprensione delle analisi successive; in questo capitolo vengono richiamati i concetti di trasmittanza termica dell'involucro, ponti termici, fabbisogni energetici per il riscaldamento, il raffrescamento e l'acqua calda sanitaria e le prestazioni dei sistemi impiantistici.

Successivamente, nel Capitolo 4, vengono approfonditi gli strumenti di incentivazione per l'efficientamento energetico, con riferimento al ruolo del Conto Termico 3.0. Il capitolo descrive gli interventi ammissibili, i soggetti coinvolti, i requisiti e le modalità di accesso all'incentivo, unitamente alla quantificazione ed erogazione del contributo; vengono inoltre analizzati il contingente annuo di spesa, la cumulabilità con altri incentivi e, infine, le modalità di calcolo dell'incentivo.

Nel Capitolo 5 vengono descritti i software utilizzati durante la modellazione edificio-impianto e inquadrati i tre edifici industriali oggetto di analisi, questo attraverso la descrizione della tipologia edilizia e destinazione d'uso e del contesto energetico; successivamente nel Capitolo 6 si proseguirà con l'analisi dello stato di fatto dei casi studio, con la caratterizzazione delle soluzioni costruttive e impiantistiche esistenti.

Il Capitolo 7 è dedicato alla descrizione delle soluzioni di intervento implementate e alla presentazione dei risultati derivanti dalle analisi energetiche comparative tra stato di fatto e di progetto, nonché le valutazioni economiche degli interventi in assenza e in presenza degli incentivi del Conto Termico 3.0; il capitolo si conclude con una valutazione ambientale pre- e post-intervento.

Il Capitolo 8 propone poi un confronto trasversale tra i casi di studio analizzati, attraverso un'analisi comparativa degli indicatori energetici ed economici e una

valutazione dell'impatto del Conto Termico 3.0 sui risultati economici ottenuti; a conclusione del capitolo si ha un'analisi di sensitività e un'analisi SWOT delle strategie di retrofit impiantistico adottate.

Per concludere, il Capitolo 9 conclude l'elaborato con una sintesi critica dei risultati ottenuti, discutendo le principali implicazioni per il processo decisionale in ambito industriale, i limiti dell'approccio adottato e i possibili sviluppi futuri della ricerca.

2 Quadro normativo

Il quadro normativo per l'efficienza energetica degli edifici definisce un insieme di regole, criteri di valutazione e strumenti operativi volti a disciplinare la progettazione, la verifica e la riqualificazione energetica del sistema edificio-impianto. Tale quadro si è sviluppato progressivamente nel tempo, attraverso un processo di armonizzazione a livello europeo e di recepimento a livello nazionale, nonché regionale, dando luogo ad un sistema articolato e in continua evoluzione. La comprensione di tale contesto risulta, quindi, essenziale per l'interpretazione delle metodologie di calcolo e delle scelte progettuali analizzate nel presente lavoro.

2.1 Normativa europea in materia di efficienza energetica

La costruzione della normativa europea in materia di efficienza energetica degli edifici nasce dalla necessità di affrontare il tema dei consumi energetici in tale settore, caratterizzato da una forte eterogeneità delle regolamentazioni nazionali e dall'assenza di criteri comuni di valutazione delle prestazioni. In questo contesto, l'obiettivo iniziale dell'Unione Europea è quello di definire una visione condivisa, in grado di rendere le prestazioni energetiche degli edifici confrontabili e di orientare il mercato verso standard sempre più elevati.

La Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio dell'Unione Europea [3], anche nota come *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*, costituisce il primo quadro normativo organico europeo in materia di rendimento energetico degli edifici, con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici e le emissioni climalteranti. La Direttiva si inserisce nel più ampio contesto delle politiche comunitarie di contrasto ai cambiamenti climatici, in coerenza con gli impegni assunti con il Protocollo di Kyoto³ e con l'esigenza di garantire un approvvigionamento energetico sicuro e sostenibile. A tal fine, l'Unione Europea individua due linee strategiche principali: il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici, volto a

³ Accordo internazionale adottato l'11 dicembre 1997 nell'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), entrato in vigore il 16 febbraio 2005, che imponeva ai Paesi industrializzati la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 5% rispetto ai livelli del 1990.

ridurre la domanda di energia, e la promozione dell'utilizzo delle fonti rinnovabili, volto alla riduzione dell'impatto ambientale dovuto alle attività antropiche. L'EPBD stabilisce che il miglioramento delle prestazioni energetiche debba avvenire tenendo in considerazione le condizioni climatiche esterne, il comfort degli ambienti interni e l'equilibrio costi-benefici, lasciando agli stati membri la libertà nell'utilizzo di strumenti applicativi. La Direttiva individua alcuni punti chiave a cui i Paesi sono tenuti a conformarsi, tra questi troviamo la definizione di una metodologia di calcolo della prestazione energetica degli edifici, la quale viene definita come la quantità di energia necessaria a soddisfare i diversi fabbisogni legati all'utilizzo dell'edificio, quali il riscaldamento, il raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria e l'illuminazione; tale valutazione tiene conto delle caratteristiche dell'involucro e degli impianti, il livello di isolamento termico, la progettazione complessiva, la localizzazione geografica e le condizioni climatiche, nonché l'eventuale autoproduzione di energia. Nonostante non venga individuata una metodologia di calcolo univoca, lasciando l'opportunità di stabilirla a livello nazionale o regionale, la Direttiva richiede che i risultati vengano espressi in modo chiaro, includendo dati sulle emissioni di CO_2 , e prevedendo aggiornamenti periodici. Un altro aspetto importante riguarda l'introduzione di requisiti minimi da rispettare, sia per edifici di nuova costruzione che per edifici di grandi dimensioni soggetti a ristrutturazioni rilevanti. Nella Direttiva viene, inoltre, introdotto l'obbligo di certificazione energetica per tutti gli edifici, ad esclusione degli edifici industriali e ad uso agricolo, che consiste nella redazione di un documento destinato a fornire informazioni comparabili sulla prestazione energetica degli edifici e sugli interventi migliorativi possibili, da rendere disponibile ai proprietari, acquirenti e locatari; pone inoltre l'accento sui soggetti incaricati della certificazione e delle ispezioni, i quali devono essere qualificati e con sistemi di riconoscimento e controllo definiti dagli stati membri e, in molti casi, dalle autorità regionali. L'ultimo punto da seguire riguarda, infine, l'ispezione periodica degli impianti di riscaldamento e condizionamento presenti all'interno degli edifici.

In coerenza con il rafforzamento degli obiettivi climatici europei, l'EPBD viene sostituita integralmente con la Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del

Consiglio [4], con l'obiettivo di orientare in modo più deciso gli stati membri verso strategie di efficientamento energetico nel settore edilizio; la Direttiva non rappresenta solo un aggiornamento della precedente, ma una necessità di adattamento agli obiettivi europei in materia di risparmio energetico e riduzione delle emissioni climalteranti sanciti sia dalla Direttiva 2009/29/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, sia dal Pacchetto Clima-Energia 20-20-20⁴. Essa pone innanzitutto l'obbligo di adozione di metodologie condivise per il calcolo e la certificazione energetica, l'innalzamento progressivo delle prestazioni energetiche degli edifici attraverso l'introduzione di requisiti minimi più stringenti, applicabili sia ad edifici di nuova costruzione sia ad edifici oggetto di interventi rilevanti; in questo contesto viene esteso l'ambito di applicazione dei requisiti a tutte le unità immobiliari sottoposte a ristrutturazioni importanti o interventi di sostituzione degli impianti tecnici, ponendo l'accento su come la Direttiva stia rafforzando la sua efficacia anche sul patrimonio edilizio esistente. Inoltre, l'adozione di criteri di valutazione basati sul confronto dell'edificio oggetto d'esame con un edificio di riferimento con caratteristiche standard vengono introdotti al fine di rendere le valutazioni più oggettive e confrontabili, tenendo sempre più conto delle condizioni climatiche locali e l'impatto che può portare la climatizzazione estiva (fino ad allora poco considerata). L'elemento più innovativo introdotto è sicuramente il concetto di edificio ad energia quasi zero (*nearly Zero Energy Building* - nZEB), definito come un edificio ad alte prestazioni energetiche, caratterizzato da bassi fabbisogni e coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili, disponibile in loco o comunque nelle vicinanze, e destinato a diventare il nuovo standard per le nuove costruzioni; difatti, vengono sanciti i termini entro i quali gli edifici devono conformarsi ai requisiti nZEB, ovvero il 31 dicembre 2018 per gli edifici pubblici di nuova costruzione e il 31 dicembre 2020 per tutti le altre tipologie di edifici di nuova costruzione, in modo tale da promuovere una progressiva trasformazione del parco edilizio europeo. La Direttiva lascia comunque libertà alle autorità nazionali per quanto riguarda la

⁴ Il programma stabilito dall'Unione Europea con orizzonte al 2020 mirava a contrastare il cambiamento climatico, migliorare la sicurezza degli approvvigionamenti energetici e rendere l'economia più competitiva; gli obiettivi principali erano tre: tagliare del 20% le emissioni di gas serra, aumentare del 20% l'efficienza energetica e portare al 20% la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili.

definizione di parametri tecnici per la classificazione degli edifici Nzeb, al fine di garantire un'applicazione coerente in base alle specificità territoriali, climatiche ed economiche di ciascun Paese; parallelamente, viene precisato il concetto di "ristrutturazione importante", già citato nella versione precedente, identificato per edifici con superficie maggiore di 1000 m², ed ora chiarito sulla base dei seguenti criteri economici e dimensionali:

- «il costo complessivo della ristrutturazione per quanto riguarda l'involucro dell'edificio o i sistemi tecnici per l'edilizia supera il 25% del valore dell'edificio, escluso il valore del terreno sul quale questo è situato» [4];
- «la ristrutturazione riguarda più del 25% della superficie dell'involucro dell'edificio» [4].

Infine, per favorire la diffusione degli edifici nZEB e l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili, la Direttiva incoraggia ad attivare strumenti di sostegno finanziario a livello sia nazionale che regionale, programmi di formazione e certificazione per le figure professionali coinvolte ed iniziative sensibilizzazione per i cittadini.

La Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio [5], nota come Energy Efficiency Directive (EDD), rappresenta un passaggio fondamentale nel consolidamento della politica europea in materia di efficienza energetica, ponendosi come strumento trasversale rispetto alle precedenti normative; la sua adozione risponde all'esigenza di definire un nuovo quadro di riferimento per il periodo successivo al 2020 e di orientare le politiche dei vari Stati verso obiettivi di medio-lungo termine, con particolare attenzione al 2030. In tale prospettiva, l'efficienza energetica viene vista come leva strategica per la riduzione dei consumi, il contenimento delle emissioni e il rafforzamento della competitività economica. La Direttiva introduce come obiettivo il miglioramento dell'efficienza energetica pari al 32.5% entro il 2030, definito in relazione ai consumi energetici primari stimati dagli scenari di riferimento europei, ed affida agli stati membri il conseguimento di questo obiettivo mediante l'adozione di regimi obbligatori di risparmio energetico o di misure alternative equivalenti. In questo quadro, viene data importanza ai distributori

e ai venditori di energia, ai quali viene richiesto di garantire un incremento annuo dei risparmi energetici pari all'1.5%, configurando così un meccanismo strutturale di riduzione dei consumi che dovrebbe produrre effetti sia nel settore industriale che edilizio. Un ulteriore elemento introdotto riguarda il rafforzamento degli strumenti di analisi e monitoraggio dei consumi energetici, attraverso l'obbligo di effettuare audit energetici per le grandi imprese e la promozione volontaria di tali pratiche presso piccole e medie imprese; la Direttiva sollecita, inoltre, gli Stati membri a predisporre adeguati strumenti finanziari per sostenere gli interventi di efficientamento, programmi di formazione, sistemi di certificazione delle competenze professionali e iniziative di sensibilizzazione verso operatori e cittadini, nei quali si riscontra un ruolo chiave per il raggiungimento degli obiettivi preposti.

La Direttiva 2018/844/UE del Parlamento europeo e del Consiglio [6] va a modificare sia la Direttiva del 2010/31/UE che la Direttiva 2012/27/UE, collocando la prestazione energetica degli edifici all'interno della strategia europea di decarbonizzazione, con obiettivo principale quello di trasformare progressivamente il patrimonio edilizio esistente in un parco immobiliare ad alta efficienza energetica e basse emissioni climalteranti, coerentemente con gli obiettivi europei fissati per il 2030 e il 2050. In tale prospettiva, la si introduce l'obbligo per gli Stati Membri di definire strategie di lungo termine per la ristrutturazione degli edifici pubblici e privati, promuovendo interventi di riqualificazione profonda e graduale, che siano sostenibili e orientati alla riduzione delle emissioni climalteranti; rafforza, inoltre, il sistema dei requisiti minimi di prestazione energetica per edifici nuovi ed edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione importante, valorizza il ruolo degli attestati di prestazione energetica (APE) come strumenti di trasparenza e consapevolezza per cittadini e operatori, e prevede l'integrazione negli edifici di impianti tecnici intelligenti, sistemi di automazione e infrastrutture per la ricarica dei veicoli elettrici. La Direttiva promuove anche sistemi alternativi ad alta efficienza, l'uso delle fonti energetiche rinnovabili, la valutazione della fattibilità tecnico-economica degli interventi prima dell'avvio dei lavori, e sottolinea l'esigenza di garantire un equilibrio tra costi e benefici per la collettività, tenendo conto delle condizioni climatiche locali e dell'efficacia sotto il profilo dei costi, incentivando meccanismi di sostegno

proporzionati ai risparmi energetici conseguiti, contribuendo così alla creazione di un sistema energetico più competitivo, sicuro e a basse emissioni di carbonio.

Nel 2023 la normativa europea sull'efficienza energetica viene rafforzata con l'adozione della Direttiva 2023/1791/UE del Parlamento europeo e del Consiglio [7], che rifonde e sostituisce la Direttiva 2012/27/UE; questo intervento normativo si colloca nel quadro della strategia europea del Green Deal e del Pacchetto Fit for 55. Al centro della Direttiva vi è il principio dell'"Energy Efficiency First", ad ora formalizzato come criterio guida vincolante per le decisioni di politica energetica e climatica, in quanto ora qualsiasi scelta normativa o di investimento deve prendere in considerazione prioritariamente le soluzioni di efficienza, in modo tale da evitare investimenti non necessari. Parallelamente la Direttiva stabilisce un obiettivo vincolante di riduzione dei consumi energetici pari a circa l'11% entro il 2030 rispetto allo scenario di riferimento del 2020, traducendo così in impegni giuridici quello che era il precedente orientamento politico. Particolare rilievo assume il settore pubblico, il quale è tenuto a ridurre annualmente i propri consumi energetici dell'1.9% con ritmi crescenti fino al 2030 e a ristrutturare ogni anno almeno il 3% della superficie coperta totale degli edifici di proprietà pubblica, al fine di migliorarne la prestazione energetica. Un ulteriore elemento di rilievo riguarda il potenziamento delle misure di sostegno e di finanziamento nazionali e regionali per superare barriere tecniche e sociali e promuovere investimenti nell'efficienza energetica, nonché l'attenzione alla riduzione della povertà energetica attraverso azioni mirate di informazione, assistenza tecnica ai consumatori e meccanismi di tutela. Per quanto riguarda le imprese, una delle principali innovazioni è il passaggio da obblighi basati sulla dimensione dell'impresa a criteri basati sui consumi energetici effettivi, prevedendo la diagnosi energetica obbligatoria per le imprese con consumi oltre i 10 TJ annui e l'adozione di sistemi di gestione dell'energia conformi alla ISO 50001⁵ per quelle oltre gli 85 TJ, con scadenze rispettivamente fissate all'11 ottobre 2026 e all'11 ottobre 2027. Gli stati membri sono comunque chiamati a promuovere l'efficienza energetica anche

⁵ UNI CEI EN ISO 50001:2018: "Sistemi di gestione dell'energia – Requisiti e linee guida per l'uso"; norma che definisce i requisiti per creare, attuare, mantenere e migliorare un sistema di gestione dell'energia (SGE), al fine di conseguire un miglioramento continuo della propria prestazione energetica e dello stesso SGE. [31]

tra le piccole e medie imprese non obbligate, mediante misure di sostegno tecnico e finanziario volte a coprire i costi degli audit e a favorire l'accesso agli investimenti, riconoscendo il ruolo strategico delle PMI nel raggiungimento degli obiettivi fissati. Il quadro proposto si estende poi ad ulteriori ambiti, tra cui il teleriscaldamento efficiente, la cogenerazione ad alto rendimento e, in particolare, i data center, per i quali sono previsti obblighi di monitoraggio e comunicazione periodica dei consumi per le infrastrutture di maggiore potenza, al fine di migliorare la trasparenza e la disponibilità di dati a livello europeo.

Infine, nel 2024, il quadro normativo europeo sulla prestazione energetica degli edifici viene rinnovato con l'adozione della Direttiva 2024/1275/UE del Parlamento europeo e del Consiglio [8], che rappresenta una revisione della precedente EPBD; la Direttiva è entrata in vigore il 28 maggio 2024 e dovrà essere recepita entro il 29 maggio 2026, rappresentando un punto fondamentale per la trasformazione del patrimonio edilizio europeo, ponendo al centro la decarbonizzazione e la modernizzazione del parco edilizio. Viene introdotto il concetto di edificio a zero emissioni (*Zero-Emission Building* o ZEB), destinato a sostituire progressivamente lo standard nZEB, in quanto definisce un criterio più stringente di sostenibilità, imponendo prestazioni energetiche elevate e assenza di emissioni di CO_2 da combustibili fossili in sito, coprendo i loro fabbisogni energetici tramite energie da fonti rinnovabili e tecnologie efficienti. La nuova normativa stabilisce che i nuovi edifici pubblici dovranno essere a emissioni zero a partire dal 2028, le nuove costruzioni dal 2030, determinando un innalzamento progressivo degli standard prestazionali; in particolare, per il patrimonio edilizio esistente, è previsto l'obbligo, per ciascuno stato membro, di predisporre un Piano Nazionale di Ristrutturazione che definisca una traiettoria di riduzione dei consumi energetici del parco immobiliare nel periodo 2020-2050, individuando il numero di edifici o la superficie da riqualificare annualmente e stabilendo le priorità di intervento. L'approccio adottato è di tipo progressivo e si concentra sugli edifici con le prestazioni peggiori, al fine di massimizzare l'efficacia degli interventi.

In particolare, per il settore residenziale si prevede che:

- almeno il 55% della riduzione complessiva dei consumi energetici derivi dalla riqualificazione del 43% degli edifici meno efficienti;
- il consumo medio di energia primaria diminuisca di almeno il 16% entro il 2030;
- la riduzione raggiunga il circa il 22% entro il 2035, con ulteriori decrementi quinquennali fino al 2050.

Per gli edifici non residenziali vengono introdotti degli standard minimi di prestazione energetica basati su soglie massime di consumo espresse in kWh/m² anno, in base alla distribuzione del livello di prestazione del patrimonio edilizio esistente al 1° gennaio 2020, che devono garantire un miglioramento delle prestazioni di almeno il 16% degli edifici con i consumi più elevati entro il 2030 e del 26% entro il 2033. Sono inoltre previste delle esenzioni per categorie specifiche di edifici tra cui edifici storici o vincolati, costruzioni temporanee, luoghi di culto, abitazioni indipendenti con superficie inferiore a 50 m² e seconde case utilizzate per periodi limitati dell'anno. È prevista anche la possibilità di escludere l'edilizia sociale pubblica qualora gli interventi comportino incrementi dei canoni non proporzionati ai risparmi energetici ottenibili, introducendo un principio di equità nella transizione energetica.

2.2 Recepimento a livello nazionale

Il Decreto legislativo n. 192 del 19 agosto 2005 rappresenta il primo riferimento normativo in Italia sul rendimento energetico in edilizia, con cui è stata recepita la direttiva 2002/91/CE [9]. Il provvedimento introduce un approccio integrato al sistema edificio-impianto, definendo la prestazione energetica come il fabbisogno annuo di energia primaria necessario a garantire i principali servizi energetici (riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione e illuminazione). Tale prestazione deve essere determinata secondo metodologie di calcolo conformi alle norme tecniche nazionali UNI e CTI, allineate agli standard europei del CEN, e viene espressa attraverso specifici indicatori che tengono conto delle caratteristiche dell'involucro, dell'efficienza degli impianti e dell'eventuale contributo delle fonti rinnovabili.

Il decreto definisce i criteri generali per la determinazione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici, differenziati in funzione della zona climatica, del rapporto di forma (calcolato come il rapporto tra la superficie disperdente e il volume climatizzato = S/V) e della tipologia di intervento. In particolare stabilisce:

- I valori limite di fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale espressi in kWh/m^2 anno, sulla base della zona climatica di appartenenza dell'edificio e del rapporto di forma dell'edificio S/V ;
- I valori massimi di trasmittanza termica per strutture opache verticali e orizzontali, coperture, serramenti e chiusure trasparenti;
- I rendimenti minimi degli impianti termici e i requisiti per la loro regolazione e contabilizzazione;
- Gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili, ove tecnicamente ed economicamente fattibile.

L'ambito di applicazione di tale Decreto comprende le nuove costruzioni, le ristrutturazioni importanti, gli ampliamenti volumetrici rilevanti, la sostituzione dei generatori di calore, l'installazione di nuovi impianti e gli interventi sugli edifici esistenti che incidono sulla prestazione energetica. Il Decreto, all'articolo 4, disciplina la relazione tecnica di progetto (anche chiamata relazione ex legge 10), documento che contiene i calcoli energetici e le verifiche di conformità ai requisiti normativi e che deve essere depositato presso il comune contestualmente al titolo edilizio. Un elemento centrale è l'introduzione della certificazione energetica degli edifici, inizialmente definita come Attestato di Certificazione Energetica (ACE), concepita come strumento informativo volto a rendere trasparente il livello di efficienza dell'immobile e a suggerire eventuali interventi migliorativi ed economicamente convenienti.

Il decreto stabilisce inoltre:

- le modalità di esercizio, manutenzione e ispezione degli impianti termici;
- i criteri per la qualificazione e l'indipendenza dei soggetti certificatori;
- il sistema dei controlli e delle sanzioni per progettisti, direttori dei lavori, certificatori e proprietari in caso di inadempienze.

Il Decreto legislativo n. 311 del 29 dicembre 2006, introduce disposizioni correttive e integrative al D.Lgs. 192/2005, rendendo più rigorosi i requisiti prestazionali e ampliando il campo di applicazione della normativa [10]. Difatti, vengono ridotti i limiti di fabbisogno energetico e i valori di trasmittanza, con scadenze temporali progressive per il loro rispetto, e si introduce l'indice di prestazione energetica parziale (definito in kWh/m³ o kWh/m²), che esprime il consumo di energia primaria per unità di superficie o volume riferito ai singoli servizi energetici, superando il precedente approccio basato esclusivamente sul fabbisogno per il riscaldamento. Il decreto distingue diversi livelli di applicazione dei requisiti minimi:

- applicazione integrale per nuove costruzioni e ristrutturazioni di edifici con superficie utile superiore a 1000 m²;
- applicazione limitata alla sola parte ampliata negli interventi di incremento volumetrico superiore al 20%;
- applicazione parziale per interventi su edifici esistenti di minore entità o per la sostituzione degli impianti.

Viene inoltre introdotto l'Attestato di Qualificazione Energetica (AQE), documento facoltativo redatto dal progettista o dal direttore dei lavori, con funzione transitoria fino all'adozione delle linee guida nazionali per la certificazione energetica e finalizzato a facilitare il rilascio dell'attestato da parte del certificatore indipendente. Il provvedimento rafforza il ruolo delle regioni nei controlli, nella definizione dei sistemi di certificazione e nell'organizzazione degli ispettori degli impianti termici.

Al fine di rendere operativi i criteri generali e i requisiti minimi previsti dall'articolo 4, comma 1 lettere a) e b) del D.lgs. 192/2005, viene emanato il primo provvedimento attuativo, il D.P.R. n.59 del 2 aprile 2009 [11]. Il regolamento definisce le metodologie di calcolo della prestazione energetica facendo riferimento alle specifiche tecniche UNI/TS 11300 per la determinazione del fabbisogno di energia termica e dei rendimenti degli impianti. Tra le principali prescrizioni si possono evidenziare:

- introduzione di parametri per la valutazione del comportamento estivo dell'involucro, tra cui la trasmittanza termica periodica Y_{IE} , che consente di

misurare la capacità delle strutture opache di attenuare e sfasare il flusso termico giornaliero;

- verifica dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva nelle nuove costruzioni e nelle ristrutturazioni rilevanti;
- obbligo di sistemi di termoregolazione e, negli edifici plurifamiliari, di contabilizzazione del calore;
- limiti di trasmittanza per elementi quali le porte e altri componenti dell'involucro prima non esplicitamente considerati;
- prescrizioni sul trattamento dell'acqua negli impianti termici in funzione della potenza del generatore e della durezza dell'acqua;
- riconoscimento delle biomasse come fonti rinnovabili;
- requisiti più severi per gli edifici pubblici o ad uso pubblico.

Il secondo provvedimento attuativo è il D.M. 26 giugno 2009, che introduce le linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici e stabilisce una metodologia uniforme su tutto il territorio nazionale, applicabile alle regioni che non abbiano adottato propri strumenti [12]. Al suo interno, si definiscono:

- i contenuti informativi dell'attestato di certificazione energetica;
- la classificazione degli edifici in classi energetiche sulla base dell'indice di prestazione energetica globale;
- la validità temporale massima dell'attestato (considerata di 10 anni) e le modalità di aggiornamento;
- i requisiti professionali e i criteri di indipendenza dei certificatori;
- l'obbligo di allegare i libretti di impianto o di centrale.

L'indice di prestazione energetica globale (EP_{gl} , misurato in kWh/m² per gli edifici residenziali, e in kWh/m³ per tutte le altre tipologie di edificio) calcolato considerando il fabbisogno di energia primaria per riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria e illuminazione, oltre che l'energia ausiliaria dei sistemi impiantistici e l'eventuale autoproduzione da fonti rinnovabili:

$$EP_{gl} = EP_i + EP_e + EP_{acs} + EP_{ill}$$

Dove:

- EP_i = indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale [kWh/m² o kWh/m³];
- EP_e = indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva [kWh/m² o kWh/m³];
- EP_{acs} = indice di prestazione energetica per la produzione dell'ACS [kWh/m² o kWh/m³];
- EP_{ill} = indice di prestazione energetica per l'illuminazione [kWh/m² o kWh/m³].

Le linee guida indicano due modalità per stimare le prestazioni energetiche di un edificio, scelte in base al tipo di intervento e alla complessità del progetto:

- Valutazione basata sul progetto: in questo caso, il calcolo parte dai dati previsti dal progetto energetico, considerando sia le caratteristiche costruttive dell'edificio sia le specifiche degli impianti, ed è più adatto per le nuove costruzioni o per gli edifici sottoposti a ristrutturazioni totali. Le linee guida offrono strumenti come fogli di calcolo e esempi pratici per applicare correttamente le norme UNI/TS 11300;
- Valutazione basata sul rilievo o su parametri standard: questo approccio si applica agli edifici esistenti, utilizzando informazioni raccolte:
 - o Da sopralluoghi e misurazioni sugli edifici e impianti, secondo normative tecniche riconosciute;
 - o Da un confronto con edifici simili tramite banche dati o tabelle di riferimento locali, regionali o nazionali;
 - o A seguito dell'utilizzo di dati climatici, tipologici, dimensionali e impiantistici per la stima delle prestazioni energetiche.

Parallelamente al recepimento della Direttiva EPBD, si è cercato di affrontare il tema dell'efficienza energetica anche dal punto di vista degli usi finali dell'energia, attraverso l'attuazione della Direttiva 2006/32/CE con il Decreto legislativo n. 115 del 30 maggio 2008 [13]. Il Decreto conferma l'utilizzo delle norme UNI/TS 11300 come

riferimento per il calcolo dei fabbisogni e degli indici di prestazione e stabilisce che i software impiegati per la certificazione e per le diagnosi energetiche debbano fornire risultati coerenti con il metodo nazionale, con uno scostamento massimo contenuto e verificato da CTI o UNI; questo requisito è importante dal punto di vista applicativo perché:

- garantisce la confrontabilità dei risultati ottenuti con strumenti diversi;
- riduce la variabilità legata alle impostazioni dei modelli di calcolo;
- aumenta l'affidabilità delle valutazioni energetiche utilizzate in fase progettuale e di diagnosi.

In attesa della validazione ufficiale, è ammesso l'utilizzo di una dichiarazione da parte del produttore del software che attesti l'avvio della procedura di verifica. La diagnosi energetica viene definita come un'analisi sistematica dei consumi finalizzata a individuare possibili interventi di miglioramento, valutati in termini di costi e benefici. Per il settore pubblico l'articolo 13 del Decreto prevede alcune azioni obbligatorie orientate al miglioramento dell'efficienza energetica. In particolare, le amministrazioni devono:

- utilizzare strumenti finanziari e contratti a prestazione energetica per gli interventi di riqualificazione, anche affidandosi a soggetti esterni, purché sia garantita una riduzione dei consumi;
- effettuare la diagnosi energetica degli edifici pubblici o ad uso pubblico quando si interviene sugli impianti termici o quando la ristrutturazione interessa una quota significativa dell'involucro;
- dotare gli edifici con superficie utile superiore a 1000 m² di un attestato di prestazione energetica, da esporre in modo visibile al pubblico, in continuità con quanto previsto dal D.lgs. 192/2005.

Per quanto riguarda le imprese, invece, il decreto favorisce lo sviluppo del mercato dei servizi energetici attraverso:

- la promozione delle ESCO e dei contratti di rendimento energetico;

- l'introduzione, all'articolo 16 del Decreto, di sistemi di certificazione volontaria per ESCO ed esperti in gestione dell'energia, con l'obiettivo di migliorare la qualità tecnica degli operatori;
- la definizione di requisiti e standard per le attività di diagnosi e per i sistemi di gestione dell'energia.

Un ulteriore elemento operativo è rappresentato dal ruolo attribuito all'ENEA (art. 18 del Decreto), che deve garantire la disponibilità di strumenti di diagnosi energetica efficaci e accessibili, anche tramite applicativi informatici semplificati e strumenti di supporto per le realtà con minore capacità organizzativa.

Il D.lgs. 115/2008 è stato successivamente modificato dal D.lgs. 56/2010, con l'obiettivo di integrare e chiarire alcuni aspetti applicativi del provvedimento originario.

Un ulteriore passo avanti viene compiuto con il recepimento della Direttiva 2012/27/UE con il Decreto legislativo n.102 del 4 luglio 2014, che introduce un quadro normativo volto a incrementare l'efficienza energetica nei settori pubblico e privato [14].

Per quanto riguarda la Pubblica Amministrazione, il decreto impone interventi di riqualificazione energetica sugli edifici di proprietà, prevedendo un miglioramento energetico pari ad almeno il 3% annuo della superficie climatizzata oppure un risparmio energetico cumulato di 0,04 Mtep nel periodo 2014-2020 (articolo 5 del Decreto). Nei processi di acquisto o locazione di immobili e nell'affidamento di beni e servizi, le Pubbliche Amministrazioni centrali devono conformarsi a requisiti minimi di efficienza energetica definiti dagli allegati al decreto, assicurando in tal modo la coerenza tra politica di spesa e obiettivi di risparmio energetico. Nel settore privato, invece, il Decreto definisce gli obblighi di diagnosi energetica per:

- le grandi imprese (con oltre 250 dipendenti e fatturato superiore a 50 milioni di euro, art. 8, comma 1)
- per le imprese a elevato consumo energetico (art. 8, comma 3).

Le diagnosi devono essere ripetute con cadenza quadriennale e condotte da soggetti certificati secondo le norme UNI CEI 11352 (ESCO), UNI CEI 11339 (EGE) o auditor

energetici certificati. L'ENEA è incaricata della gestione della banca dati delle imprese soggette a diagnosi e del controllo a campione delle diagnosi effettuate, comprese le verifiche in loco. Il Decreto, inoltre, promuove inoltre strumenti di incentivazione per l'efficienza energetica come, ad esempio:

- i certificati bianchi, o Titoli di Efficienza Energetica (TEE) scambiabili sul mercato del GME⁶, permettono di valorizzare economicamente i risparmi ottenuti
- il Fondo nazionale per l'efficienza energetica, con una dotazione annuale di circa 75 milioni di euro, sostiene interventi su edifici pubblici, reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento, illuminazione pubblica e riduzione dei consumi nei settori industriale e dei servizi.

Infine, il Decreto prevede misure per la qualificazione dei fornitori di servizi energetici e per la formazione degli operatori, promosse da ENEA, volte a garantire la corretta applicazione delle diagnosi energetiche e l'accesso agli strumenti di incentivazione, definendo un percorso strutturato per il miglioramento continuo della prestazione energetica a livello nazionale.

Il recepimento della Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia in Italia è avvenuto con il Decreto Legge 63/2013 del 4 giugno, convertito successivamente nella Legge 90/2013 [15], che ha aggiornato la disciplina dell'efficienza energetica degli edifici e ha introdotto una serie di disposizioni urgenti per allineare il nostro Paese agli obblighi europei. Tra i cambiamenti più importanti previsti dal Decreto va sottolineato il passaggio dall'Attestato di Certificazione Energetica (ACE) all'Attestato di Prestazione Energetica (APE), il quale ha sostituito l'ACE non soltanto nel nome, ma anche nella metodologia di valutazione, rendendo la certificazione più aderente ai criteri europei di prestazione energetica basata su indicatori oggettivi e confronti con modelli di riferimento. Tuttavia, per tradurre questi principi generali in regole tecniche operative è stato necessario definire criteri univoci di calcolo, procedure di certificazione e strumenti di controllo uniformi su

⁶ Gestore dei Mercati Energetici (GME) è una società italiana che si occupa della gestione dei mercati energetici in Italia.

tutto il territorio nazionale; per questo motivo sono stati emanati tre Decreti Interministeriali in data 26 giugno 2015 [16], che costituiscono i decreti attuativi della Legge 90/2013 e rappresentano il cardine dell'attuazione normativa⁷.

Il Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Requisiti Minimi definisce le metodologie di calcolo per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici e stabilisce i requisiti minimi che devono essere rispettati per nuove costruzioni, ristrutturazioni importanti e adeguamenti energetici degli edifici esistenti. Il Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Certificazione energetica, invece, aggiorna e uniforma le linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, ridefinendo contenuti, schemi e criteri dell'APE. Infine, il Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Relazione tecnica di progetto individua gli schemi e le modalità per la compilazione della relazione tecnica che accompagna i titoli abilitativi edilizi (come CILA, SCIA o Permesso di Costruire) e serve a dimostrare il rispetto dei requisiti minimi di prestazione energetica.

Questi decreti hanno introdotto numerose innovazioni, che hanno modernizzato e armonizzato la disciplina della prestazione energetica a livello nazionale; tra le principali novità si possono riassumere i seguenti punti:

- Definizione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e dei requisiti minimi degli edifici, entrati in vigore a partire dal 1° ottobre 2015, includendo per la prima volta criteri tecnici espliciti per gli edifici ad energia quasi zero (nZEB);
- Linee guida nazionali per l'APE: le nuove regole definiscono cosa deve contenere l'attestato, quali informazioni devono essere fornite e come devono essere calcolati gli indici di prestazione. L'APE deve ora esplicitare la prestazione energetica attraverso descrittori specifici e deve fornire raccomandazioni per il miglioramento dell'efficienza;

⁷ Il testo è stato aggiornato alla Legge 207/2024, la quale ha introdotto modifiche in materia di incentivi e agevolazioni fiscali per gli interventi di efficienza energetica, senza però modificare i criteri tecnici dei decreti attuativi.

- Introduzione del confronto con l'edificio di riferimento: la classe energetica assegnata nell'APE non dipende più da parametri assoluti, ma è il risultato del confronto tra l'edificio reale e un edificio standard, che ha gli stessi parametri geometrici, di ubicazione, orientamento e destinazione d'uso, ma valori prestazionali normati. Quanto più l'edificio reale si avvicina o supera le prestazioni dell'edificio di riferimento, tanto migliore è la classe energetica attribuita;
- Nuovi indicatori prestazionali energetici: il decreto introduce indicatori quali gli indici di prestazione termica utile per il riscaldamento ($EP_{H,nd}$) e il raffrescamento ($EP_{C,nd}$), espressi in base ai fabbisogni di energia e alla superficie utile, così come il coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione (H_T), espresso in W/m^2K .
- Indice di prestazione energetica globale non rinnovabile ($EP_{gl,nren}$): la classe energetica dell'edificio viene determinata in base a questo indice, che tiene conto del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per i vari servizi energetici in rapporto alla superficie utile.
- Indicazione della qualità dell'involucro: oltre alla classe energetica, l'APE include parametri che rappresentano la qualità della prestazione energetica dell'involucro edilizio in inverno confrontando $EP_{H,nd}$ dell'edificio con quello dell'edificio di riferimento, e in estate considerando l'area solare equivalente per unità di superficie utile e la trasmittanza termica periodica estiva.
- Norme tecniche di riferimento: per il calcolo delle prestazioni vengono integrate, oltre alla UNI/TS 11300 parti 1 e 2 (che riguardano i fabbisogni di energia per la climatizzazione invernale e la determinazione dei rendimenti degli impianti), anche le UNI/TS 3 e 4 della stessa serie, che disciplinano rispettivamente la determinazione del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva e la valutazione degli apporti da energie rinnovabili e altri sistemi di generazione termica.
- Catasto nazionale degli APE e degli impianti termici (SIAPE): è istituito un sistema informativo nazionale, curato dall'ENEA in accordo con le Regioni, per la raccolta, la gestione e il monitoraggio degli attestati di prestazione energetica

e dei dati sugli impianti termici, favorendo trasparenza, controllo e omogeneità dei dati su tutto il territorio.

Successivamente, si ha Decreto legislativo n.48 del 10 giugno 2020, che rappresenta il provvedimento con cui l'ordinamento italiano ha recepito la Direttiva 2018/844/UE, intervenendo in modo sistematico sul D.Lgs. 192/2005 e coordinandosi con il D.Lgs. 102/2014 [17]. L'intervento normativo non modifica i metodi di calcolo della prestazione energetica (disciplinati dai Decreti Attuativi del 26 giugno 2015), ma aggiorna il quadro strategico e regolatorio introducendo un approccio orientato al ciclo di vita dell'edificio, alla digitalizzazione dei sistemi impiantistici e alla progressiva decarbonizzazione del patrimonio immobiliare. In particolare, il Decreto rafforza:

- l'obbligo di definizione della strategia nazionale di ristrutturazione a lungo termine, quale strumento di pianificazione per la trasformazione del parco edilizio in edifici a emissioni quasi nulle entro il 2050;
- l'integrazione dei sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS) per impianti termici di potenza rilevante, quale alternativa alle ispezioni periodiche;
- la predisposizione delle infrastrutture di ricarica per la mobilità elettrica negli edifici di nuova costruzione o oggetto di ristrutturazioni importanti;
- il rafforzamento del sistema informativo sugli attestati di prestazione energetica (APE) e dei controlli sugli impianti termici.

Il Decreto riformula anche la nozione di impianto termico, stabilendo che esso è un «impianto tecnologico fisso destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, o destinato alla sola produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione, accumulo e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolazione e controllo, eventualmente combinato con impianti di ventilazione. Non sono considerati impianti termici i sistemi dedicati esclusivamente alla produzione di acqua calda sanitaria al servizio di singole unità immobiliari ad uso residenziale ed assimilate» [17].

Andando a ridefinire il concetto di impianto termico, il Decreto amplia il perimetro degli impianti soggetti a controllo e contribuisce a rendere più coerente il sistema di monitoraggio energetico degli edifici.

Su un piano distinto, ma temporalmente contiguo, si colloca il Decreto Legge n.76 del 16 luglio 2020, convertito successivamente nella Legge 120/2020, che costituisce un provvedimento trasversale di semplificazione amministrativa e accelerazione dei procedimenti edilizi [18], introducendo misure quali:

- l'estensione dell'ambito applicativo della CILA e la riduzione dei casi soggetti a permesso di costruire;
- il rafforzamento del silenzio-assenso e la compressione dei termini procedurali;
- la digitalizzazione delle pratiche edilizie e l'interoperabilità tra amministrazioni;
- la semplificazione degli interventi di manutenzione straordinaria e delle opere finalizzate all'efficientamento energetico.

Ne deriva quindi, una distinzione funzionale tra i due strumenti normativi, in quanto il D.Lgs. 48/2020 opera sul piano tecnico-strategico, definendo obiettivi, ambiti applicativi e strumenti di governance della prestazione energetica degli edifici in coerenza con il diritto europeo, mentre il D.L. 76/2020 agisce sul piano procedurale-amministrativo, riducendo gli oneri burocratici e i tempi autorizzativi per gli interventi edilizi. Tale coordinamento tra disciplina sostanziale e semplificazione procedurale costituisce uno degli elementi chiave del recente assetto normativo volto a favorire la transizione energetica del settore delle costruzioni.

Negli ultimi anni, il quadro normativo nazionale è in attesa di un formale recepimento della recente EPBD⁸, che costituirà, pertanto, un passaggio fondamentale per il consolidamento di un approccio più completo alla valutazione energetica dell'edificio, con ricadute significative sul piano progettuale, ma anche su quello della certificazione energetica.

⁸ Direttiva 2024/1275/UE [8]

2.3 *Quadro normativo regionale dell'Emilia Romagna*

La Delibera della Giunta Regionale n.1261 del 25 luglio 2022 [19] costituisce un quadro normativo di riferimento per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici nella Regione Emilia-Romagna, aggiornando e integrando il precedente Atto di Coordinamento (DGR 967/2015)⁹, per allinearli alle evoluzioni avvenute a livello nazionale e comunitario in materia di efficienza energetica e promozione delle fonti energetiche rinnovabili; essendo stata pubblicata nel Bollettino Ufficiale n.231 del 28 luglio 2022 si applica a tutti i titoli abitativi e agli interventi edilizi presentati a partire da tale data. Il DGR 1261/2022 mira principalmente ad elevare gli standard di prestazione energetica degli edifici attraverso l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili e la diffusione del modello nZEB, garantendo al contempo un'applicazione normativa uniforme sul territorio per il raggiungimento degli obiettivi ambientali regionali. Nel testo, la disciplina si struttura attraverso:

- La definizione di requisiti minimi di efficienza energetica per involucro, impianti e sistemi di gestione;
- l'introduzione di obblighi crescenti di copertura dei fabbisogni energetici con fonti rinnovabili;
- la previsione di modalità di calcolo e verifica delle prestazioni energetiche;
- gli obblighi di documentazione tecnico-progettuale (Art. 8).

L'ambito di applicazione copre tutti gli edifici disciplinati dal DPR 412/1993¹⁰ oggetto di interventi edilizi (nuove costruzioni, ampliamenti, ristrutturazioni) presentati tramite titolo abilitativo, SCIA o CIL, comprese manutenzioni straordinarie e riqualificazioni energetiche (Art. 3); si distinguono quattro principali categorie di intervento (Allegato 2), fondamentali per individuare l'applicazione dei requisiti:

⁹ Regione Emilia-Romagna, *Deliberazione della Giunta Regionale 20 luglio 2015, n. 967, "Approvazione dell'atto di coordinamento tecnico regionale per la definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici (artt. 25 e 25-bis L.R. 26/2004 e s.m.)"*;

¹⁰ D.P.R. del 26 agosto 1993, n. 412, *"Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10."*

- Categoria 1 - Edifici di nuova costruzione e assimilati (art. 3 comma 2 lett. a e art. 3 comma 3 punto i dell'atto):
 - o edifici di nuova costruzione;
 - o edifici demoliti e ricostruiti;
 - o ampliamenti con volume climatizzato $> 15\%$ dell'esistente o $> 500 m^3$, dove l'ampliamento può far parte dell'edificio preesistente o costituire una nuova unità immobiliare. In questo caso, i servizi energetici possono essere di nuova installazione ed indipendenti da quelli dell'edificio in esame, oppure possono essere un'estensione di quelli pre-esistenti. I requisiti minimi si applicano alla parte nuova o ampliata.
- Categoria 2 - Edifici esistenti oggetto di ristrutturazioni importanti di primo livello (art. 3 comma 2 lett. b punto i dell'atto): per interventi che coinvolgono $> 50\%$ della superficie disperdente lorda e prevedono la ristrutturazione o nuova installazione dell'impianto termico per la climatizzazione, i requisiti minimi si applicano all'intero edificio e riguardano il servizio interessato.
- Categoria 3 - Edifici esistenti oggetto di ristrutturazioni importanti di secondo livello e assimilate (art. 3 comma 2 lett. b punto ii e art. 3 comma 3 punto ii dell'atto): per interventi su $> 25\%$ della superficie disperdente lorda e/o ampliamenti non inclusi nella categoria 1 (con o senza sostituzione di impianto termico per la climatizzazione). Le verifiche sui requisiti riguardano solo le porzioni oggetto di intervento, con controllo del coefficiente globale di scambio termico H'_T ;
- Categoria 4 - Edifici esistenti oggetto di riqualificazione energetica (art. 3 comma 2 lett. c) dell'atto): per interventi che interessano $\leq 25\%$ della superficie disperdente lorda e/o consistono nell'installazione o nella ristrutturazione di impianti termici o altri lavori parziali, tra cui la sostituzione del generatore.

Il controllo delle prestazioni energetiche si concretizza sia a livello di involucro che di impianti. Per quanto riguarda l'involucro è previsto un controllo globale energetico tramite il coefficiente H'_T ed un controllo puntuale della trasmittanza termica U di muri, coperture, pavimenti e serramenti; questa dualità garantisce che la prestazione complessiva dell'edificio sia efficiente e che nessun componente strutturale penalizzi

l'efficacia dell'intervento, mentre, parallelamente, la delibera stabilisce requisiti per il comfort estivo includendo limiti sul fattore solare g delle superfici vetrate e obblighi di schermature solari. Relativamente agli impianti, sono definiti limiti prestazionali minimi per generatori termici, pompe di calore, sistemi di ventilazione, illuminazione e regolazione automatica dei consumi. In particolare, i sistemi devono essere dotati di termoregolazione automatica locale e programmabile e, in caso di impianti centralizzati devono prevedere termoregolazione e contabilizzazione individuali secondo le classi BACS. Le soluzioni devono essere valutate in sede di progettazione anche in funzione della fattibilità tecnica ed economica, con obbligo di documentazione nella relazione tecnica.

Un elemento cardine del DGR 1261/2022 riguarda gli obblighi di copertura con fonti rinnovabili (FER), in particolare:

- Per l'energia termica, gli edifici di nuova costruzione e quelli esistenti soggetti a ristrutturazione rilevante devono garantire una copertura minima dei fabbisogni di acqua calda sanitaria, riscaldamento e raffrescamento con FER pari ad almeno il 60% per titoli edilizi fino al 31 dicembre 2023, 70% per quelli presentati dal 01 gennaio 2024 e 80% per quelli presentati da 01 gennaio 2026;
- Per l'energia elettrica, è previsto l'obbligo di installare impianti fotovoltaici o sistemi equivalenti dimensionati in funzione della destinazione d'uso; sono ammesse alternative quali la partecipazioni a comunità energetiche rinnovabili (CER) o collegamento a SEU (Sistemi Efficienti di Utenza), sotto specifiche condizioni.

Questi obblighi per le FER si inseriscono in un contesto normativo più ampio che recepisce la Direttiva 2018/2001/UE e il d.lgs. 199/2021 sulla promozione dell'uso delle energie da fonti rinnovabili, rafforzando le percentuali minime rispetto a quelle previste in precedenza.

La documentazione tecnica obbligatoria comprende la relazione tecnica conforme allo schema dell'Allegato 4 del DGR, da allegare al titolo edilizio o conservare nei casi di edilizia libera, e l'Attestato di Qualificazione Energetica (AQE) a fine lavori per nuove costruzioni, ristrutturazioni di primo livello e ampliamenti significativi (Art. 8); i

Comuni sono incaricati di svolgere controlli entro 5 anni dalla fine dei lavori e , in caso vengano riscontrate delle violazioni, essi devono applicare le sanzioni previste dalla disciplina regionale e nazionale, nonché trasmettere gli esiti agli ordini professionali competenti. (Art.9). Infine, il DGR 1261/2022 prevede una norma transitoria che mantiene validi i precedenti requisiti (DGR 967/2015 e DGR 1715/2016) fino all'entrata in vigore del nuovo testo coordinato, garantendo continuità normativa per varianti in corso d'opera e titoli edilizi già avviati (Art. 10).

2.4 La normativa tecnica di riferimento

Per garantire una valutazione uniforme delle prestazioni energetiche degli edifici, l'Unione Europea ha promosso l'elaborazione di criteri metodologici condivisi. Su mandato della Comunità Europea, il CEN ha sviluppato le norme tecniche necessarie all'attuazione della direttiva 2002/91/CE, definendo un quadro di riferimento comune per il calcolo delle prestazioni energetiche.

2.4.1 UNI/TS 11300

La serie UNI/TS 11300 costituisce il riferimento metodologico nazionale per la determinazione della prestazione energetica degli edifici e per la valutazione dei fabbisogni energetici dei diversi servizi. Pubblicate nel periodo 2008-2012 e successivamente aggiornate nel 2014, esse vanno a recepire e integrare le norme europee della serie EPBD, definendo procedure di calcolo coerenti con il quadro legislativo nazionale.

La UNI/TS 11300-1 [20] definisce la procedura nazionale per il calcolo del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione invernale ed estiva, applicando al contesto italiano il metodo mensile previsto dalla UNI EN ISO 13790¹¹. La valutazione è condotta in condizioni quasi stazionarie e consente di determinare la domanda energetica dell'involucro indipendentemente dalle prestazioni degli impianti e può essere utilizzata in diversi ambiti applicativi:

¹¹ UNI EN ISO 13790:2008, "Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento".

- valutazione in condizioni di progetto (design rating), finalizzata alla verifica delle prestazioni previsionali dell'edificio;
- valutazione standardizzata (asset rating), impiegata per la certificazione energetica;
- valutazione in condizioni specifiche di esercizio (tailored rating), con parametri climatici e di utilizzo rappresentativi del caso reale.

Il procedimento di calcolo prevede innanzitutto l'individuazione dei volumi climatizzati e non climatizzati e, quando necessario, la suddivisione dell'edificio in zone termiche omogenee. Successivamente vengono definite le condizioni interne di riferimento e i dati climatici esterni, espressi come medie mensili di temperatura dell'aria e di irraggiamento solare per ciascun orientamento.

Il bilancio energetico mensile considera:

- le dispersioni per trasmissione attraverso le strutture opache e trasparenti;
- le perdite per ventilazione e infiltrazione;
- gli apporti solari, valutati in funzione di orientamento, ombreggiamenti, caratteristiche dei componenti vetrati e presenza di schermature;
- gli apporti interni dovuti a persone, apparecchiature e illuminazione;
- l'inerzia termica dell'involucro, rappresentata dalla capacità termica areica delle strutture.

A tal fine sono richiesti dati geometrici e termo-fisici dettagliati, tra cui superfici disperdenti, volumi climatizzati, trasmittanze termiche, caratteristiche dei ponti termici, fattori solari dei componenti trasparenti, proprietà radiative delle superfici esterne e condizioni di ventilazione. La norma tiene inoltre conto delle modalità di utilizzo dell'edificio, introducendo parametri quali temperature di set-point, profili di funzionamento degli impianti, gestione delle schermature mobili per i componenti finestrati, la tipologia di ventilazione e i tassi di ricambio d'aria. Il risultato del calcolo è costituito dal fabbisogno netto mensile di energia per il riscaldamento (QH_{nd}) e per il raffrescamento (QC_{nd}), determinato per ciascuna zona termica e successivamente aggregato in funzione dei sistemi impiantistici che le servono.

La UNI/TS 11300-2 [21] definisce le modalità per valutare l'energia effettivamente richiesta dai sistemi impiantistici a partire dal fabbisogno netto dell'edificio, permettendo di stimare sia l'energia fornita ai servizi sia l'energia primaria corrispondente. La norma riguarda in particolare:

- impianti per la climatizzazione invernale, sia autonomi sia integrati con altri servizi;
- sistemi per la produzione di acqua calda sanitaria;
- impianti combinati per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria;
- sistemi di ventilazione meccanica, indipendenti o integrati con la climatizzazione invernale;
- impianti di illuminazione artificiale, secondo quanto previsto dalla UNI EN 15193¹².

Il calcolo si fonda sull'analisi dei sottosistemi impiantistici (emissione, regolazione, distribuzione, accumulo e generazione) considerando i rendimenti, le perdite e le caratteristiche tecnologiche dei componenti. Per generatori alimentati da combustibili fossili liquidi o gassosi sono forniti dati e procedure specifiche, mentre per le altre fonti energetiche è necessario fare riferimento alla UNI/TS 11300-4. La norma consente, poi, l'uso di due approcci per determinare l'energia primaria:

- un metodo semplificato, basato su valori tabellati con limiti di applicabilità definiti;
- un metodo dettagliato che utilizza dati prestazionali specifici dei componenti impiantistici, offrendo una valutazione più accurata delle prestazioni energetiche.

L'applicazione è estesa a impianti nuovi, esistenti o riqualificati e può essere eseguita sia in condizioni standardizzate sia in condizioni di progetto o di esercizio, consentendo di confrontare diverse soluzioni impiantistiche e di valutare l'effetto delle scelte tecnologiche sulla prestazione energetica complessiva dell'edificio.

¹² UNI EN 15193 :2021, "Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione".

La UNI/TS 11300-3 [22] fornisce le procedure per determinare i fabbisogni energetici e i rendimenti dei sistemi impiantistici destinati alla climatizzazione estiva, nonché per calcolare l'energia primaria necessaria al servizio di raffrescamento. La norma si applica esclusivamente ad impianti fissi di climatizzazione estiva, dotati di macchine frigorifere alimentate elettricamente o ad assorbimento, e può essere utilizzata per sistemi di nuova progettazione, ristrutturati o esistenti. La norma considera il sistema impianto nella sua interezza, suddividendolo in sottosistemi funzionali quali:

- generazione del freddo (macchine frigorifere e unità di trattamento aria);
- distribuzione del fluido termovettore (circuiti idronici o canalizzati);
- emissione del freddo negli ambienti serviti;
- regolazione e controllo dei sistemi;
- eventuali accumuli o buffer per il raffrescamento.

Per ciascun sottosistema sono definiti i rendimenti operativi, le perdite energetiche e i fattori di conversione in energia primaria, in modo da consentire una valutazione completa delle prestazioni del sistema edificio-impianto. La norma non si applica ai singoli componenti dei sistemi di climatizzazione estiva, per i quali si rimanda alle specifiche norme di prodotto. Il risultato è il fabbisogno energetico del sistema per il servizio di climatizzazione estiva, espresso sia come energia utile sia come energia primaria, permettendo di confrontare diverse soluzioni impiantistiche e di ottimizzare le scelte progettuali o gestionali in termini di efficienza complessiva.

Infine, si ha la UNI/TS 11300-4 [23], la quale estende il calcolo dell'energia primaria agli impianti che utilizzano sottosistemi di generazione alternativi o fonti rinnovabili, integrando i servizi di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria già trattati nella UNI/TS 11300-2. L'obiettivo è stimare il contributo energetico di soluzioni diverse dalla combustione diretta di combustibili fossili e quantificare il fabbisogno di energia primaria tenendo conto dei rendimenti reali dei sistemi. Le tecnologie considerate includono:

- Solare termico per la produzione di energia termica utile;
- Solare fotovoltaico, per la generazione di energia elettrica;

- Pompe di calore, che sfruttano fonti aerauliche, geotermiche o idrauliche, con determinazione della quota di energia considerata rinnovabile;
- Biomasse;
- Altri metodi di generazione, come cogenerazione o sistemi di teleriscaldamento.

La UNI/TS 11300-5 [24] fornisce le regole per la determinazione dell'energia primaria consumata dagli edifici, distinguendo tra quota rinnovabile e non rinnovabile e considerando l'energia eventualmente esportata. Vengono innanzitutto chiariti alcuni concetti fondamentali.

- Con “edificio” si intende il fabbricato con tutti i sistemi tecnici presenti nelle sue pertinenze, destinati a soddisfare i fabbisogni energetici considerati;
- Per “confine del sistema (system boundary)” si intende l'area fisica che comprende l'edificio e tutti gli impianti a esso asserviti;
- Per “confine di valutazione (assessment boundary)” si intende il punto in cui vengono contabilizzate l'energia consegnata all'edificio e quella esportata, fornendo la base per il calcolo dell'energia primaria.

I fabbisogni energetici possono essere soddisfatti tramite:

- energia prodotta da fonti rinnovabili in situ, quali energia solare (pannelli fotovoltaici o collettori solari) ed energia termica derivata da aria, sottosuolo o acque superficiali e di falda;
- energia fornita da vettori esterni, siano essi rinnovabili o non rinnovabili (gas, biomassa, elettricità, ecc.), i quali possono richiedere conversione tramite impianti specifici.

La Norma stabilisce procedure per trasformare le quantità di energia fornite dai diversi vettori in energia primaria, utilizzando i fattori di conversione previsti dalla legislazione italiana, così da ottenere gli indici di prestazione energetica richiesti per la certificazione e le verifiche di progetto.

La UNI/TS 11300-6 [25] completa il pacchetto UNI/TS 11300 introducendo i metodi per determinare il fabbisogno di energia elettrica degli impianti destinati al sollevamento e al trasporto di persone e cose negli edifici non residenziali. La norma considera esclusivamente l'energia consumata durante i periodi di movimento e sosta operativa e può essere applicata sia a impianti nuovi sia esistenti. Il fabbisogno energetico complessivo per il trasporto, indicato come E_T [KWh], si ottiene sommando i fabbisogni dei singoli impianti presenti:

$$E_T = E_A + E_H + E_G + E_S + E_M \quad (2.13)$$

Dove:

- E_A : energia assorbita dagli ascensori [KWh];
- E_H : energia assorbita dai montascale e piattaforme elevatrici [KWh];
- E_G : energia assorbita dai montacarichi e montauto [KWh];
- E_S ed E_M : energia assorbita da scale mobili e marciapiedi mobili [KWh];

La norma è articolata in quattro capitoli principali, ciascuno dedicato al calcolo della quota di energia assorbita per le diverse tipologie di impianto.

La UNI/TS 11300-6 trova applicazione obbligatoria nella redazione degli APE (attestati di prestazione energetica) e nella verifica dei requisiti minimi di legge per edifici non residenziali, quali uffici, alberghi, ospedali, scuole, centri commerciali, impianti sportivi, edifici industriali o artigianali e infrastrutture per il trasporto pubblico. Per edifici esistenti privi di dati misurati, la norma fornisce valori standard per stimare il fabbisogno giornaliero dei sistemi di trasporto, tenendo conto sia delle fasi di movimento sia di sosta. I fabbisogni calcolati secondo la UNI/TS 11300-6 devono essere integrati negli indici di prestazione energetica definiti dalla UNI/TS 11300-5, permettendo una valutazione complessiva e coerente dell'efficienza energetica dell'edificio.

2.4.2 UNI 10349

Un'altra norma importante da citare è la norma UNI 10349, la quale fornisce i dati climatici necessari per la stima dei fabbisogni energetici in regime standard,

costituendo un riferimento essenziale per la progettazione e la verifica delle prestazioni termo-energetiche degli edifici. Essa aggiorna la precedente versione del 1994 e si articola in tre parti principali:

- UNI 10349-1 [26]: fornisce i riferimenti climatici essenziali per stimare i fabbisogni energetici di un edificio in condizioni medie, sia per il riscaldamento che per il raffrescamento, compresa la produzione di acqua calda sanitaria; la norma definisce parametri climatici mensili e annuali convenzionali che costituiscono la base per la progettazione e la verifica delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti ad essi associati. Un aspetto centrale riguarda il trattamento dell'irraggiamento solare, necessario per calcolare correttamente l'apporto energetico dovuto alla radiazione. La norma distingue tra componente diretta e diffusa e propone diversi metodi per stimare la radiazione su superfici di qualsiasi inclinazione e orientamento:
 - Utilizzo del modello di cielo isotropo per la distribuzione dell'irraggiamento orario in frazione diretta e diffusa su superfici inclinate (appendice A);
 - Applicazione del modello di cielo di Perez, che permette una stima più realistica della radiazione incidente considerando la variabilità reale della distribuzione solare (appendice B);
 - Calcolo dell'irradiazione media mensile su superfici fisse inclinate, utile per valutazioni periodiche dei fabbisogni energetici (appendice C);
 - Stima dell'indice di soleggiamento medio giornaliero nei casi in cui non siano disponibili dati climatici misurati, garantendo comunque una valutazione attendibile dell'apporto solare (appendice D).
- UNI 10349-2 [27]: definisce i dati climatici da utilizzare per il dimensionamento degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva e stabilisce i valori limite delle grandezze climatiche esterne (temperatura, umidità relativa e irraggiamento solare) necessari per il calcolo dei carichi termici di progetto, consentendo di progettare sistemi efficienti e correttamente dimensionati in funzione delle condizioni climatiche locali. In particolare consente di:

- stabilire i parametri di ingresso necessari per il calcolo dei carichi termici invernali ed estivi;
 - determinare le condizioni climatiche di progetto per la prevenzione del surriscaldamento estivo;
 - fornire dati coerenti per la progettazione degli impianti;
 - integrare le informazioni con la UNI 12831¹³, garantendo un metodo di calcolo standardizzato e confrontabile tra diverse soluzioni progettuali;
 - supportare la valutazione dell'efficienza energetica globale dell'edificio già in fase di progettazione.
- UNI 10394-3 [28] definisce metodi e strumenti per rappresentare in maniera sintetica le caratteristiche climatiche di un territorio e il loro impatto sul fabbisogno energetico degli edifici. La norma integra la UNI EN ISO 15927-6¹⁴ e introduce indicatori utili per quantificare le condizioni climatiche che influenzano sia il riscaldamento invernale sia il raffrescamento estivo:
- Gradi giorno (GG), utilizzati per stimare la domanda energetica stagionale necessaria a mantenere la temperatura interna di comfort;
 - Differenze cumulate di umidità, che permettono di valutare gli effetti della variabilità dell'umidità sull'ambiente interno e sui sistemi di climatizzazione;
 - Radiazione solare cumulata su superfici orizzontali, fondamentale per il calcolo dei carichi di raffrescamento estivo;
 - Indice di severità climatica, che sintetizza l'impatto complessivo del clima locale sul fabbisogno energetico dell'edificio.

La norma fornisce inoltre indicazioni per la zonizzazione climatica estiva del territorio nazionale, consentendo di definire i parametri di riferimento per il dimensionamento degli impianti e per la progettazione energeticamente efficiente.

¹³ UNI 12831:2018 *“Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo del carico termico di progetto”*;

¹⁴ UNI EN ISO 15927-6:2008, *“Prestazione termoigrometrica degli edifici - Calcolo e presentazione dei dati climatici - Parte 6: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno)”*.

3 Fondamenti tecnico-ingegneristici

In questo capitolo viene presentata in modo sintetico la procedura per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, secondo quanto previsto dalla normativa tecnica UNI/TS 11300. Si illustrano il metodo di calcolo adottato, le principali grandezze di input necessarie e le diverse fasi che portano alla determinazione dell'energia richiesta per i vari servizi energetici.

3.1 Trasmittanza termica degli elementi opachi e trasparenti

La prestazione energetica dell'edificio dipende in primo luogo dalle caratteristiche dell'involucro edilizio, che regolano gli scambi termici tra ambiente interno ed esterno. Il parametro fondamentale che descrive tali scambi è la trasmittanza termica U [W/m^2K], definita per gli elementi opachi e trasparenti; rispettivamente si avrà:

$$U = \frac{1}{\left(R_{si} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + R_{se} \right)} \quad (3.1)$$

Dove:

- R_{si} = resistenza superficiale interna, calcolato come $1/h_i$ usando i valori presenti in Tabella 3.1 [m^2K/W];
- R_{se} = resistenza superficiale esterna, calcolato come $1/h_e$ usando i valori presenti in Tabella 3.1 [m^2K/W];
- s_i = spessore dello strato i-esimo [m];
- λ_i = conducibilità termica dello strato i-esimo [W/mK].

Tabella 3.1 - Resistenze termiche superficiali e coefficienti di adduzione in funzione della direzione del flusso e della velocità dell'aria.

Condizione della superficie	Direzione del flusso termico	R_{si}' [m^2K/W]	h_i [$W/(m^2K)$]
Superfici in aria calma (interno)	Ascendente (copertura)	0,10	10
	Orizzontale (murature)	0,13	7,69
	Discendente (pavimento)	0,17	5,88

Condizione della superficie	Direzione del flusso termico	R_{se}' [m^2K/W]	h_e [$W/(m^2K)$]
Verso l'esterno ($v \leq 4$ m/s)	Tutte le superfici	0,04	25
Verso l'esterno ($v > 4$ m/s)	Tutte le superfici	$1/(8.16+4*v)$	$8,16 + 4*v$

$$U_w = \frac{\sum U_g \cdot A_g + \sum U_p \cdot A_p + \sum U_f \cdot A_f + \sum \psi_g \cdot l_g + \sum \psi_p \cdot l_p}{\sum A_g + \sum A_p + \sum A_f} \quad (3.2)$$

Dove:

- U_g : trasmittanza delle lastre trasparenti (g: glazing) [W/(m²K)];
- A_g : area delle lastre trasparenti [m²];
- U_p : trasmittanza dei pannelli (p) opachi [W/(m²K)];
- A_p : area dei pannelli opachi [m²];
- U_f : trasmittanza del telaio (f: frame) [W/(m²K)];
- A_f : area del telaio [m²];
- ψ_g : trasmittanza lineare dei distanziatori [W/(mK)], nulla per lastre singole;
- l_g : perimetro delle lastre trasparenti [m];
- ψ_p : trasmittanza lineare di bordo dei pannelli opachi [W/(mK)], nulla per materiali dei pannelli e dei distanziatori con $\lambda < 0.5$ W/(mK);
- l_p : perimetro dei pannelli opachi [m].

A questo punto si può calcolare il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione H_{tr} [W/K] come:

$$H_{tr} = H_D + H_g + H_U + H_A \quad (3.3)$$

Dove:

- H_D : coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno [W/K], calcolato secondo la UNI EN ISO 13789;
- H_g : coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno [W/K], calcolato secondo la UNI EN ISO 13370;
- H_U : coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati [W/K];
- H_A : coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone (interne o meno all'edificio) climatizzate a temperatura diversa [W/K];

Dove i vari termini si calcolano come segue.

$$HD = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \psi_k \cdot L_k + \sum_j X_j \quad (3.4)$$

Dove:

- HD: coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione [W/K];
- U_i : trasmittanza termica (areica) dell'elemento di parete i-esimo [W/(m²K)];
- A_i : area frontale dell'elemento di parete i-esimo [m²];
- ψ_k : trasmittanza termica lineica del ponte termico lineare k-esimo [W/(mK)];
- L_k : sviluppo (lunghezza) del ponte termico lineare k-esimo [m];
- X_j : trasmittanza termica puntuale del ponte termico puntiforme j-esimo [W/K].

$$Hg = A \cdot U_{eq} + P\psi_g \quad (3.5)$$

Dove:

- A: area dell'elemento [m²];
- U_{eq} : trasmittanza termica equivalente del terreno [W/m²K];
- P: perimetro del pavimento dell'edificio (per valutazioni sull'intero edificio), o lunghezza delle pareti separanti gli spazi riscaldati dall'ambiente esterno (per valutazioni su parti di edificio)
- ψ_g : trasmittanza termica lineica relativa ai ponti termici perimetrali, W/(m K), valutabile numericamente (UNI EN ISO 10211) o da valori tabulati (UNI EN ISO 14683).

$$HU = (\sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \psi_k \cdot L_k) \cdot b_u = HD \cdot b_u \quad (3.6)$$

Dove:

- U_i : trasmittanza termica (areica) dell'elemento di parete i-esimo [W/(m²K)];
- A_i : area frontale dell'elemento di parete i-esimo [m²];
- ψ_k : trasmittanza termica lineica del ponte termico lineare k-esimo [W/(mK)];
- L_k : sviluppo (lunghezza) del ponte termico lineare k-esimo [m];
- b_u : fattore di correzione per ambienti non climatizzati, in funzione delle condizioni termoigrometriche dell'ambiente adiacente [-]; può essere:
 - o Positivo < 1 se la zona adiacente è meno fredda dell'esterno;
 - o Negativo se il flusso termico è uscente;

- Uguale a 0 se la zona adiacente è alla stessa temperatura.

Per il coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone (interne o meno all'edificio) climatizzate a temperatura diversa H_a i calcoli sono i medesimi di H_u .

Si può poi calcolare anche il coefficiente di scambio termico per ventilazione, indicato con H_{ve} (in W/K), il quale rappresenta la quantità di calore che viene scambiata con l'esterno dovuta al ricambio d'aria (ventilazione), sia naturale che meccanica; si calcola come segue:

$$H_{ve} = \frac{\rho_a \cdot c_a \cdot V_{ve} \cdot n_{ve}}{3600} \quad (3.7)$$

Dove:

- ρ_a : densità dell'aria [kg/m^3];
- c_a : calore specifico a pressione costante dell'aria [J/kgK];
- V_{ve} : volume interno ventilato [m^3];
- n_{ve} : tasso di ventilazione convenzionale (numero di ricambi d'aria, vol/h).

È importante citare anche la trasmittanza termica periodica Y_{IE} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], la quale descrive il comportamento dinamico dell'involucro edilizio in presenza di sollecitazioni termiche variabili nel tempo, risultando particolarmente rilevante nel regime estivo; in tale contesto, essa misura la capacità della parete di attenuare e ritardare il flusso termico entrante: valori bassi indicano un buon smorzamento dell'onda termica e quindi un minore surriscaldamento interno. In regime invernale, invece, il comportamento dell'involucro è generalmente valutato in condizioni quasi stazionarie attraverso la trasmittanza termica U , che esprime le dispersioni verso l'esterno; tuttavia, anche in questo caso l'inerzia termica può contribuire a stabilizzare le condizioni interne riducendo le oscillazioni di temperatura. La trasmittanza termica periodica è definita come:

$$Y_{IE} = \frac{|\Phi_i|}{|T_e|} \quad (3.8)$$

dove $|\Phi_i|$ rappresenta l'ampiezza del flusso termico entrante e $|T_e|$ l'ampiezza della temperatura esterna oscillante.

3.2 Apporti Solari

Si calcola innanzitutto il fattore di riduzione b_{tr} , utile al fine di valutare correttamente la quota di flusso termico (interno o solare) effettivamente utilizzabile quando questo attraversa due ambienti entrambi climatizzati, ma con diverse temperature interne di progetto:

$$b_{tr} = \frac{(T_i - T_u)}{(T_i - T_e)} \quad (3.9)$$

Vengono poi considerati fattori di ombreggiatura considerati per ciascuna esposizione (Nord, Sud, Est, Ovest), in accordo con la normativa UNI/TS 11300-1:

- F_{hor} , relativo agli ostacoli all'orizzonte (es. edifici vicini, colline, alberi alti);
- F_{ov} , relativo ad aggetti orizzontali (es. balconi superiori, pensiline, davanzali);
- F_{fin} , relativo ad aggetti verticali (es. spallette laterali, rientranze delle finestre).

Per ogni orientamento e mese, viene poi calcolato il fattore di ombreggiatura complessivo $F_{sh,ob,k}$ viene calcolato come:

$$F_{sh,ob,k} = F_{hor} \cdot \min(F_{ov}, F_{fin}) \quad (3.10)$$

Il calcolo della superficie di captazione solare effettiva $A_{sol,k}$ (m^2) per i componenti serve per determinare il contributo solare mensile incidente, tenendo conto delle caratteristiche fisiche dei vetri, dell'esposizione e di eventuali dispositivi di schermatura solare, ed è calcolato come segue:

$$A_{sol,k} = g_{gl,k} \cdot F_{sh,gl,k} \cdot (1 - F_{F,k}) \cdot A_{W,p,k} \quad (3.11)$$

Dove:

- $g_{gl,k}$: trasmittanza solare effettiva del componente vetrato k-esimo in ciascun orientamento:

$$g_{gl,k} = g_{gl,n} \cdot F_w \quad (3.12)$$

- F_w : fattore di esposizione mensile per ciascun orientamento (Nord, Sud, Est, Ovest), il quale tiene conto della variazione dell'irraggiamento solare in base all'orientamento e all'angolo di incidenza stagionale della radiazione solare sulla superficie vetrata;
- g_{gl} : trasmittanza solare per incidenza normale della parte trasparente dei componenti vetrati, che può essere determinata attraverso la norma UNI EN 410 ed è solitamente dichiarata dal produttore del vetro (la marcatura CE prescrive che il produttore del vetro dichiari anche la trasmittanza solare); in assenza di dati documentati, si può usare un prospetto da norma UNI/TS 11300-1;
- $F_{sh,gl,k}$: fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili (accoppiate al componente vetrato k -esimo) si calcola mediante la formula:

$$F_{sh,gl,k} = \frac{[(1 - f_{sh,with,k}) \cdot g_{gl,k} + f_{sh,with,k} \cdot g_{gl+sh,k}]}{g_{gl,k}} \quad (3.13)$$

In assenza di schermature mobili è pari 1, siccome $f_{sh,with,k}$ e $g_{gl+sh,k}$ sono pari a 0;

- $f_{sh,with,k}$: frazione di tempo in cui le schermature solari mobili sono attive (pari a 0 se non vi è nessuna schermatura mobile);
 - $g_{gl+sh,k}$: trasmittanza solare complessiva del vetro con schermatura; esso è pari a 0 se non vi è nessuna schermatura mobile, altrimenti calcolato come:
- $$g_{gl+sh,k} = F_{sh} \cdot g_{gl,k} \quad (3.14)$$
- F_{sh} : fattore di riduzione della trasmittanza solare (pari a 0 se non vi è nessuna schermatura mobile);
- $F_{F,k}$: frazione di area relativa al telaio (i.e., rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente vetrato), in assenza di dati precisi si considera un 20%;

- $A_{w,p,k}$: rappresenta l'area vetrata totale del componente k-esimo per ciascuna zona dell'edificio, distinta per orientamento e destinazione d'uso;

La superficie di captazione solare effettiva $A_{sol,k}$ (m^2) di un k-esimo componente opaco dell'involucro si calcola come:

$$A_{sol,k} = \alpha_{sol,c,k} \cdot R'_{se,k} \cdot U_c \cdot A_{c,k} \quad (3.15)$$

Dove:

- $\alpha_{sol,c,k}$: fattore di assorbimento solare del componente opaco;
- $R'_{se,k}$: resistenza termica superficiale esterna del componente opaco;
- $U_{c,k}$: trasmittanza termica del componente opaco [$W/(m^2K)$];
- $A_{c,k}$: area proiettata totale del componente opaco [m^2].

Il flusso termico da apporto da solari viene calcolato come:

$$\Phi_{sol,mn,k} = A_{sol,k} \cdot I_{sol,mn,k} \cdot F_{sh,ob,k} \quad (3.16)$$

Dove:

- $A_{sol,k}$: Superficie di captazione solare effettiva;
- $I_{sol,mn,k}$: irradianza solare media giornaliera (media su base mensile) incidente sulla superficie k-esima, con orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale assegnati [W/m^2];
- $F_{sh,ob,k}$: fattore di riduzione per ombreggiatura relativo a elementi esterni sull'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima.

L'extra flusso $\phi_{r,mn,k}$ verso la volta celeste si calcola mediante la relazione (UNI EN ISO 13790):

$$\phi_{r,mn,k} = R_{se,k} \cdot U_k \cdot A_k \cdot h_{r,k} \cdot \Delta\theta_{er} \quad (3.17)$$

Dove:

- $R_{se,k}$: resistenza superficiale esterna del componente k-esimo [m^2K/W];

- U_k : trasmittanza termica del componente edilizio k-esimo [$W/(m^2K)$];
- A_k : superficie di scambio del componente edilizio k-esimo [m^2];
- $h_{r,k}$: coefficiente di scambio termico per irraggiamento [$W/(m^2K)$], calcolato come segue:

$$h_{r,k} = \frac{\varepsilon_k \sigma \left[(\theta_e + 273)^4 - (\theta_{sky} + 273)^4 \right]}{(\theta_e - \theta_{sky})} \approx 5 \varepsilon_k \quad (3.18)$$

Dove:

- o ε_k : emissività termica superficiale esterna del componente edilizio k-esimo;
- o σ : costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5.67 \cdot 10^8$ [$W/(m^2K)$];
- $\Delta\theta_{er} = (\theta_e - \theta_{sky})$: differenza tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente del cielo [$^{\circ}C$ o K].

In Italia si assume convenzionalmente $\theta_{sky} = 18 - 51.6 \exp(-p_{v,e}/1000)$.

Infine, si calcola il fattore di forma tra componente edilizio e volta celeste, attraverso la seguente formula:

$$F_{r,k} = F_{sh,ob,dif} \cdot \frac{1 + \cos S}{2} \quad (3.19)$$

Dove:

- $F_{sh,ob,dif}$: fattore di riduzione per ombreggiamento relativo alla sola radiazione diffusa (dif), pari a 1 in assenza di ombreggiature esterne;
- S : angolo d'inclinazione del componente sull'orizzonte [rad], dove:
 - o $S = 0$, allora $(1 + \cos S)/2 = 1$
 - o $S = \frac{\pi}{2}$, allora $\frac{1 + \cos S}{2} = 0,5$

Questa formula serve per determinare quanta radiazione diffusa incide sulla superficie o viene irradiata da essa verso il cielo, in base alla forma e all'inclinazione della superficie e alla presenza di eventuali ostacoli che fanno ombra.

3.2.1 Apporti gratuiti

Gli apporti gratuiti riducono il fabbisogno energetico per il riscaldamento e sono costituiti dagli apporti interni (Q_{int}) e dagli apporti solari (Q_{sol}).

Gli apporti (gratuiti) interni rappresentano il calore generato all'interno di un edificio da persone, apparecchiature elettriche e illuminazione; sono da tenere in considerazione nel calcolo del fabbisogno energetico per il riscaldamento in quanto costituiscono energia gratuita che riduce l'energia da fornire. Il calcolo viene effettuato mensilmente per ogni zona dell'edificio, secondo la seguente equazione:

$$Q_{int} = \{[\sum_k \Phi_{int,mn,k}] + [\sum_j(1 - b_{tr,x})\Phi_{int,mn,x,j}]\} \cdot t \quad (3.20)$$

Dove:

- $\Phi_{int,mn,k}$: flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna mediato sul tempo (W oppure kW);
- $b_{tr,x}$: fattore di riduzione per l'ambiente adiacente non climatizzato;
- $\Phi_{int,mn,x,j}$: flusso termico prodotto dalla j-esima sorgente di calore interna nell'ambiente adiacente non climatizzato x, mediato sul tempo (W oppure kW);
- t : durata del periodo considerato.

Gli apporti (gratuiti) solari sono invece dovuti all'energia della radiazione solare che penetra nell'edificio attraverso le superfici trasparenti (equazione 3.21) e, in misura minore, dall'energia che viene assorbita dalle superfici opache esposte al sole (equazione 3.22).

$$Q_{sol,w} = \{[\sum_k \Phi_{sol,mn,k}] + [\sum_j(1 - b_{tr,U})\Phi_{sol,mn,x,j}]\} \cdot t \quad (3.21)$$

$$Q_{sol,op} = \{[\sum_k \Phi_{sol,mn,k}] + [\sum_j(1 - b_{tr,U})\Phi_{sol,mn,x,j}]\} \cdot t \quad (3.22)$$

Dove:

- $\Phi_{sol,mn,k}$: flusso termico k-esimo di origine solare mediato sul tempo (W oppure kW);
- $b_{tr,U}$: fattore di riduzione per l'ambiente adiacente non climatizzato x;
- $\Phi_{sol,mn,x,j}$: flusso termico j-esimo di origine solare nell'ambiente adiacente non climatizzato x, mediato sul tempo (W oppure kW);

- t: durata del periodo considerato.

Infine, si possono calcolare gli apporti gratuiti totali, dati dalla somma degli apporti solari nei soli elementi trasparenti e gli apporti interni, calcolati mensilmente:

$$Q_{gn} = Q_{sol,w} + Q_{int} \quad (3.23)$$

Non basta però conoscere l'entità degli apporti gratuiti, infatti è necessario valutare anche quale quota di questi contributi risulti effettivamente utile. Una parte dell'energia disponibile, infatti, può essere dispersa oppure non coincidere temporalmente con le esigenze dell'edificio. Il fattore di utilizzo (η) rappresenta proprio il rapporto tra l'energia che può essere realmente sfruttata e quella teoricamente disponibile; può assumere valori compresi tra 0 e 1, dove valori prossimi all'unità indicano che gli apporti gratuiti o le dispersioni vengono utilizzati in modo efficace, mentre valori più bassi evidenziano una minore capacità di sfruttamento. Questo parametro dipende da diversi elementi, tra cui:

- la geometria dell'edificio, intesa come forma, compattezza, orientamento e rapporto tra S/V;
- le proprietà termo-fisiche dell'involucro, quali isolamento, massa e capacità termica interna;
- le caratteristiche e le modalità di funzionamento degli impianti di climatizzazione e ventilazione.

In linea generale, edifici ben isolati, compatti e con elevata inerzia termica riescono a utilizzare meglio gli apporti gratuiti, mostrando valori di $\eta_{H,gn}$ più elevati; al contrario, strutture leggere e caratterizzate da dispersioni rapide presentano fattori di utilizzo più bassi, con una maggiore quota di energia non sfruttata.

Il fattore di utilizzazione degli apporti termici ($\eta_{H,gn}$) per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento, si determina come segue:

- se $Y_H > 0$ e $\neq 1$: $\eta_{H,gn} = \frac{1 - Y_H^{a_H}}{1 - Y_H^{a_H + 1}}$
- se $Y_H = 1$: $\eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1}$

Dove

- $Y_H = \frac{Q_{gn}}{Q_{H,ht}}$ è il rapporto tra apporti e dispersioni;
- $a_H = a_{H,0} + \frac{T}{T_{H,0}}$ è un parametro numerico adimensionale
 - o T: costante di tempo termica della zona [h], calcolata come rapporto tra la capacità termica interna (C_m) e il coefficiente globale di scambio termico.
 - o Valori per il calcolo mensile: Si assume $a_{H,0} = 1$ e $T_{H,0} = 15h$.

Il fattore di utilizzazione degli apporti termici ($\eta_{C,ls}$) per il calcolo del fabbisogno di raffrescamento, si determina come segue:

- se $Y_C > 0$ e $\neq 1$: $\eta_{C,ls} = \frac{1 - Y_C^{-a_C}}{1 - Y_C^{-(a_C+1)}}$
- se $Y_C = 1$: $\eta_{C,ls} = \frac{a_C}{a_C+1}$
- se $Y_C < 0$: $\eta_{C,ls} = 1$

Dove:

- $C = \frac{Q_{gn}}{Q_{C,ht}}$ è il rapporto tra apporti e dispersioni;
- $a_C = a_{C,0} + \frac{T}{T_{C,0}} \cdot k \frac{A_w}{A_f}$ è un parametro numerico adimensionale
 - o T: costante di tempo termica della zona [h], calcolata come rapporto tra la capacità termica interna (C_m) e il coefficiente globale di scambio termico.
 - o A_w è l'area finestrata, mentre A_f è l'area di pavimento climatizzata.
 - o Valori per il calcolo mensile: Si assume $a_{C,0} = 8,1$, e $T_{C,0} = 17h$ e $k = 13$.

3.3 Calcolo degli scambi termici tra esterno e interno

Il flusso termico totale, tra interno e esterno dell'edificio, è dato da:

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve} = [(H_{tr} + H_{ve}) \cdot (\theta_{i,set} - \theta_e) + \sum_k (F_{r,k} \cdot \Phi_{r,mn,k})] \cdot t \quad (3.24)$$

Dove:

- Q_{tr} : energia termica scambiata per trasmissione [MJ];

- Q_{ve} : energia termica scambiata per ventilazione [MJ];
- H_{tr} : coefficiente globale di scambio termico per trasmissione [W/K];
- H_{ve} : coefficiente di scambio termico per ventilazione [W/K];
- $\theta_{i,set}$: temperatura interna di regolazione [°C];
- θ_e : temperatura media mensile dell'ambiente esterno [°C];
- Fr,k : fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste [-];
- $\Phi_{r,mn,k}$: extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo [W];

3.4 Fabbisogni energetici per la climatizzazione dell'edificio

I fabbisogni netti di energia per la climatizzazione invernale si calcolano, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio con la seguente formula:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - (\eta_{H,gn} \cdot Q_{gn}) \quad (3.25)$$

Dove:

- $Q_{H,nd}$: fabbisogno netto di energia termica per il riscaldamento [MJ] o [kWh];
- $Q_{H,ht}$: scambio di energia termica totale, nel caso di riscaldamento [MJ]; il quale è calcolato come segue: $Q_{H,ht} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve}$

dove:

- o $Q_{H,tr}$: energia termica scambiata per trasmissione [MJ];
- o $Q_{H,ve}$: energia termica scambiata per ventilazione [MJ].
- $\eta_{H,gn}$: fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica [-];
- Q_{gn} : apporti totali di energia termica [MJ]; calcolati come: $Q_{gn} = Q_{sol,w} + Q_{int}$

dove:

- o Q_{int} : apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne [MJ];
- o $Q_{sol,w}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati [MJ].

I fabbisogni netti di energia per la climatizzazione estiva, invece, si calcolano per ogni mese e per ogni zona dell'edificio con la seguente formula:

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - (\eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht}) \quad (3,26)$$

Dove:

- $Q_{C,nd}$: fabbisogno netto di energia termica per il raffrescamento [MJ] o [kWh];
- $Q_{C,ht}$: scambio di energia termica totale, nel caso di raffrescamento [MJ]; il quale è calcolato come segue: $Q_{C,ht} = Q_{C,tr} + Q_{C,ve}$

Dove:

- o $Q_{C,tr}$: energia termica scambiata per trasmissione [MJ];
- o $Q_{C,ve}$: energia termica scambiata per ventilazione [MJ].
- $\eta_{C,ls}$: fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica [-];
- Q_{gn} : apporti totali di energia termica [MJ]; calcolati come: $Q_{gn} = Q_{sol,w} + Q_{int}$

dove:

- Q_{int} : apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne [MJ];
- o $Q_{sol,w}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati [MJ].

3.5 Calcolo del fabbisogno energetico per la produzione di ACS

La procedura di calcolo è richiamata all'interno della UNI/TS 11300-2:2014. Si riporta qui di seguito la formula per calcolarlo:

$$Q_w = \rho_w \cdot c_w \cdot \sum_i [V_{w,i} \cdot (\theta_{er,i} - \theta_o)] \cdot G \quad (3.27)$$

Dove:

- ρ_w : massa volumica dell'acqua [kg/m^3];
- c_w : calore specifico dell'acqua, pari a $1,162 \cdot 10^{-3}$ [kWh/(kgK)];
- $V_{w,i}$: volume di acqua giornaliero per l'i-esima attività o servizio richiesto [m^3/g];
- $\theta_{er,i}$: temperatura di erogazione per l'i-esima attività o servizio richiesto [°C];
- θ_o : temperatura dell'acqua fredda in ingresso [°C];
- G : numero dei giorni del periodo di calcolo considerato.

Il volume di acqua richiesto V_w si definisce a seconda della destinazione d'uso dell'edificio:

- Per un edificio residenziale si considera la formula:

$$V_w = a \cdot Su + b \quad (3.28)$$

Dove:

- o a : è un parametro [l/m^2g], come da prospetto della UNI/TS 11300-2;
 - o Su : superficie utile dell'abitazione [m^2].
 - o b : è un parametro [l/g], come da prospetto della UNI/TS 11300-2;
- Per tutte le altre tipologie di edificio:

$$V_w = a \cdot N_u \quad (3.29)$$

Dove:

- o a : fabbisogno specifico giornaliero di acqua calda [l/g] per unità di riferimento, come da prospetto della UNI/TS 11300-2;
- o N_u : parametro variabile in funzione del tipo di edificio, come da prospetto della UNI/TS 11300-2;

3.6 *Calcolo dell'energia primaria*

L'energia primaria consente di descrivere in modo unitario le prestazioni energetiche di un edificio, in quanto integra in un unico parametro sia i fabbisogni energetici dell'edificio sia il comportamento degli impianti che li soddisfano; non si limita quindi all'energia utile richiesta, ma considera anche tutte le perdite e i consumi necessari al funzionamento dei sistemi di produzione e distribuzione del calore. Il procedimento di calcolo parte dal fabbisogno di energia netta dell'edificio $Q_{H,nd}$, per poi incrementarlo tenendo conto delle perdite dei consumi di energia elettrica dei sottosistemi dell'impianto termico (d'accumulo, di regolazione, di distribuzione, di emissione e di generazione), oltre che dei consumi elettrici degli ausiliari. In questo modo si tiene conto delle inefficienze che si verificano durante la conversione dell'energia e la sua erogazione agli ambienti, ottenendo la quantità complessiva di energia primaria necessaria.

Indifferentemente dalla tipologia di impianto preso in considerazione, il fabbisogno di energia primaria Q_p è inteso come:

$$Q_p = \sum_i (Q_{del,i} \cdot f_{p,del,i}) + \sum_i (Q_{exp,i} \cdot f_{p,exp,i}) \quad (3.30)$$

Dove:

- $Q_{del,i}$: energia fornita dal vettore energetico i-esimo [kWh];
- $f_{p,del,i}$: fattore di conversione del vettore energetico i-esimo (en. fornita) [-];
- $Q_{exp,i}$: energia esportata dal vettore energetico i-esimo [kWh];
- $f_{p,exp,i}$: fattore di conversione del vettore energetico i-esimo (en. esportata) [-].

4 Strumenti di incentivazione per l'efficientamento energetico: il ruolo del Conto Termico 3.0

Il Conto Termico 3.0 è un meccanismo di incentivazione finalizzato al sostenimento di interventi di efficientamento energetico e di produzione di energia termica da fonti rinnovabili per impianti di piccole dimensioni. Introdotto con il Decreto Ministeriale del 7 agosto 2025, pubblicato in Gazzetta Ufficiale n.24 del 26 settembre 2025, il Conto Termico 3.0 è entrato in vigore il 25 dicembre 2025 sostituendo il precedente Conto Termico 2.0 (disciplinato dal D.M. 16 febbraio 2016), e andando ad aggiornare ed ampliare le categorie di interventi incentivabili, i soggetti ammessi, le modalità di accesso e le regole tecniche [29].

4.1 Interventi ammissibili

All'interno del Decreto [29], gli interventi incentivabili vengono distinti in due categorie:

- Categoria 1: Interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti, parte di essi o unità immobiliari esistenti, aventi un impianto di climatizzazione (Titolo II - art. 5, comma 1 del Decreto);
- Categoria 2: Interventi di piccole dimensioni per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza in edifici esistenti, parte di essi o unità immobiliari esistenti, aventi un impianto di climatizzazione (Titolo III - art. 8, comma 1 del Decreto);

Di seguito vengono riportate due tabelle riassuntive per ciascuna categoria, in cui vengono identificati i singoli interventi:

Tabella 4.1 - Interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti (Titolo II - art.5, comma 1 del Decreto).

Categoria	Sigla (*)	Tipologia di intervento	Riferimenti Decreto
Titolo II - Interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti, parti di essi o unità immobiliari esistenti	II.A	Isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato	Art. 5, comma 1, lettera a)
	II.B	Sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato	Art. 5, comma 1, lettera b)
	II.C	Installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento e/o sistemi di filtrazione solari esterni di chiusure trasparenti con esposizione da ESE a O, fissi o mobili, non trasportabili	Art. 5, comma 1, lettera c)
	II.D	Trasformazione degli edifici esistenti in "edifici a energia quasi zero"	Art. 5, comma 1, lettera d)
	II.E	Sostituzione di sistemi per l'illuminazione di interni e delle pertinenze esterne esistenti con sistemi di illuminazione efficienti	Art. 5, comma 1, lettera e)
	II.F	Installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico (building automation) degli impianti termici ed elettrici, inclusa l'installazione di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore	Art. 5, comma 1, lettera f)
	II.G	Installazione di elementi infrastrutturali per la ricarica privata di veicoli elettrici, presso l'edificio e le relative pertinenze, realizzata congiuntamente alla sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale dotati di pompe di calore elettriche	Art. 5, comma 1, lettera g)
	II.H	Installazione di impianti solari fotovoltaici e relativi sistemi di accumulo, presso l'edificio o nelle relative pertinenze, realizzata congiuntamente alla sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale dotati di pompe di calore elettriche	Art. 5, comma 1, lettera h)

Tabella 4.2 - Interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza (Titolo III - art.8, comma 1 del Decreto).

Categoria	Sigla (*)	Tipologia di intervento	Riferimenti Decreto
Titolo III - Interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza in edifici esistenti, parti di essi o unità immobiliari esistenti	III.A	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale, anche combinati per la produzione di acqua calda sanitaria, dotati di pompe di calore elettriche o a gas, utilizzando energia aerotermica, geotermica o idrotermica (con potenza termica utile nominale fino a 2.000 kW)	Art. 8, comma 1, lettera a)
	III.B	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con sistemi ibridi factory made o bivalenti a pompa di calore (con potenza termica nominale fino a 2.000 kW)	Art. 8, comma 1, lettera b)
	III.C	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti o di riscaldamento delle serre e dei fabbricati rurali esistenti o per la produzione di energia termica per processi produttivi o immissioni in reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento con generatori di calore alimentati da biomassa, compresi i sistemi ibridi factory made o bivalenti a pompa di calore (con potenza termica nominale fino a 2.000 kW_t)	Art. 8, comma 1, lettera c)
	III.D	Installazione di impianti solari termici, anche abbinati a sistemi di solar cooling (con superficie solare lorda fino a 2.500 m ²)	Art. 8, comma 1, lettera d)
	III.E	Sostituzione di scaldacqua elettrici e a gas con scaldacqua a pompa di calore	Art. 8, comma 1, lettera e)
	III.F	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con l'allaccio a sistemi di teleriscaldamento efficienti (con potenza termica utile nominale fino a 2.000 kW)	Art. 8, comma 1, lettera f)
	III.G	Sostituzione funzionale, totale o parziale, di impianti di climatizzazione invernale esistenti con unità di microgenerazione alimentate da fonti rinnovabili	Art. 8, comma 1, lettera g)

L'ammissibilità agli incentivi del Conto Termico 3.0, sia per gli interventi del Titolo II e del Titolo III, è subordinata al rispetto di requisiti tecnici prestazionali minimi e alla rendicontazione di spese strettamente connesse alla realizzazione delle opere (quali ad esempio la fornitura, la posa, la dismissione dei sistemi preesistenti, prestazioni professionali, ecc..) entro i massimali di costo specifico definiti dal Decreto per ogni singola tecnologia [29].

4.2 Soggetti Ammessi e Soggetti Responsabili

I Soggetti Ammessi sono coloro che possono beneficiare degli incentivi, a condizione che siano proprietari dell'edificio o dell'immobile oggetto di intervento, oppure che ne abbiano la disponibilità in virtù di un altro diritto reale o personale di godimento.

I Soggetti Ammessi sono:

- Le Pubbliche Amministrazioni (PA), le quali possono accedere ad uno o più interventi del Titolo II e Titolo III del Decreto;
- I Privati (persone fisiche o titolari di reddito di impresa o agrario), i quali hanno possibilità di accesso a determinati incentivi in base all'ambito di appartenenza:
 - per i privati appartenenti all'ambito terziario, sarà possibile accedere ad uno o più interventi del II e III Titolo;
 - per i privati dell'ambito residenziale, sarà possibile l'accesso ad uno o più interventi del solo Titolo III;
- Gli Enti del Terzo Settore (ETS), si distinguono in:
 - ETS che non svolgono attività economica (detti anche ETS non economici), i quali possono accedere ad uno o più interventi del II e III Titolo;
 - ETS che svolgono attività economica (detti anche ETS economici), i quali possono accedere agli interventi del Titolo III e del Titolo II solo per l'ambito terziario.

Una figura importante da nominare è il Soggetto Responsabile (SR), ovvero colui che:

- sostiene le spese degli interventi svolti;
- presenta la domanda di accesso agli incentivi al GSE (Gestore dei Servizi Energetici, ovvero l'ente che gestisce e regola i meccanismi di accesso al Conto Termico);
- firma il contratto con il GSE e riceve gli incentivi spettanti;
- conserva i documenti necessari per la durata dell'incentivo e i seguenti 5 anni;
- gestisce le attività di verifica e controllo, pena decadenza e recupero degli incentivi.

Il Soggetto Responsabile ha poi la possibilità di delegare la compilazione della scheda-domanda¹⁵ e la gestione dei contratti con il GSE ad un'altra figura, che viene definita "Soggetto Delegato".

I Soggetti Ammessi possono rivestire il ruolo di Soggetto Responsabile e accedere direttamente agli incentivi, oppure possono accedervi avvalendosi di un altro Soggetto Responsabile, che può essere una ESCo (Energy Service Company)¹⁶ o un qualsiasi altro soggetto abilitato; per poter operare come Soggetto Responsabile, è requisito indispensabile che la ESCo sia in possesso della certificazione UNI CEI 11352 in corso di validità.

Una novità introdotta con il Conto Termico 3.0 è la possibilità per i Soggetti Ammessi di accedere agli incentivi avvalendosi di una Comunità Energetiche (CER), ovvero un insieme di soggetti che producono, consumano e condividono energia da fonti rinnovabili a livello locale, o di un Gruppo di Autoconsumo Collettivo (GAC), ossia un insieme di soggetti che condividono l'energia prodotta da un impianto rinnovabile esclusivamente per l'autoconsumo, di cui sono membri o soci; in questo caso il Soggetto Ammesso deve esserne membro o socio e a questo punto il referente scelto

¹⁵«Modello informatico di scheda anagrafica che caratterizza tecnicamente gli interventi realizzati, gli edifici, i soggetti coinvolti nonché le clausole contrattuali, resa disponibile dal GSE tramite il Portaltermico.» [29].

¹⁶«Persona fisica o giuridica che fornisce servizi energetici ovvero altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica nelle installazioni o nei locali dell'utente e, ciò facendo, accetta un certo margine di rischio finanziario. Il pagamento dei servizi forniti si basa, totalmente o parzialmente, sul miglioramento dell'efficienza energetica conseguito e sul raggiungimento degli altri criteri di rendimento stabiliti (D.lgs. 102/14).» [32].

della gestirà direttamente le spese, presenterà la domanda e coordinerà l'iter amministrativo.

4.3 Requisiti e modalità di accesso agli incentivi

4.3.1 Requisiti di accesso agli incentivi

Per accedere agli incentivi del Conto Termico 3.0 è necessario soddisfare determinati requisiti di carattere generale [29]. Innanzitutto, l'edificio o unità immobiliare oggetto di intervento deve essere di proprietà o di disponibilità dei Soggetti Ammessi e gli interventi devono inoltre essere realizzati su edifici esistenti, ovvero edifici iscritti al catasto edilizio urbano alla data della richiesta di accesso all'incentivo. Oltre ai requisiti generali, per le imprese e gli ETS economici sono previsti ulteriori requisiti da soddisfare, tra cui la presentazione di una richiesta preliminare per l'accesso agli incentivi prima dell'avvio dei lavori e per gli interventi del Titolo II ("Interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti, parti di essi o unità immobiliari esistenti") realizzati su edifici del terziario, le imprese devono garantire una riduzione della domanda di energia primaria rispetto alla situazione pre-intervento del:

- 10% nel caso di intervento singolo;
- 20% per multi-intervento¹⁷ o interventi combinati.

In caso di multi-intervento, se la riduzione è maggiore del 40% è prevista una maggiorazione dell'incentivo secondo quanto stabilito dal Decreto. In tutti e tre i casi sarà necessario allegare un Attestato di Prestazione Energetica (APE)¹⁸ della situazione pre- e post-intervento per attestare tale miglioramento. Infine, per le imprese e gli ETS economici è vietata l'installazione di apparecchiature alimentate da combustibili fossili (ivi comprese apparecchiature alimentate da gas naturale).

¹⁷«Realizzazione contestuale sul medesimo edificio di più interventi di cui agli articoli 5 e 8 del presente decreto, progettati e pianificati come un unico progetto.» [29].

¹⁸«Documento, redatto nel rispetto delle norme contenute nel decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63 (convertito in legge con la legge di conversione 3 agosto 2013, n. 90) e rilasciato da esperti qualificati e indipendenti, che attesta la prestazione energetica di un edificio attraverso l'utilizzo di specifici descrittori e fornisce raccomandazioni per il miglioramento dell'efficienza energetica.» [32].

4.3.2 Modalità di accesso agli incentivi

L'accesso agli incentivi può avvenire attraverso due modalità: accesso diretto o accesso tramite prenotazione [29].

L'accesso diretto è la modalità standard per interventi già realizzati e prevede la presentazione della domanda da parte del Soggetto Responsabile al GSE entro 90 giorni dalla conclusione dell'intervento (limite esteso rispetto ai 60 giorni considerati nel Conto Termico 2.0), pena la non ammissibilità.

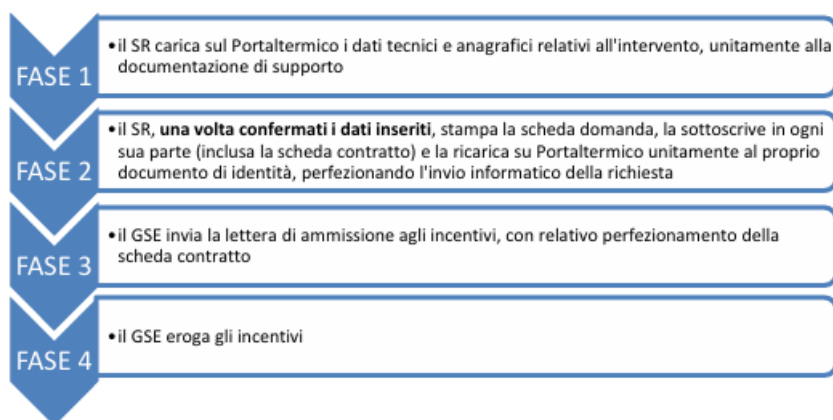


Figura 4.1 - Schema riassuntivo della procedura di accesso diretto [30].

L'accesso tramite prenotazione, invece, è riservato solo alle Pubbliche Amministrazioni e agli ETS, per lavori in corso o ancora in fase di avviamento; la richiesta di prenotazione può essere effettuata dalla Pubblica Amministrazione o dall'ETS come Soggetto Responsabile, oppure tramite una ESCO o soggetti abilitati. In questo caso, la richiesta può essere presentata solo al verificarsi delle seguenti condizioni:

- presenza di una diagnosi energetica e di un provvedimento o atto amministrativo che impegni alla realizzazione di uno degli interventi nella diagnosi, i quali devono essere coerenti con quelli incentivabili dal Decreto; inoltre, se la PA o l'ETS intende utilizzare un contratto di prestazione energetica, deve essere allegato all'atto. Nel caso di edifici colpiti da calamità naturali, basta il progetto esecutivo;
- stipula di un contratto di prestazione energetico con una ESCO, se quest'ultima risulta il Soggetto Responsabile;

- stipula di un contratto di prestazione energetico o di un altro contratto di fornitura integrato per la riqualificazione energetica dei sistemi oggetto di intervento per definire le spese dell'intervento in esame;
- presenza di un provvedimento attestante l'avvenuta assegnazione dei lavori, unito al verbale di consegna dei lavori.

Per gli ETS, le regole rimangono le medesime, con l'obbligo di aggiungere le delibere interne dell'organo competente, le quali attesteranno l'impegno agli interventi e la consegna dei lavori.

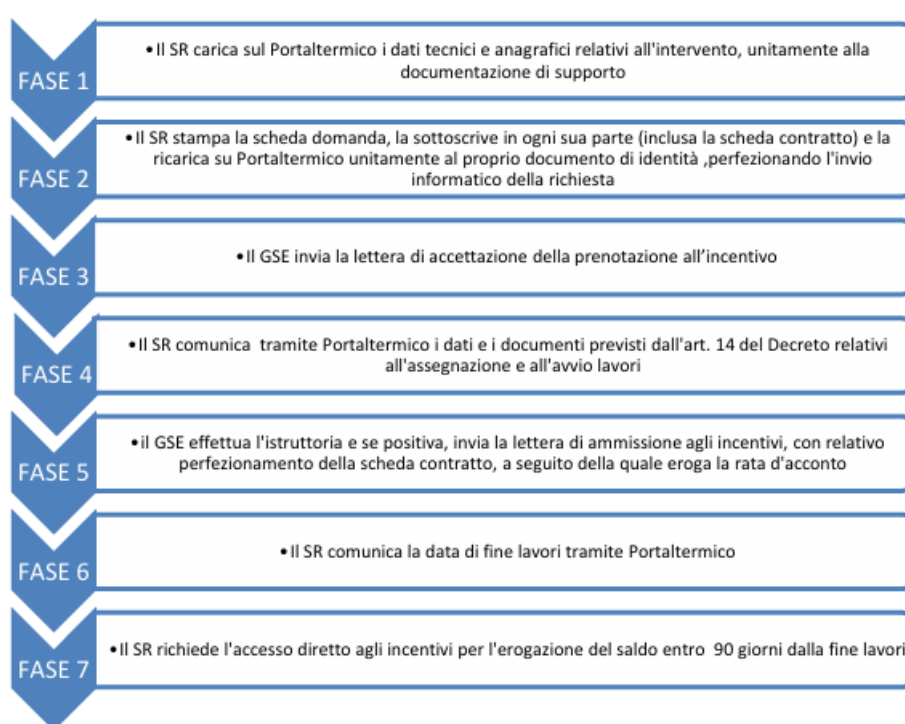


Figura 4.2 - Schema riassuntivo della procedura di accesso tramite prenotazione [30].

4.4 Quantificazione ed erogazione dell'incentivo

Nel Conto Termico 3.0, l'ammontare dell'incentivo è determinato in funzione delle spese ammissibili sostenute per la realizzazione degli interventi, nel rispetto dei massimali tecnici ed economici stabiliti dal Decreto [31]. Nell'articolo 11, comma 1 del Decreto, viene indicato che l'intensità dell'incentivo non può superare il 65% delle spese ammissibili, al netto dell'IVA. Una deroga a tale limite, introdotta con il nuovo Conto Termico e descritta nell'articolo 11, comma 2, è quella riservata alle Pubbliche

Amministrazioni, le quali possono ottenere fino al 100% delle spese ammissibili, nel rispetto dei massimali previsti; in particolare, tale misura si applica agli interventi realizzati su edifici di proprietà di Comuni con popolazione inferiore a 15.000 abitanti, utilizzati direttamente dagli stessi Comuni o da soggetti terzi non riconducibili ad imprese, per lo svolgimento di attività di carattere pubblico-sociale o per l'erogazione di servizi di interesse collettivo attribuiti all'ente locale. Rientrano inoltre nell'ambito di applicazione dell'incentivo al 100% gli interventi realizzati su edifici pubblici ad uso scolastico e su strutture ospedaliere e sanitarie pubbliche, comprese le strutture residenziali, assistenziali e di ricovero appartenenti al Servizio Sanitario Nazionale, secondo le modalità e le condizioni stabilite dal Decreto.

È prevista anche una maggiorazione del 10% dell'incentivo, finalizzata a promuovere l'utilizzo di tecnologie efficienti e di elevata qualità ambientale, per gli interventi dell'articolo 5, comma 1, lettere a) - f) del Decreto che prevedono l'utilizzo di componenti prodotti dall'Unione Europea.

Una altra importante novità riguarda l'intensità dell'incentivo per le imprese e gli ETS economici, disciplinata dal Titolo V del Decreto [29]. Per quanto riguarda gli interventi di efficientamento energetico (Titolo II del Decreto) l'intensità base dell'incentivo è pari al 25% dei costi ammissibili, che sale al 30% nel caso di multi-intervento; tali percentuali possono essere incrementate, sempre fino ad un limite massimo del 65%, in presenza di specifiche condizioni:

- nel caso di piccola impresa, l'aumento è del 20 %,
- nel caso di media impresa, l'aumento spettante è del 10%;
- per interventi in zone assistite (del 15% in caso di interventi in zone assistite che soddisfano le condizioni di cui all'articolo 107, paragrafo 3, lettera a), del Trattato sul funzionamento dell'Unione Europea;
- del 5% in caso di interventi realizzati in zone assistite che soddisfano le condizioni dell'articolo 107, paragrafo 3, lettera c), del Trattato sul funzionamento dell'Unione Europea;

- se gli interventi effettuati portano ad un miglioramento di almeno il 40% della prestazione energetica dell'edificio in termini di energia primaria, l'incremento è del 15%.

Invece, per gli interventi di produzione di energia termica da fonti rinnovabili (Titolo III del Decreto), l'intensità dell'incentivo è del 45% dei costi ammissibili, con un incremento del 20% nel caso di interventi in piccole imprese e del 10% per quelli effettuati in medie imprese.

Per l'accesso all'incentivo, il Decreto prevede l'obbligo di presentazione di una diagnosi energetica pre-intervento e di un attestato di prestazione energetica (APE) post-intervento in caso di interventi realizzati su interi edifici e per gli interventi di cui all'art. 5, comma 1, lettere b) e c) e all'art. 8, comma 1, lettere da a) a g), qualora l'impianto di riscaldamento superi i 200 kW di potenza nominale complessiva. In specifici casi, come nel caso di impianti destinati alla produzione di calore di processo o quelli asserviti a reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento, questi documenti non sono richiesti.

L'incentivo che riguarda le spese di Diagnosi Energetica risulta pari al 100% per le Pubbliche Amministrazioni e fino al 50% per i Privati; in particolari, per le Pubbliche Amministrazioni, è prevista poi la possibilità di ottenere un contributo anticipato per la copertura parziale delle spese sostenute per la redazione della diagnosi energetica, con successiva integrazione a seguito della realizzazione degli interventi.

4.4.1 Erogazione dell'incentivo

L'erogazione e la comunicazione dell'incentivo avviene dopo che il GSE e il Soggetto Responsabile hanno completato la Scheda-Contratto; il GSE verserà l'incentivo entro l'ultimo giorno del mese successivo alla fine del bimestre in cui la scheda è perfezionata. In base all'importo dell'incentivo riconosciuto, varia la modalità di erogazione:

- per importi fino a 15.000 €, l'incentivo viene erogato in un'unica rata;

- per importi superiori, l'erogazione avviene mediante delle rate annuali, il cui numero dipende dal tipo di intervento svolto (come da Tabella 4.3). Nel caso di multi-intervento, il numero di rate è determinato dall'intervento con durata maggiore.

Tabella 4.3 - Durata dell'incentivo in anni in base alla tipologia di intervento. [30]

Tipologia di intervento	Durata dell'incentivo (anni)
Isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato	5
Sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato	5
Installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento e/o sistemi di filtrazione solare esterni per chiusure trasparenti con esposizione da ESE a O, fissi o mobili, non trasportabili	5
Trasformazione "edifici a energia quasi zero"	5
Sostituzione di sistemi per l'illuminazione di interni e delle pertinenze esterne esistenti con sistemi di illuminazione efficienti	5
Installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico (building automation) degli impianti termici ed elettrici, compresa l'installazione di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore	5
Installazione di elementi infrastrutturali per la ricarica privata di veicoli elettrici, congiuntamente alla sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti dotati di pompe di calore elettriche	Come intervento abbinato
Installazione di impianti solari fotovoltaici e relativi sistemi di accumulo, congiuntamente alla sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti dotati di pompe di calore elettriche	Come intervento abbinato
Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, dotati di pompe di calore elettriche o a gas, utilizzando energia aerotermica, geotermica o idrotermica con potenza termica utile nominale ≤ 35 kW	2
Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, dotati di pompe di calore elettriche o a gas, con potenza termica utile nominale > 35 kW e ≤ 2.000 kW	5

Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con sistemi ibridi factory made o bivalenti, installazione di una pompa di calore "addon", con potenza termica utile nominale ≤ 35 kW	2
Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con sistemi ibridi factory made o bivalenti, installazione di una pompa di calore "addon", con potenza termica utile nominale > 35 kW e ≤ 2.000 kW	5
Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale o di riscaldamento delle serre esistenti e dei fabbricati rurali, o per produzione di energia termica per processi produttivi o immissione in reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento con generatori di calore alimentati da biomassa, con potenza termica nominale al focolare ≤ 35 kW	2
Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale o di riscaldamento delle serre esistenti e dei fabbricati rurali, o per produzione di energia termica per processi produttivi o immissione in reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento con generatori di calore alimentati da biomassa, con potenza termica nominale al focolare > 35 kW e ≤ 2.000 kW	5
Installazione di impianti solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria e/o integrazione dell'impianto di climatizzazione invernale, anche abbinati a sistemi di solar cooling, o per la produzione di energia termica per processi produttivi o immissione in reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento, con superficie solare lorda ≤ 50 m ²	2
Installazione di impianti solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria e/o integrazione dell'impianto di climatizzazione invernale, anche abbinati a sistemi di solar cooling, o per la produzione di energia termica per processi produttivi o immissione in reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento, con superficie solare lorda > 50 m ² e ≤ 2.500 m ²	5
Sostituzione di scaldacqua elettrici con scaldacqua a pompa di calore	2
Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con l'allaccio a sistemi di teleriscaldamento efficienti	5
Sostituzione funzionale, totale o parziale, di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale utilizzando unità di microgenerazione alimentate da fonti rinnovabili	5

Per le Pubbliche Amministrazioni e ETS non economici, che intendono procedere tramite accesso diretto, l'erogazione dell'incentivo può avvenire in un'unica rata anche qualora l'importo sia superiore a 15.000 €; mentre per gli ETS economici, l'erogazione in un'unica rata oltre tale soglia può avvenire solo per interventi legati alla produzione di energia termica da fonti rinnovabili (Titolo III).

Nel caso di accesso con Prenotazione, il GSE erogherà le rate nel seguente modo: una prima rata di acconto a seguito della comunicazione dell'avvio dei lavori, un'eventuale rata intermedia a seguito del raggiungimento del 50% delle spese ammissibili e una rata di saldo a fine intervento. L'importo dell'acconto è determinato in funzione della durata dell'incentivo e, di conseguenza, corrisponde al 50% dell'importo complessivo per interventi con durata biennale e ai due quinti per interventi con durata quinquennale; se la rata intermedia è prevista, invece, è calcolata in base al massimale prenotato, al netto dell'acconto erogato, ripartendo la somma restante tra la rata intermedia e il saldo finale.

4.5 Contingente annuo di spesa

Il Conto Termico 3.0 prevede un limite massimo di spesa annua cumulata pari a 900 milioni di euro, suddiviso tra le diverse categorie di beneficiari:

- 400 milioni di euro per gli interventi realizzati dalle Pubbliche Amministrazioni e dagli ETS non economici, di cui 20 milioni destinati alla redazione delle diagnosi energetiche;
- 500 milioni di euro annui per gli interventi realizzati dai soggetti privati, con un limite di 150 milioni di euro per le imprese.

Per le Pubbliche Amministrazioni, il 50% del contingente annuo è riservato per le procedure di accesso tramite prenotazione e una volta raggiunta tale soglia, il GSE potrà accettare ulteriori richieste solo dopo 60 giorni e solo dopo il ripristino delle risorse nell'anno successivo. Allo stesso modo, per i soggetti privati e le imprese, una volta raggiunti i rispettivi limiti, il GSE non accetta ulteriori richieste fino all'inizio del nuovo anno.

4.6 Cumulabilità degli incentivi

La cumulabilità degli incentivi avviene nel caso in cui più forme di agevolazione siano riferite allo stesso intervento e alle stesse voci di spesa. Le condizioni che regolano il cumulo degli incentivi previsti dal Conto Termico 3.0 sono disciplinate dall'articolo 17 del Decreto.

Il Decreto esclude la possibilità di cumulare, per lo stesso intervento, gli incentivi previsti dal Conto Termico 3.0 con ulteriori incentivi statali; sono, tuttavia, previste delle eccezioni, limitate ai fondi di garanzia, ai fondi di rotazione e ai contributi in conto interesse. Per gli edifici di proprietà o utilizzati della Pubblica Amministrazione, è invece concessa la cumulabilità degli incentivi del Decreto con ulteriori agevolazioni in conto capitale, statali e non, nel rispetto del limite del 100% dei costi ammissibili. Per quanto riguarda i GAC e le CER, il cumulo tra gli incentivi del Conto Termico 3.0 e gli incentivi riconosciuti per la condivisione dell'energia ai sensi del D.M. 7 dicembre 2023, n 414 (DM CACER) è consentito solo entro i limiti di intensità di aiuto stabiliti dalle relative discipline di riferimento. Per le imprese, si applicano le regole previste dall'articolo 27 del Decreto, le quali consentono il cumulo con altri aiuti di Stato solo entro i limiti massimi di intensità di aiuti previsti. Per le ESCO, i soggetti privati coinvolti in partenariati pubblico-privati e per le comunità energetiche rinnovabili, valgono gli stessi limiti previsti per il soggetto per conto del quale operano. Infine, il Soggetto Responsabile deve dichiarare la presenza di eventuali ulteriori incentivi pubblici o aiuti di Stato nel momento in cui effettua la richiesta dell'incentivo del Conto Termico 3.0, a quel punto il GSE avrà il compito di verificare il rispetto dei limiti di cumulabilità.

4.7 *Calcolo degli incentivi*

4.7.1 *Interventi di efficientamento energetico*

Per gli interventi di piccole dimensioni di incremento dell'efficienza energetica di cui all'articolo 5, comma 1 lettere a), b) c) del Decreto [29], l'incentivo viene calcolato come segue:

$$I_{tot} = \%_{spesa} \cdot C \cdot S_{int}, \quad \text{con } I_{tot} \leq I_{max} \quad (4.1)$$

Dove:

- $\%_{spesa}$: percentuale di spesa incentivata rispetto al totale sostenuto, dove i valori sono riportati in Tabella 4.4 (€);

- C : costo specifico sostenuto per l'intervento ($\text{€}/\text{m}^2$), nel rispetto dei valori massimi di C ai fini del calcolo dell'incentivo max riconoscibile, come da Tabella 4.4;
- S_{int} : superficie oggetto di intervento (m^2);
- I_{tot} : incentivo totale cumulato per gli anni di godimento per il determinato intervento (€);
- I_{max} : valore massimo dell'incentivo, riportato in Tabella 4.4 (€).

Tabella 4.4 - Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e corrispondente valore massimo dell'incentivo. [30]

Tipologia di intervento		Percentuale incentivata (% spesa)	Costo massimo ammissibile (Cmax)	Valore massimo dell'incentivo (Imax) [€]
Articolo 5, comma 1, lettera a)	<i>i. Strutture opache orizzontali: isolamento coperture</i>			(i+ii+iii) ≤ 1.000.000
	- Esterno	40 (*) (**) (***)	300 €/m ²	
	- Interno	40 (*) (**) (***)	150 €/m ²	
	- Copertura ventilata	40 (*) (**) (***)	350 €/m ²	
	<i>ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti</i>			
	- Esterno	40 (*) (**) (***)	170 €/m ²	
	- Interno	40 (*) (**) (***)	150 €/m ²	
	<i>iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali</i>			
	- Esterno	40 (*) (**) (***)	200 €/m ²	
	- Interno	40 (*) (**) (***)	100 €/m ²	
Articolo 5, comma 1, lettera b)	Sostituzione di chiusure trasparenti, comprensive di infissi, con sistemi di termoregolazione (Zone A, B, C)	40 (**) (***)	700 €/m ²	500.000
	Sostituzione di chiusure trasparenti, comprensive di infissi, con sistemi di termoregolazione (Zone D, E, F)	40 (**) (***)	800 €/m ²	500.000
Articolo 5, comma 1, lettera c)	Installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento infissi, anche integrati, o mobili	40 (***)	250 €/m ²	90.000
	Installazione di sistemi di filtrazione solare: 1. Selettive non riflettenti 2. Selettive riflettenti chiare/medie/forti	40 (***)	130 €/m ²	30.000

Dove:

- (*) per i lavori eseguiti nelle Zone Climatiche E ed F, l'incentivo sale al 50%;
- (**) se ai lavori di isolamento termico (Art. 5, comma 1, lett. a) del Decreto si affiancano gli interventi dell'Art. 8, comma 1, lett. a), b), c) o e) del Decreto, la percentuale sale al 55% per ogni singolo intervento effettuato.
- (***) per gli interventi realizzati su strutture pubbliche identificate dall'Art. 11, comma 2 del Decreto, l'incentivo arriva al 100% della spesa ammissibile.

Per gli interventi descritti dall'art. 5, comma 1, lettere d), e), f) del Decreto [29], l'incentivo viene calcolato come segue:

$$I_{tot} = \%_{spesa} \cdot C \cdot S_{ed}, \quad \text{con } I_{tot} \leq I_{max} \quad (4.2)$$

Dove,

- $\%_{spesa}$: percentuale di spesa incentivata rispetto al totale sostenuto, dove i valori sono riportati in Tabella 4.5 (€);
- C : costo specifico sostenuto per l'intervento (€/m², dove i m² rappresentano la superficie utile calpestabile che è ≤ della superficie utilizzata per il calcolo delle prestazioni energetiche), nel rispetto dei valori massimi di C ai fini del calcolo dell'incentivo max riconoscibile, come da Tabella 4.5;
- S_{ed} : superficie oggetto di intervento (m²), dove la superficie utile calpestabile dell'edificio è quella utilizzata per il calcolo della prestazione energetica;
- I_{tot} : incentivo totale cumulato per gli anni di godimento per il determinato intervento (€);
- I_{max} : valore massimo dell'incentivo, riportato in Tabella 4.5 (€).

Tabella 4.5 - Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e corrispondente valore massimo dell'incentivo. [30]

Tipologia di intervento		Percentuale incentivata (% spesa)	Costo massimo ammissibile (Cmax)	Valore massimo dell'incentivo (Imax) [€]
Articolo 5, comma 1, lettera d)	Trasformazione in edifici "nZEB" - zona climatica A, B, C	65 (***)	1.000 €/m ²	2.500.000
	Trasformazione in edifici "nZEB" - zona climatica D, E, F	65 (***)	1.300 €/m ²	3.000.000
Articolo 6, comma 1, lettera e)	i. Sostituzione corpi illuminanti con lampade ad alta efficienza	40 (***)	15 €/m ²	50.000
	ii. Sostituzione corpi illuminanti con lampade a LED	40 (***)	35 €/m ²	140.000
Articolo 5, comma 1, lettera f)	Installazione di tecnologie di building automation	40 (***)	60 €/m ²	100.000

Dove:

- (***) per gli interventi realizzati su strutture pubbliche identificate dall'Art. 11, comma 2 del Decreto, l'incentivo arriva al 100% della spesa ammissibile

Per gli interventi di cui all'art. 5, comma 1, lettera g) del Decreto [29], ovvero gli interventi riguardanti l'installazione di elementi infrastrutturali per la ricarica privata di veicoli elettrici, l'incentivo è pari al 30% delle costo massimo ammissibile, il quale varia in funzione della potenza e della tecnologia adottata:

- Ricarica standard ($7,4 \text{ kW} < P < 22 \text{ kW}$):
 - o Sistemi monofase: massimo 2400 € per punto di ricarica;
 - o Sistemi trifase: massimo 8400 € per punto di ricarica.
- Ricarica ad alta potenza ($P > 22 \text{ kW}$):
 - o Sistemi con potenza compresa $22 \text{ kW} < P < 50 \text{ kW}$: massimo 1200 €/kW;
 - o Sistemi con potenza compresa $50 \text{ kW} < P < 100 \text{ kW}$: massimo 60000 €/infrastruttura;
 - o Sistemi con potenza compresa $P > 100 \text{ kW}$: massimo 110000 €/infrastruttura.

È importante precisare che, l'intensità del contributo non può eccedere il valore dell'incentivo previsto per la sostituzione di impianti di climatizzazione invernali con sistemi a pompa di calore elettrica.

Per gli interventi di cui all'art. 5, comma 1, lettera h) del Decreto [29], ovvero gli interventi riguardanti l'installazione di impianti solari e stoccaggio energetico, l'incentivo è pari al 20% delle costo massimo ammissibile, così distinto:

- Fotovoltaico:
 - o Impianti fino a 20 kW prevedono massimo 1500 €/kW;
 - o Impianti 20 kW < P < 200 kW prevedono massimo 1200 €/kW;
 - o Impianti 200 kW < P < 600 kW prevedono massimo 1100 €/kW;
 - o Impianti 600 kW < P < 1000 kW prevedono massimo 1050 €/kW.
- Accumulo: indipendentemente dalla taglia, il costo massimo è di 1000 €/kWh.

Sono inoltre previste le seguenti maggiorazioni:

- 10% per moduli fotovoltaici prodotti negli Stati membri dell'Unione europea con un'efficienza a livello di modulo almeno pari al 21,5 per cento;
- 15% per moduli fotovoltaici con celle, prodotti negli Stati membri dell'Unione europea, con un'efficienza a livello di cella almeno pari al 23,5 per cento;
- 20% per moduli prodotti negli Stati membri dell'Unione europea composti da celle bifacciali ad eterogiunzione di silicio o tandem prodotte nell'Unione europea con un'efficienza di cella almeno pari al 24,0 per cento.

Anche in questo caso, l'intensità del contributo non può eccedere il valore dell'incentivo previsto per la sostituzione di impianti di climatizzazione invernali con sistemi a pompa di calore elettrica.

4.7.1.1 Interventi di efficientamento energetico

Per gli interventi di cui all'art. 8, comma 1, lettera a) del Decreto [29], ovvero gli interventi sulle pompe di calore elettriche o a gas, l'incentivo è calcolato come segue:

$$Ia_{tot} = E_i \cdot C_i \quad (4.3)$$

Dove:

- Ia_{tot} : incentivo annuo [€];
- E_i : energia termica prodotta da ciascun generatore installato in un anno, ed è pari a:

$$E_i = Q_u \cdot \left(1 - \frac{1}{SCOP}\right) \cdot k_p \quad (4.4)$$

Dove:

- Q_u : calore totale prodotto dall'impianto [kWh_t], calcolato come:

$$Q_u = P_{rated} \cdot Q_{uf} \quad (4.5)$$

dove Q_{uf} è il coefficiente di utilizzo che dipende dalla zona climatica¹⁹ in cui si trova l'edificio (come da Tabella 4.6), mentre P_{rated} è la potenza della pompa in condizioni standard di riferimento);

- SCOP: coefficiente di prestazione stagionale della pompa di calore elettrica installata; (nel caso di sistemi "Fixed Double Duct" invece che esserci lo SCOP nella formula verrà utilizzato il COP, che sarebbe il coefficiente di prestazione della pompa di calore);
- k_p : coefficiente di premialità, calcolato come segue:

$$k_p = \frac{\eta_s}{\eta_{s,minEcodesign}} \quad (4.6)$$

dove η_s è l'efficienza stagionale della pompa di calore, la quale deve essere $> \eta_{s,minEcodesign}$ (efficienza stagionale minima per l'immissione nel mercato); per i sistemi "Fixed Double Duct", è calcolato facendo il rapporto tra $\frac{COP}{COP_{min}}$;

- C_i = coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta, espresso in Tabella 4.7; se sono previsti più generatori della stessa tipologia, il coefficiente è individuato dalla somma delle potenze dei generatori di tipologia analoga. [€/kWh_t];

¹⁹Suddivisione del territorio nazionale in funzione dei gradi-giorno che caratterizzano ogni località; il territorio nazionale è suddiviso in sei zone climatiche, dalla A (la più calda) alla F (la più fredda); (D.P.R. 412/93, art. 2) [32]

Mentre per gli interventi sulle pompe di calore a gas, l'incentivo è calcolato come segue:

$$Ia_{tot} = E_i \cdot C_i \quad (4.7)$$

Dove:

- Ia_{tot} : incentivo annuo [€];
- E_i : energia termica prodotta da ciascun generatore installato in un anno, ed è pari a:

$$E_i = Q_u \cdot \left(1 - \frac{1}{SPER \cdot CC}\right) \cdot k_p \quad (4.8)$$

Dove:

- o Q_u : calore totale prodotto dall'impianto [kWh_t], calcolato come:

$$Q_u = P_{rated} * Q_{uf} \quad (4.9)$$

dove Q_{uf} è il coefficiente di utilizzo che dipende dalla zona climatica²⁰ in cui si trova l'edificio (come da Tabella 4.6), mentre P_{rated} è la potenza della pompa in condizioni standard di riferimento);

- o SPER: coefficiente di prestazione stagionale della pompa di calore a gas installata;
- o CC: coefficiente di conversione pari a 2,5;
- o k_p : coefficiente di premialità, calcolato come segue:

$$k_p = \frac{\eta_s}{\eta_{s,min Ecodesign}} \quad (4.10)$$

dove η_s è l'efficienza stagionale della pompa di calore, la quale deve essere superiore al $\eta_{s,min Ecodesign}$ (efficienza stagionale minima per l'immissione nel mercato); per i sistemi "Fixed Double Duct", è calcolato facendo il rapporto tra $\frac{COP}{COPmin}$;

- C_i = coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta, espresso in Tabella 4.7; se sono previsti più generatori della stessa tipologia, il coefficiente

²⁰ Suddivisione del territorio nazionale in funzione dei gradi-giorno che caratterizzano ogni località; il territorio nazionale è suddiviso in sei zone climatiche, dalla A (la più calda) alla F (la più fredda); (D.P.R. 412/93, art. 2) [32]

è individuato dalla somma delle potenze dei generatori di tipologia analoga.
 $[\text{€}/\text{kWh}_t]$;

Tabella 4.6 - Coefficiente di utilizzo per le pompe di calore elettriche e a gas. [29]

Zona climatica	Q_{if}
A	600
B	850
C	1100
D	1400
E	1700
F	1800

Tabella 4.7 - Coefficienti di valorizzazione dell'energia termica prodotta da pompe di calore elettriche e a gas. [29]

Regolamento EU	Tipo di pompa di calore (ambiente esterno / interno)	Denominazione commerciale	Potenza Prated	Coefficiente C_i
Reg. 206/2012	aria/aria	split/multisplit	$\leq 12 \text{ kW}_t$	0,07
		Fixed double duct	$\leq 12 \text{ kW}_t$	0,2
Reg. 2281/2016	aria/aria	VRF/VRV	13 – 35 kW_t	0,15
			$> 35 \text{ kW}_t$	0,055
		rooftop	$\leq 35 \text{ kW}_t$	0,15
			$> 35 \text{ kW}_t$	0,055
Reg. 813/2013	aria/acqua	aria/acqua	$\leq 35 \text{ kW}_t$	0,15
			$> 35 \text{ kW}_t$	0,06
Reg. 2281/2016	acqua/aria	acqua/aria	$\leq 35 \text{ kW}_t$	0,16
			$> 35 \text{ kW}_t$	0,06
Reg. 813/2013	acqua/acqua	acqua/acqua	$\leq 35 \text{ kW}_t$	0,16
			$> 35 \text{ kW}_t$	0,06
Reg. 206/2012 Reg. 2281/2016	salamoia/aria	salamoia/aria	$\leq 35 \text{ kW}_t$	0,16
			$> 35 \text{ kW}_t$	0,06
Reg. 813/2013	salamoia/acqua	salamoia/acqua	$\leq 35 \text{ kW}_t$	0,16
			$> 35 \text{ kW}_t$	0,06

Per gli interventi di cui all'art. 8, comma 1, lettera b) del Decreto [29], l'incentivo è calcolato come segue:

$$Ia_{tot} = k \cdot E_i \cdot C_i \quad (4.11)$$

Dove:

- k : Coefficiente di utilizzo che premia l'integrazione del sistema. Vale 1,25 per i sistemi ibridi factory made, mentre per i sistemi bivalenti è pari a 1 (se la caldaia

ha una potenza termica $P_n < 35$ kW) o 1,1 (se la caldaia ha una potenza termica $P_n > 35$ kW).

- E_i : Energia termica incentivata prodotta annualmente, calcolata come:

$$E_i = Q_u \cdot \left[1 - \frac{1}{SCOP} \right] \cdot kp \quad (4.12)$$

Dove:

- o Q_u : Calore totale prodotto, derivante dal prodotto tra la potenza nominale della pompa di calore (P_{rated}) e il coefficiente di utilizzo specifico per la zona climatica (Q_{uf}).
 - o SCOP: Coefficiente di prestazione stagionale; per le pompe di calore a gas, il valore di riferimento è calcolato come: SPER · 2,5.
 - o kp : Coefficiente di premialità, definito dal rapporto tra l'efficienza energetica stagionale della pompa di calore considerata (η_s) e il requisito minimo previsto dal regolamento Ecodesign ($\eta_{s,min}$).
- C_i : Coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta (€/kWh), variabile in base alla tecnologia e alla potenza installata.

Per i sistemi bivalenti, l'incentivo è calcolato esclusivamente sulla quota di energia rinnovabile fornita dalla pompa di calore, applicando una maggiorazione del 10% sul coefficiente k qualora la caldaia a condensazione superi i 35 kW di potenza.

Per gli interventi di cui all'art. 8, comma 1, lettera c) del Decreto [29], l'incentivo è calcolato come segue:

- Per caldaie a biomassa

$$Ia_{tot} = P_n \cdot h_r \cdot C_i \cdot C_e \quad (4.13)$$

Dove:

- o Ia_{tot} : incentivo annuo [€];
- o P_n : potenza termica nominale dell'impianto [kW];
- o h_r : ore di funzionamento dell'impianto (stimate in base alla zona climatica, come da Tabella 4.8) [h];

- C_i : coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta, come da Tabella 4.9 [$\text{€}/\text{kWh}_t$];
 - C_e : coefficiente premiante riferito alle emissioni in atmosfera di polveri (varia in base al tipo di pompa in stallata, come riportato nelle Tabelle 4.10 e 4.11);
- Per stufe a pellet, a legna e termocamini:

$$Ia_{tot} = 3,35 \cdot \ln(P_n) \cdot h_r \cdot C_i \cdot C_e \quad (4.14)$$

Dove:

- Ia_{tot} : incentivo annuo [€];
- P_n : potenza termica nominale dell'impianto [kW];
- h_r : ore di funzionamento dell'impianto (stimate in base alla zona climatica, come da Tabella 4.8) [h];
- C_i : coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta, come da Tabella 4.9 [$\text{€}/\text{kWh}_t$];
- C_e : coefficiente premiante riferito alle emissioni in atmosfera di polveri (varia in base al tipo di pompa in stallata, come riportato nelle Tabelle 4.10 e 4.11);

Tabella 4.8 - Ore di funzionamento stimate in relazione alla zona climatica di appartenenza. [29]

Zona climatica	h_r
A	600
B	850
C	1100
D	1400
E	1700
F	1800

Tabella 4.9 - Coefficienti di valorizzazione dell'energia termica prodotta da impianti a biomassa. [29]

Tipologia di intervento	Ci per gli impianti con potenza termica nominale ≤ 35 kWt (€/kWh _t)	Ci per gli impianti con potenza termica nominale > 35 kWt e ≤ 500 kWt (€/kWh _t)	Ci per gli impianti con potenza termica nominale > 500 kWt (€/kWh _t)
Caldaie a biomassa	0,06	0,025	0,02
Termocamini e stufe a legna	0,045	-	-
Termocamini e stufe a pellet	0,055	-	-

Tabella 4.10 - Coefficiente moltiplicativo C_e applicabile ai generatori di calore alimentati a biomassa con potenza inferiore o uguale a 500 kW, in relazione ai livelli di emissione di particolato primario. [29]

Riduzione percentuale delle emissioni di Particolato Primario rispetto ai valori previsti dal DM 186/2017 per la classe 5 stelle	C_e
fino al 20% compreso	1
dal 20% al 50% compreso	1,2
superiore al 50%	1,5

Tabella 4.11 - Coefficiente moltiplicativo C_e applicabile ai generatori di calore alimentati a biomassa con potenza superiore a 500 kW in relazione ai livelli di emissione di particolato primario. [29]

Riduzione percentuale delle emissioni di Particolato Primario rispetto ai valori della tabella 14	C_e
fino al 20% compreso	1
dal 20% al 50% compreso	1,2
superiore al 50%	1,5

Tabella 4.12 - Emissioni in atmosfera per i generatori a biomassa di potenza termica nominale pari a 500 kW, misurati utilizzando le metodiche indicate nella 15 dell'Allegato I del Decreto (rif. 13% di O₂). [29]

PP (mg/Nm ³)	COT (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)
10	5	150	150

Per gli interventi di cui all'art. 8, comma 1, lettera d) del Decreto [29], ovvero gli interventi di installazione di impianti solari termici, l'incentivo è calcolato come segue:

$$Ia_{tot} = C_i \cdot Q_u \cdot SI \quad (4.15)$$

Dove:

- Ia_{tot} : incentivo annuo [€];
- C_i : coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta, ricavato da Tabella 4.13 [€/kWh_t];
- Q_u : energia termica prodotta [kWh_t/m²], calcolata come segue:
 - o per impianti solari termici realizzati con collettori piani/sottovuoto/a tubi evacuati:

$$Q_u = \frac{Q_{col}}{AG} \quad (4.16)$$

- o per impianti "factory made":

$$Q_u = \frac{QL}{3,6 * Ag} \quad (4.17)$$

- o per impianti termici realizzati utilizzando collettori solari a concentrazione:

$$Q_u = \frac{Q_{sol}}{AG} \quad (4.18)$$

Dove:

- AG: area lorda di un singolo modulo del collettore o del sistema solare, definita in accordo alla norma UNI EN ISO 9806 e UNI EN 12976, riportata nella certificazione Solar Keymark o, per i collettori a concentrazione, nell'attestazione rilasciata dall'ENEA;
- Q_{col}: energia termica annua prodotta da un singolo modulo di collettore solare [kWh_t] , riferita alla località di Wurzburg, indicata nella certificazione Solar Keymark e selezionata in base alla temperatura media del collettore come da Tabella 4.14;
- Q_{sol}: energia termica annua prodotta da un singolo modulo di collettore solare a concentrazione [kWh_t] riferita alla località di Atene, indicata nella certificazione Solar Keymark e o nell'attestazione di conformità rilasciata dall'ENEA in base alla temperatura media di funzionamento come da Tabella 4.14;
- QL: energia termica annua prodotta dal sistema solare factory made [MJ], definita secondo la norma UNI EN 12976, riferita alla

località di Wurzburg, indicata nell'attestazione di conformità rilasciata dal laboratorio accreditato (in questo caso, nel report si fa riferimento al carico termico giornaliero [l/giorno] uguale al volume del serbatoio solare o al valore più vicino ad esso.

- *SI*: superficie solare lorda dell'impianto [m^2], ricavata moltiplicando il numero di moduli per l'area lorda del singolo modulo;

Tabella 4.13 - Coefficienti di valorizzazione dell'energia termica prodotta da impianti solari termici. [29]

Tipologia di intervento	Ci incentivo annuo in € (kWh _t in funzione della superficie SI del campo solare espressa in m^2)				
	SI≤12	12<SI≤50	50<SI≤200	200<SI≤500	SI≥500
Impianti solari termici per produzione di a.c.s.	0,35	0,32	0,13	0,12	0,11
Impianti solari termici per la produzione di a.c.s e riscaldamento ambiente anche per la produzione di calore di processo a bassa temperatura o asserviti a reti di teleriscaldamento	0,36	0,33	0,13	0,12	0,11
Impianti solari termici a concentrazione anche per la produzione di calore di processo o asserviti a reti di teleriscaldamento	0,38	0,35	0,13	0,12	0,11
Impianti solari termici con sistema di <i>solar cooling</i>	0,43	0,4	0,17	0,15	0,14

Tabella 4.14 - Temperature medie di riferimento in relazione alla destinazione del calore prodotto. [29]

Applicazione a cui è destinato il calore prodotto	T _m - Temperatura media di funzionamento
Produzione di acqua calda sanitaria	50 °C
Produzione combinata di a.c.s. e riscaldamento ambiente	
Produzione di calore di processo a bassa temperatura	75 °C
Solar cooling a bassa temperatura	
Produzione di calore di processo a media temperatura	150 °C
Solar cooling a media temperatura	

Per gli interventi di cui all'art. 8, comma 1, lettera e) del Decreto [29], ovvero gli interventi di sostituzione di scaldacqua elettrici e a gas con scaldacqua in pompa di

calore, l'incentivo è pari al 40% delle spese ammissibili; in base ai litri e alle classi energetiche di prodotto secondo il Regolamento Europeo 812/2013²¹ si avranno costi massimi ammissibili differenti:

- Classe A:
 - o Per 150 litri, il costo massimo è di 500 €;
 - o Per scaldacqua con più di 150 litri, il costo massimo è di 1100 €;
- Classe +:
 - o Per 150 litri, il costo massimo è di 500 €;
 - o Per scaldacqua con più di 150 litri, il costo massimo è di 1100 €.

Per gli interventi di cui all'art. 8, comma 1, lettera f) del Decreto [29], ovvero gli interventi di sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con l'allaccio a sistemi di teleriscaldamento efficienti, l'incentivo è calcolato come segue:

$$I_{tot} = \%_{spesa} \cdot C \cdot P_{nsc}, \quad \text{con } I_{tot} < I_{max} \quad (4.19)$$

Dove:

- I_{tot} : incentivo totale cumulato per gli anni di godimento [€];
- I_{max} : incentivo massimo riconoscibile, come da Tabella 4.15 [€];
- $\%_{spesa}$: percentuale incentivata delle spese ammissibili, come da Tabella 4.15;
- C : costo specifico sostenuto per la tecnologia installata, determinato dal rapporto tra la spesa totale (€) e la potenza termica nominale della sottostazione. Per il calcolo dell'incentivo, si fa riferimento ai valori massimi presenti in Tabella 4.15.
- P_{nsc} : potenza nominale della sottostazione del teleriscaldamento installata [kW].

²¹Il Regolamento Delegato (UE) n. 812/2013 integra la Direttiva (UE) 2010/30 stabilendo norme per l'etichettatura energetica di scaldacqua, serbatoi per acqua calda e insiemi di scaldacqua e dispositivi solari.

Tabella 4.15 - Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e corrispondente valore massimo dell'incentivo [29].

Tipologia di intervento	Percentuale incentivata della spesa ammissibile (% spesa)	Costo massimo ammissibile (Cmax)	Valore massimo dell'incentivo I _{max} (€)
Allacciamento con installazione sottostazione TLR p _{nsc} ≤ 50 kW	65	200 €/kW	6.500
Allacciamento con installazione sottostazione TLR 50 kW ≤ p _{nsc} ≤ 150 kW	65	160 €/kW	15.000
Allacciamento con installazione sottostazione TLR p _{nsc} > 150 kW	65	130 €/kW	30.000

Per gli interventi di cui all'art. 8, comma 1, lettera g) del Decreto [29], ovvero gli interventi di sostituzione totale o parziale di impianti di climatizzazione invernale esistenti con unità di microgenerazione alimentate da fonti rinnovabili, l'incentivo è calcolato come segue:

$$I_{tot} = \%_{spesa} \cdot C \cdot Pn_{int}, \quad \text{con } I_{tot} < I_{max} \quad (4.20)$$

Dove:

- I_{tot} : incentivo totale cumulato per gli anni di godimento [€];
- I_{max} : incentivo massimo riconoscibile [€];
- $\%_{spesa}$: percentuale incentivata delle spese ammissibili, come da Tabella 4.16;
- C : costo specifico sostenuto per la tecnologia utilizzata nell'intervento [€/kW], dove i valori massimi sono riportati in Tabella 4.16;
- Pn_{int} : potenza nominale della sottostazione del teleriscaldamento installata [kW].

Per l'installazione di micro-cogeneratori, i parametri di calcolo dell'incentivo [29] prevedono una percentuale incentivata della spesa ammissibile (% spesa) pari al 65%, entro i limiti di un costo massimo ammissibile (Cmax) di 5.000 €/kWe e un tetto massimo di incentivazione (I_{max}) di 100.000 €

4.7.2 Diagnosi energetiche e attestati di prestazione energetica

Per il calcolo dell'incentivo, all'interno del Decreto [29] vengono riportati i costi unitari massimi ammissibili [$\text{€}/\text{m}^2$] e il valore massimo erogabile, come da Tabella 4.17 seguente:

Tabella 4.16 - Costi unitari massimi ammissibili e valore massimo erogabile per diagnosi energetiche ante intervento e certificazione energetica. [29]

Tipologia di intervento	Superficie utile dell'immobile (m^2)	Costo unitario massimo ($\text{€}/\text{m}^2$)	Valore massimo erogabile (€)
Edifici residenziali della classe E.1 del DPR 26 Agosto 1993, n.412 esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme	Fino a 1600 compresi	1,5	10.000
	oltre 1600	1	
Edifici della classe E.3 del DPR 26 Agosto 1993, n.412 (ospedali e case di cura)	[-]	3,5	18.000
Tutti gli altri edifici	Fino a 2500 compresi	2,5	13.000
	Oltre 2500	2	

In particolare, la quantificazione dell'incentivo avviene secondo la formula:

$$\text{Incentivo} = \min[(\text{Superficie} \times \text{Costo unitario massimo}), \text{Valore max erogabile}] \quad (4.19)$$

5 Metodologia di analisi e descrizione dei casi studio

Il presente capitolo definisce la metodologia adottata per l'analisi tecnico-economica degli interventi di sostituzione impiantistica applicati ai casi studio esaminati. L'obiettivo è costruire una procedura strutturata e replicabile che consenta di valutare in modo coerente gli effetti energetici ed economico-finanziari degli interventi, rendendo confrontabili edifici industriali differenti inseriti nello stesso contesto. La metodologia si basa su un percorso sequenziale, così come schematizzato nel diagramma di flusso (Figura 5.1), che sintetizza le fasi operative dell'analisi e ne evidenzia la logica integrata.

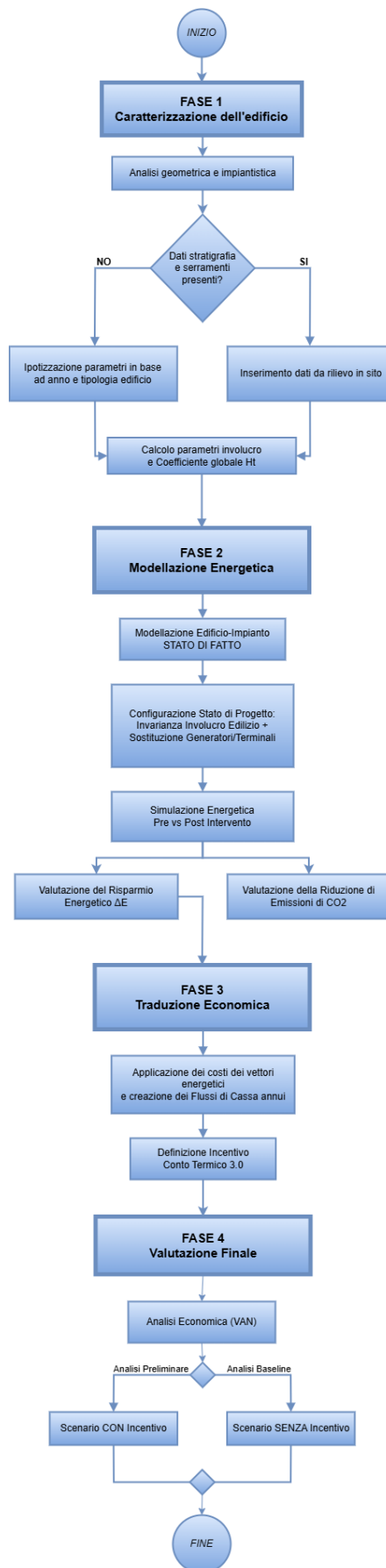


Figura 5.1 - Diagramma di flusso della metodologia.

La metodologia si articola, quindi, in quattro macro-fasi:

1. Caratterizzazione dell'edificio:

In questa fase iniziale si esegue l'analisi geometrica e impiantistica dello stato di fatto. Qualora i dati sulla stratigrafia e sui serramenti non siano disponibili dal rilievo in sito, si procede con un'ipotesi basata sull'epoca di costruzione e la tipologia edilizia. L'obiettivo è determinare i parametri dell'involucro (trasmittanze, superfici, volumi) e calcolare il coefficiente medio di scambio termico per trasmissione H'_t , fondamentale per descrivere il comportamento termico dell'edificio.

2. Modellazione energetica:

Si procede con la modellazione del sistema edificio-impianto, confrontando poi lo Stato di Fatto con lo Stato di Progetto (caratterizzato dall'invarianza dell'involucro e dalla sostituzione di generatori e terminali). La simulazione energetica permette di quantificare il risparmio energetico ΔE e la riduzione delle emissioni di CO_2 .

3. Traduzione economica:

I risultati energetici vengono convertiti in termini monetari applicando i costi unitari dei vettori energetici per generare i flussi di cassa annui; in questa fase viene integrato il calcolo dell'incentivo Conto Termico 3.0.

4. Valutazione economico-finanziaria:

L'ultima fase prevede lo svolgimento dell'analisi economica, finalizzata al calcolo del VAN (Valore Attuale Netto) come indicatore cardine per determinare la redditività e la creazione di valore dell'investimento. L'analisi si sdoppia per confrontare lo scenario "base" con quello incentivato, evidenziando come il contributo influisca sul beneficio economico complessivo.

La metodologia adottata si fonda su un principio centrale, ovvero considerare l'intervento di sostituzione impiantistica non soltanto come una modifica tecnica del sistema edificio-impianto, ma come un investimento. In questa prospettiva, l'intervento viene analizzato attraverso strumenti propri del controllo di gestione, al

fine di misurarne la capacità di generare valore nel tempo. Sebbene gli interventi oggetto di studio siano già stati realizzati per esigenze operative aziendali, nel presente lavoro essi vengono esaminati secondo una prospettiva di analisi ex-post, dove l'obiettivo non è supportare una decisione preventiva, bensì valutare e confrontare in modo sistematico i risultati ottenuti, misurando il risparmio energetico conseguito, i benefici economici generati e la riduzione delle emissioni associate. In questo modo, l'analisi tecnica e quella economica risultano integrate all'interno di un'unica procedura coerente, la cui struttura operativa viene approfondita nel capitolo 5.1, con l'illustrazione dei parametri utilizzati, delle relazioni di calcolo e degli indicatori adottati.

5.1 *Struttura del metodo*

La prima fase ha l'obiettivo di descrivere in modo quantitativo il comportamento energetico dell'edificio nello stato di fatto.

In particolare, sono state analizzate:

- le superfici disperdenti dell'involucro (pareti opache, copertura, pavimento, serramenti), con le rispettive stratigrafie;
- la presenza di ponti termici significativi;
- i volumi climatizzati V (m^3);
- la configurazione impiantistica esistente (generazione, distribuzione, emissione).

Il punto di partenza per l'analisi energetica dell'involucro è il calcolo del coefficiente globale di scambio termico per trasmissione H_t [W/K], che rappresenta la conduttanza termica totale dell'edificio e definisce la quantità di calore che l'involucro disperde verso l'esterno per ogni grado di differenza tra temperatura interna ed esterna:

$$H_t = \sum_k (A_k \cdot U_k) + \sum_j (L_j \cdot \psi_j) \quad (5.1)$$

Dove:

- A_k : superficie del componente k-esimo dell'involucro [m^2];
- U_k : trasmittanza termica del componente k-esimo dell'involucro [W/m^2K];

- L_j : lunghezza del ponte termico j-esimo [m];
- ψ_j : trasmittanza termica lineare del ponte termico j-esimo [W/mK].

Tuttavia, poiché il valore di H_t è direttamente proporzionale alla dimensione dell'edificio, esso non risulta idoneo per un confronto diretto tra casi studio con volumetrie differenti. Per ovviare a questo limite, si utilizza la trasmittanza media H'_t [W/m²K], ottenuta normalizzando H_t rispetto alla superficie disperdente complessiva ($\sum A_k$):

$$H'_t = \frac{H_t}{\sum A_k} \quad (5.2)$$

Nel presente lavoro, H'_t viene utilizzato come strumento per interpretare la “struttura energetica passiva” dell'edificio; un valore elevato di H'_t indica un involucro meno efficiente, che richiederà una maggiore potenza impiantistica per compensare le dispersioni e garantire il comfort interno. L'impiego di questo parametro normalizzato permette quindi di isolare la qualità dei componenti edilizi (isolamenti, infissi, ponti termici) dalla scala dimensionale dell'edificio, garantendo un confronto oggettivo e tecnicamente rigoroso tra i diversi edifici analizzati.

La fase successiva ha previsto la modellazione energetica dello stato di fatto, mediante simulazione, al fine di determinare il fabbisogno energetico annuo per la climatizzazione e i consumi energetici associati al sistema impiantistico esistente. Successivamente, è stata modellata la configurazione di progetto, corrispondente alla situazione post-intervento di sostituzione impiantistica. La differenza tra i consumi pre- e post-intervento consente poi di quantificare il beneficio energetico generato dall'investimento. Si definisce, quindi, il risparmio energetico annuo [kWh/anno] come:

$$\Delta E = E_{pre} - E_{post} \quad (5.3)$$

Dove:

- E_{pre} : consumo energetico annuo pre intervento [kWh/anno];
- E_{post} : consumo energetico annuo post intervento [kWh/anno].

Il risparmio energetico rappresenta l'output tecnico della modellazione energetica; da qui è possibile calcolare il risparmio energetico percentuale è calcolato secondo la seguente relazione:

$$\Delta E\% = \frac{E_{pre} - E_{post}}{E_{pre}} \cdot 100 \quad (5.4)$$

Al fine di ottenere un confronto omogeneo, è necessario ricondurre tutti i consumi a un'unica unità di misura energetica. Il gas naturale viene quindi convertito in kWh mediante un fattore basato sul potere calorifico inferiore, assunto nel presente lavoro pari a 10,69 kWh/Sm³. Tale indicatore consente di valutare in modo coerente l'efficacia delle strategie di riqualificazione impiantistica, tenendo conto sia della riduzione dei fabbisogni sia delle eventuali modifiche del mix energetico, come nel caso della transizione da sistemi a gas a soluzioni elettriche.

Sebbene non rientri direttamente nella costruzione dei flussi di cassa, accanto alla valutazione energetica è stata stimata la variazione delle emissioni di CO₂ associate ai consumi energetici, al fine integrare l'analisi con una dimensione di sostenibilità:

$$\Delta m_{CO_2} = m_{CO_2,pre} - m_{CO_2,post} \quad (5.5)$$

Per poter valutare l'intervento come investimento, il risparmio energetico viene convertito in risparmio economico annuo [€/anno] mediante l'applicazione dei costi unitari dei vettori energetici, al fine di rappresentare il beneficio monetario ricorrente generato dall'intervento:

$$R = \Delta E \cdot c_{energia} \quad (5.6)$$

Dove:

- ΔE : risparmio energetico annuo [kWh/anno];
- $c_{energia}$: costo unitario del vettore energetico in esame.

Sulla base dell'investimento iniziale I_0 , dei costi di manutenzione, del risparmio economico annuo R e dell'eventuale incentivo derivante dal Conto Termico 3.0, vengono costruiti i flussi di cassa CF_t lungo l'orizzonte temporale di vita utile dell'impianto n (circa 20 anni); essi rappresentano l'input per l'analisi economica

dell'investimento, finalizzata al calcolo del VAN (Valore Attuale Netto) [€], il quale misura la creazione di valore attualizzata generata dall'investimento:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (5.7)$$

Dove:

- CF_t : flusso di cassa al tempo t [€];
- r : tasso di attualizzazione [-];
- n : vita utile dell'intervento [anni];

5.2 Inquadramento dei casi di studio

I casi studio analizzati sono costituiti da tre edifici a destinazione produttiva localizzati nel medesimo contesto territoriale. La selezione non è casuale, ma risponde a una precisa impostazione metodologica, ovvero quella di garantire la confrontabilità tecnica ed economica degli interventi attraverso l'omogeneità delle condizioni climatiche e delle variabili al contorno. Tale impostazione consente di isolare l'effetto delle soluzioni impiantistiche adottate, riducendo l'influenza di fattori ambientali esterni sul confronto dei risultati energetici ed economici.

L'inquadramento climatico è stato effettuato in conformità a quanto previsto dal D.P.R. n. 412, art. 2, del 26 agosto 1993, che suddivide il territorio nazionale in sei zone climatiche (dalla A alla F) sulla base dei gradi-giorno (GG); i gradi-giorno rappresentano la somma, estesa a tutti i giorni dell'anno, delle differenze positive tra la temperatura interna convenzionale di riferimento (20 °C) e la temperatura media esterna giornaliera (T_e), calcolati come:

$$GG = \sum(20 - T_e) \quad (5.8)$$

Tale indicatore esprime la severità climatica del territorio e consente di stimare il fabbisogno termico per la climatizzazione invernale.



Figura 5.2 - Gradi giorno per impianti riscaldamento e fabbisogno termico.

Sebbene il parametro dei GG sia prettamente riferito alla climatizzazione invernale, l'appartenenza alla medesima zona climatica implica anche condizioni estive sostanzialmente analoghe in termini di andamento delle temperature medie e di livelli di irraggiamento solare. La climatizzazione estiva, pur assumendo un ruolo sempre più di rilievo risulta però ancora meno strutturata dal punto di vista normativo rispetto a quella invernale; tuttavia, la condivisione dello stesso contesto territoriale garantisce condizioni di raffrescamento confrontabili anche sotto questo profilo.

I tre edifici oggetto di studio ricadono nella medesima zona climatica (Zona E), risultando pertanto soggetti a condizioni ambientali comparabili in termini di durata del periodo di riscaldamento (che va dal 15 ottobre al 15 aprile), temperatura esterna di progetto, severità invernale e andamento stagionale delle temperature estive. Tuttavia, la confrontabilità non è fondata esclusivamente sull'appartenenza alla stessa zona climatica; essi infatti sono inseriti nello stesso ambito territoriale e presentano condizioni a contorno analoghe anche sotto il profilo dell'irraggiamento solare e della configurazione urbanistica, senza differenze significative in termini di latitudine, altitudine o morfologia del sito tali da determinare variazioni rilevanti negli apporti solari gratuiti in regime invernale o nei carichi termici estivi. L'uniformità delle

condizioni esterne rappresenta pertanto un presupposto fondamentale, in quanto, eventuali differenze nei risultati possono essere ricondotte principalmente alle caratteristiche proprie degli edifici e ai sistemi impiantistici installati, e non a variabili climatiche o ambientali non controllate.

Per quanto riguarda la classificazione d'uso, l'art. 3 del D.P.R. 412/93 suddivide gli edifici in categorie in funzione della destinazione prevalente:

- E.1: Edifici adibiti a residenza e assimilabili:
 - E.1 (1): abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo, quali abitazioni civili e rurali, collegi, conventi, case di pena, caserme;
 - E.1 (2): abitazioni adibite a residenza con occupazione saltuaria, quali case per vacanze, fine settimana e simili;
 - E.1 (3): edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari;
- E.2: Edifici adibiti a uffici e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorporabili agli effetti dell'isolamento termico;
- E.3: Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani nonché le strutture protette per l'assistenza ed il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici;
- E.4: Edifici adibiti ad attività ricreative o di culto e assimilabili:
 - E.4 (1): quali cinema e teatri, sale di riunioni per congressi;
 - E.4 (2): quali mostre, musei e biblioteche, luoghi di culto;
 - E.4 (3): quali bar, ristoranti, sale da ballo;
- E.5: Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili: quali negozi, magazzini di vendita all'ingrosso o al minuto, supermercati, esposizioni;
- E.6: Edifici adibiti ad attività sportive:
 - E.6 (1): piscine, saune e assimilabili;
 - E.6 (2): palestre e assimilabili;
 - E.6 (3): servizi di supporto alle attività sportive;
- E.7: Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili;
- E.8: Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili.

Tutti e tre gli edifici oggetto di studio presentano una destinazione prevalente riconducibile alla categoria E.8, in quanto destinati principalmente ad attività produttive; uno dei tre edifici include tuttavia anche una porzione destinata a uffici, classificabili come E.2.

In fase di modellazione energetica mediante il software Edilclima, la destinazione d'uso è stata impostata selezionando la categoria principale E.8 per ciascun edificio, in coerenza con la funzione prevalente dell'immobile; per l'edificio (C) che include anche aree uffici è stata selezionata anche la categoria secondaria E.2, in modo da rappresentare correttamente l'articolazione funzionale interna. Il software consente infatti di indicare una o più categorie tra quelle previste dal D.P.R. 412/93 e di definire una categoria principale, che viene considerata ai fini delle verifiche normative previste dal D.M. 26 giugno 2015; tale impostazione garantisce coerenza tra classificazione normativa e configurazione reale degli edifici.

Tra i tre casi studio, l'edificio denominato A è stato selezionato come caso pilota ed è stato oggetto di modellazione energetica sviluppata direttamente nell'ambito del tirocinio, sia nello stato di fatto sia nello stato di progetto. Tale attività ha consentito di controllare l'intero processo di costruzione del modello energetico e di determinare i consumi pre- e post-intervento, lasciando all'edificio A la funzione di caso di riferimento per la definizione e la validazione della procedura di modellazione, che è stata successivamente applicata anche agli altri casi studio. Per l'edificio A, tuttavia, non erano disponibili le stratigrafie dettagliate delle strutture opache né i dati tecnici relativi ai serramenti esistenti; in assenza di documentazione progettuale precisa, si è pertanto proceduto alla definizione di una stratigrafia ipotetica coerente con la tipologia costruttiva e con l'epoca di realizzazione dell'immobile. Trattandosi di un edificio industriale datato, nel software Edilclima è stata ricostruita una configurazione rappresentativa delle soluzioni costruttive tipiche del periodo di realizzazione; gli edifici industriali di tale epoca, infatti, erano generalmente caratterizzati dall'assenza di strati isolanti dedicati oppure dalla presenza di livelli di isolamento estremamente limitati, comunque non confrontabili con gli standard prestazionali richiesti dalla normativa vigente. La scelta modellistica adottata è stata finalizzata a garantire coerenza tecnica e plausibilità dei valori di trasmittanza inseriti,

evitando l'introduzione di ipotesi migliorative non supportate e assicurando una rappresentazione realistica delle condizioni originarie dell'involucro, coerente con la tipologia edilizia e con il periodo costruttivo. Per quanto concerne i serramenti, in mancanza di dati specifici, sono stati utilizzati i valori di default previsti dal software per serramenti esistenti di vecchia generazione, anch'essi coerenti con le prestazioni termiche tipiche di edifici industriali non recentemente riqualificati. Per gli edifici B e C si è fatto riferimento a modelli energetici sviluppati dall'azienda ospitante il tirocinio, ai quali è stata applicata la medesima sequenza metodologica di elaborazione dei dati, al fine di valutare il risparmio energetico, la corrispondente riduzione delle emissioni di CO_2 e la successiva traduzione in benefici economici annui. L'analisi economico-finanziaria dell'intervento di sostituzione impiantistica è stata quindi condotta per tutti e tre gli edifici mediante la costruzione dei flussi di cassa incrementali e il calcolo degli indicatori di convenienza. Quindi, l'edificio A rappresenta il riferimento metodologico per la costruzione e la verifica del processo di modellazione energetica, mentre l'estensione dell'analisi agli edifici B e C consente di applicare la procedura sviluppata a casi reali differenti ma comparabili sotto il profilo tecnico, dimostrando la replicabilità del metodo anche in presenza di configurazioni impiantistiche differenti. La presenza di tre edifici, omogenei per condizioni climatiche ma differenziati per configurazione edilizia e articolazione funzionale, introduce così una dimensione comparativa che rafforza la solidità dell'analisi.

5.3 Strumenti di calcolo e software di supporto alle analisi

L'applicazione della metodologia descritta nei paragrafi precedenti necessita l'utilizzo di strumenti di calcolo in grado di supportare le diverse fasi di analisi energetica e della valutazione economico-finanziaria degli interventi. Nel dettaglio, la modellazione energetica degli edifici è stata sviluppata mediante il software Edilclima EC700, con il software IRIS come supporto alla definizione dei ponti termici dell'involucro edilizio mediante analisi agli elementi finiti e, infine, per la determinazione dell'incentivo economico derivante dal Conto Termico 3.0 è stato utilizzato un foglio di calcolo dedicato in ambiente Microsoft Excel, utilizzato per

applicare le formule previste dal meccanismo incentivante. L'utilizzo di tali strumenti consente di supportare operativamente le diverse fasi della metodologia adottata; in particolare, la modellazione energetica permette di determinare i consumi energetici degli edifici e di quantificare i risparmi associati agli interventi impiantistici, mentre il calcolo degli incentivi consente di integrare nella valutazione economica il contributo previsto dai meccanismi di incentivazione agli interventi di efficientamento energetico. Gli strumenti software, quindi, non rappresentano l'oggetto dell'analisi, ma costituiscono un supporto tecnico alla metodologia sviluppata, permettendo di applicare in modo sistematico il processo di valutazione ai casi studio considerati; nei paragrafi seguenti viene pertanto descritto il ruolo operativo dei diversi strumenti all'interno della procedura di analisi.

5.3.1 Modellazione energetica degli edifici: Edilclima e IRIS

Per la modellazione energetica degli edifici oggetto di studio e per la determinazione dei consumi energetici associati allo stato di fatto e allo stato di progetto è stato utilizzato il software Edilclima EC700, sviluppato da Edilclima S.r.l., uno degli strumenti professionali maggiormente diffusi nell'ambito della progettazione energetica degli edifici. Nel contesto metodologico della presente tesi risulta fondamentale determinare i fabbisogni energetici degli edifici nelle diverse configurazioni analizzate, al fine di quantificare il risparmio energetico conseguibile attraverso gli interventi di riqualificazione impiantistica e di tradurre successivamente tale beneficio in termini economici; l'utilizzo di un software di simulazione energetica consente di costruire un modello digitale dell'edificio nel quale vengono integrate tutte le principali variabili che concorrono alla determinazione dei consumi energetici. In particolare, il modello energetico sviluppato considera:

- le condizioni climatiche del sito di riferimento;
- la geometria dell'edificio;
- le caratteristiche termo-fisiche dell'involucro edilizio;
- la presenza di ponti termici;
- la configurazione e le prestazioni dei sistemi impiantistici.

Il processo di modellazione energetica all'interno del software si sviluppa attraverso una sequenza di fasi che consentono di ricostruire digitalmente il comportamento energetico dell'edificio. La prima fase consiste nell'inserimento dei dati generali relativi all'edificio e alla sua localizzazione geografica. In questa fase vengono definiti parametri quali l'ubicazione, la destinazione d'uso e le condizioni climatiche del sito. Nella Figura 5.3 viene mostrata la maschera relativa ai dati climatici dove, in accordo alla UNI 10349:2016 (da applicare a partire dal 29.6.2016) e a seguito dell'inserimento del comune e della provincia in cui è ubicato l'edificio, il software determina automaticamente i principali parametri climatici caratteristici del contesto territoriale, tra cui:

- la temperatura esterna di progetto;
- l'irraggiamento solare medio;
- il valore dei gradi-giorno;
- la durata convenzionale della stagione di riscaldamento.

Questo passaggio assume particolare rilevanza nella metodologia adottata nel presente lavoro di tesi, in quanto consente di garantire che le simulazioni energetiche siano basate su condizioni climatiche coerenti con il territorio di riferimento. Inoltre, considerando che i casi studio analizzati si collocano nella medesima zona climatica (Zona E), tale impostazione permette di porre gli edifici nelle stesse condizioni al contorno, rendendo il confronto tra i risultati energetici più significativo.

Figura 5.3 – Maschera dati climatici Edilclima.

Nella maschera relativa, invece, al regime normativo (Figura 5.4) si va a definire il regime normativo secondo il quale effettuare le verifiche di legge e gli attestati energetici dell'edificio. Sia per le verifiche di legge/relazione tecnica sia per la redazione degli attestati energetici, se la Regione in cui è ubicato l'edificio è dotata di un proprio regolamento è possibile selezionare il regolamento specifico di tale regione (come nel caso dell'Emilia Romagna, dove sono ubicati i tre edifici oggetto di studio). Per garantire l'omogeneità dei risultati, le "opzioni lavoro" sono state impostate in modo identico per tutti e tre gli edifici analizzati, adottando i seguenti criteri:

- Ponti Termici: è stato scelto il calcolo analitico per consentire l'inserimento puntuale di ogni nodo, associando la specifica trasmittanza termica lineica alle strutture opache o trasparenti coinvolte.
- Resistenze Liminari: si è optato per il metodo dell'Appendice A UNI EN ISO 6946, che determina le resistenze esterne (R_{se}) in funzione dei dati climatici reali (vento e temperatura) della località.
- Serre e Locali non Climatizzati: l'utilizzo del calcolo semplificato e analitico permette un approccio flessibile, definendo la metodologia più idonea durante la creazione di ogni singolo componente di tipo U.
- Capacità Termica: è stato impostato il calcolo semplificato basato sui valori tabellati della UNI/TS 11300-1, opzione indicata per edifici esistenti in assenza di stratigrafie certificate.
- Ombreggiamenti: attraverso il calcolo automatico, le ostruzioni e le schermature vengono modellate e computate direttamente all'interno del modulo grafico.
- Radiazione Solare: In conformità alla UNI 10349-1:2016, è stato selezionato il calcolo tramite angolo di Azimut per valutare con precisione l'apporto solare basato sull'orientamento effettivo.

Anche per quanto riguarda le opzioni legislative, si è scelto di adottare una configurazione univoca per tutti e tre gli edifici analizzati:

- FAQ Ministeriali (agosto 2016): il calcolo del rendimento globale medio stagionale è stato impostato secondo le direttive ministeriali, rapportando il

fabbisogno ideale del fabbricato (valutato con sola ventilazione naturale) all'energia primaria in ingresso;

- Verifica Condensa Interstiziale: l'analisi dei fenomeni igrotermici segue i criteri della norma UNI EN ISO 13788, in linea con le FAQ di dicembre 2018, garantendo una valutazione accurata ma meno restrittiva rispetto ai modelli puramente teorici;
- Regime Normativo (UNI/TS 11300-4 e 5:2016): in conformità alla data di redazione della pratica, il calcolo fa riferimento al pacchetto normativo aggiornato al 29 giugno 2016, standard richiesto per la corretta elaborazione degli APE e delle verifiche di legge attuali.

Figura 5.4 - Maschera regime normativo Edilclima.

Successivamente vengono definite le caratteristiche termo-fisiche degli elementi che compongono l'involucro edilizio; per ciascuna struttura opaca, quali pareti verticali, coperture e pavimenti, vengono inserite le stratigrafie costruttive specificando i materiali costituenti e gli spessori dei diversi strati; il software mette a disposizione un archivio di materiali che consente di associare automaticamente ai diversi elementi i parametri necessari al calcolo delle proprietà termiche, quali conducibilità, densità e capacità termica. Nel processo di modellazione dell'involucro edilizio, ogni struttura deve essere associata a una specifica tipologia, in funzione della direzione delle dispersioni termiche e della tipologia di ambiente confinante, in conformità alle

indicazioni normative utilizzate per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici:

- Le strutture di T identificano gli elementi disperdenti direttamente verso l'ambiente esterno. Tali elementi costituiscono la parte principale dell'involucro disperdente dell'edificio;
- Le strutture di G rappresentano invece gli elementi a contatto con il terreno, come pavimenti appoggiati sul suolo, pavimenti su vespaio aerato o non aerato. Per questa tipologia di strutture la determinazione delle prestazioni termiche deve tenere conto dell'interazione con il terreno, mediante il calcolo della trasmittanza equivalente controterra secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 13370;
- Le strutture di U individuano gli elementi che separano ambienti climatizzati da locali non climatizzati o serre solari. In questi casi il calcolo delle dispersioni termiche considera la temperatura del locale adiacente attraverso opportuni coefficienti di correzione (btr) o con procedure di calcolo più dettagliate;
- Le strutture di N identificano le superfici confinanti con unità immobiliari adiacenti appartenenti allo stesso edificio. Questa classificazione consente al software di valutare le dispersioni termiche verso ambienti limitrofi, considerando o meno la presenza di locali riscaldati nelle unità confinanti in base alle impostazioni di calcolo adottate;
- Le strutture di A rappresentano elementi che separano ambienti climatizzati mantenuti a temperature differenti rispetto a quella di progetto e non appartenenti alla stessa zona o all'edificio oggetto di analisi;
- Le strutture di E e R riguardano invece elementi appartenenti a locali non climatizzati:
 - le strutture di tipo E sono disperdenti verso l'ambiente esterno,
 - le strutture di tipo R sono disperdenti verso il terreno.
- Infine, le strutture di D identificano i divisori interni tra ambienti climatizzati appartenenti alla medesima zona termica, come tramezze e solai interni. Questi elementi non contribuiscono alle dispersioni termiche dell'involucro, ma

vengono considerati esclusivamente ai fini del calcolo della capacità termica interna dell'edificio.

Nel caso delle superfici trasparenti vengono invece definite le caratteristiche dei serramenti, includendo le dimensioni delle superfici vetrate, la tipologia di vetratura, le caratteristiche del telaio e l'eventuale presenza di sistemi di schermatura. Queste informazioni permettono al software di valutare sia le dispersioni per trasmissione attraverso le superfici vetrate sia gli apporti solari gratuiti che contribuiscono al bilancio energetico complessivo dell'edificio.

Un aspetto particolarmente rilevante nella valutazione delle prestazioni energetiche dell'involucro riguarda la presenza dei ponti termici, ossia zone dell'edificio caratterizzate da discontinuità geometriche o costruttive che determinano un incremento locale delle dispersioni di calore e possono influenzare significativamente il comportamento termo-igrometrico delle strutture. Per una determinazione più accurata di tali fenomeni è stato utilizzato il software IRIS, sviluppato per l'analisi numerica dei ponti termici mediante simulazioni agli elementi finiti. Attraverso questo approccio è possibile rappresentare in modo dettagliato la geometria del nodo costruttivo, assegnare le proprietà termiche dei materiali e definire le condizioni al contorno relative agli ambienti interno ed esterno. Il software consente quindi di simulare il campo di temperatura all'interno della sezione analizzata e di valutare il comportamento termico del nodo costruttivo.

Tra i principali risultati ottenuti attraverso l'analisi con IRIS rientrano:

- la determinazione della trasmittanza termica lineica del ponte termico (ψ);
- la rappresentazione grafica delle isoterme all'interno della sezione del nodo;
- la visualizzazione del campo di flusso termico e delle direzioni di dispersione del calore.

L'analisi delle isoterme consente inoltre di individuare eventuali zone critiche dal punto di vista termo-igrometrico, nelle quali la temperatura superficiale interna può risultare particolarmente bassa, favorendo fenomeni di condensa superficiale o formazione di muffa. I valori di trasmittanza lineica ottenuti tramite l'analisi numerica

vengono successivamente integrati nel modello energetico dell'edificio sviluppato in Edilclima EC700, contribuendo alla determinazione più accurata delle dispersioni complessive dell'involucro edilizio. La definizione accurata dell'involucro rappresenta infatti un passaggio fondamentale nella modellazione energetica di un edificio, poiché le dispersioni attraverso le superfici disperdenti costituiscono uno dei principali fattori che determinano il fabbisogno energetico per la climatizzazione.

Una volta definite le caratteristiche costruttive dell'involucro, il modello energetico viene completato mediante l'inserimento delle superfici disperdenti e delle zone termiche dell'edificio nell'input grafico. Il software consente infatti di ricostruire la configurazione geometrica dell'edificio tramite un'interfaccia grafica nella quale è possibile importare planimetrie provenienti da file CAD o immagini di riferimento. Su questa base grafica vengono quindi disegnate le pareti, le coperture, i solai e gli elementi trasparenti, permettendo al software di calcolare automaticamente grandezze fondamentali quali:

- l'estensione delle superfici disperdenti;
- l'orientamento delle facciate;
- i volumi degli ambienti climatizzati;

La determinazione di tali parametri risulta particolarmente importante nell'ambito della metodologia sviluppata nella presente tesi, poiché essi costituiscono i dati di base per il calcolo delle dispersioni termiche dell'edificio e per la determinazione della trasmittanza media (H'_t), introdotta precedentemente. Una volta definito il modello geometrico, si procede all'inserimento dei dati relativi ai singoli locali e alle rispettive zone termiche. In questa fase vengono specificati i parametri di set-point termico, gli eventuali apporti interni e le caratteristiche della ventilazione; in particolare per gli edifici non residenziali deve essere considerato anche il contributo dell'illuminazione, sia in termini di consumi elettrici sia di apporti termici. A livello di zona termica è possibile inserire ulteriori parametri, come eventuali fattori di recupero nel caso di sistemi di ventilazione con recupero di calore. È poi possibile determinare la portata d'aria di ventilazione o con la norma UNI/TS 11300-1:2014 che prevede il calcolo a partire dai ricambi d'aria soltanto per edifici residenziali ed industriali (categorie

E.1(1), E.1(2) ed E.8), oppure in conformità alla normativa UNI EN 16798, sulla base della destinazione d'uso, dell'affollamento previsto, della qualità dell'aria richiesta e del livello di inquinamento interno. Il software calcola quindi automaticamente la portata necessaria e le relative dispersioni energetiche. Per ciascun locale è inoltre possibile personalizzare i parametri geometrici e costruttivi rispetto ai valori di default, definendo ad esempio altezze differenti o associando più elementi edilizi (come pavimenti o solai) nel caso di condizioni al contorno non uniformi. Il software consente infine di aggregare più locali distribuiti su diversi livelli in un'unica entità, permettendo una rappresentazione coerente di volumi che si sviluppano su più piani. Completata la fase di input, il modello viene sottoposto a verifica al fine di individuare eventuali incongruenze, prima di procedere con le successive elaborazioni.

Completata la definizione dell'involucro edilizio, il modello energetico viene ulteriormente arricchito mediante l'inserimento delle caratteristiche dei sistemi impiantistici. In particolare, vengono specificati i parametri relativi ai diversi sottosistemi che compongono l'impianto di climatizzazione, tra cui:

- il sistema di generazione del calore;
- la rete di distribuzione dell'energia termica;
- i sistemi di emissione negli ambienti climatizzati.

Sulla base di tutte le informazioni inserite, il software esegue il calcolo dei fabbisogni energetici dell'edificio per la climatizzazione invernale ed estiva, restituendo i consumi energetici annui associati ai diversi servizi energetici. Vengono inoltre considerati eventuali sistemi per la produzione di acqua calda sanitaria e la presenza di impianti solari fotovoltaici. Nel contesto della presente tesi tale funzionalità è stata utilizzata per simulare due configurazioni distinte per ciascun edificio analizzato:

- la configurazione nello stato di fatto, corrispondente alla situazione precedente all'intervento di riqualificazione impiantistica;
- la configurazione nello stato di progetto, corrispondente alla situazione successiva all'implementazione delle strategie di retrofit energetico.

Il confronto tra i risultati ottenuti nelle due configurazioni consente di determinare il risparmio energetico annuo generato dagli interventi analizzati, parametro che rappresenta il punto di partenza per la successiva valutazione economico-finanziaria sviluppata nei capitoli successivi.

Tra gli output principali del software rientrano tabelle riepilogative dei fabbisogni energetici, grafici dei consumi stagionali, valori di trasmittanza delle strutture edilizie e risultati delle verifiche normative. Tali risultati costituiscono la base informativa dalla quale sono stati estratti i dati energetici utilizzati nella presente tesi per la quantificazione dei consumi nello stato di fatto e nello stato di progetto.

5.3.2 Calcolo degli incentivi tramite foglio di calcolo

Come illustrato nei capitoli precedenti, il meccanismo di incentivazione del Conto Termico 3.0 rappresenta uno strumento di supporto economico agli interventi di efficientamento energetico e di incremento della produzione di energia termica da fonti rinnovabili. Nell'ambito della presente tesi, tale meccanismo assume un ruolo rilevante nella valutazione economico-finanziaria degli interventi analizzati, in quanto il contributo riconosciuto può incidere in modo significativo sul costo effettivo dell'investimento. Per integrare in modo coerente il beneficio economico derivante dagli incentivi all'interno dell'analisi economica, è stato utilizzato un foglio di calcolo dedicato in ambiente Excel, utilizzato come strumento di supporto per la stima dell'entità dell'incentivo associato agli interventi considerati nei casi studio.

La struttura del foglio di calcolo è organizzata secondo una logica modulare, che riprende le principali categorie di intervento previste dal Conto Termico 3.0, includendo differenti sezioni dedicate alle varie tipologie di intervento ammissibili. Prima di procedere al calcolo dell'incentivo per una specifica tipologia di intervento, il foglio di calcolo richiede l'inserimento di una serie di informazioni generali di inquadramento, necessarie per definire correttamente il contesto dell'intervento. In questa fase iniziale vengono inseriti alcuni dati di base (Figura 5.5) quali:

- dati dell'edificio in cui vengono effettuati uno o più interventi;
- la localizzazione geografica (provincia);

- la tipologia di soggetto beneficiario (proprietà): in questo caso si va a distinguere tra Pubblica Amministrazione, Pubblica Amministrazione (< 15.000 abitanti), Privata, Impresa, Ente del Terzo Settore (ETS). Nel caso venga selezionata l'opzione "Impresa" si accenderanno le celle sottostanti relative a:
 - o soggetto: per identificare la dimensione dell'impresa;
 - o ubicazione in una zona assistita;
 - o miglioramento maggiore o uguale del 40%.
- la zona climatica di riferimento e i gradi giorno;
- la superficie dell'edificio;
- eventuali informazioni relative alla presenza o meno di un multi-intervento.

Nome edificio		Zona climatica	
Indirizzo		Superficie utile	
Provincia		Gradi Giorno	
Proprietà	Pubblica	Multi-intervento	
Soggetto	Piccola impresa		
Zona assistita	-		
Miglioramento $\geq 40\%$	NO		

Figura 5.5 - Dati di partenza calcolo incentivo Conto Termico 3.0.

Queste informazioni costituiscono il primo livello di input del modello, in quanto consentono di stimare eventuali percentuali necessarie al calcolo degli incentivi. Successivamente, nelle diverse sezioni del foglio di calcolo vengono inseriti i parametri tecnici ed economici caratteristici dell'intervento, che variano in funzione della specifica categoria considerata. Tra le principali informazioni richieste rientrano, ad esempio:

- la tipologia di intervento realizzato;
- le caratteristiche tecniche dell'intervento in esame;
- l'eventuale costo dell'investimento.
- nel caso di impianti termici, alcuni parametri tecnici quali la potenza termica o la capacità dell'impianto, quando applicabile;
- eventuali parametri prestazionali richiesti dalla normativa;

Come esempio si riporta il foglio di calcolo relativo alla determinazione dell'incentivo del Conto Termico 3.0 per le pompe di calore elettriche (Figura 5.6).

POMPE DI CALORE ELETTRICHE		Coefficiente valorizzazione economica CI			Efficienza stagionale minima ecodesign %	SCOP minimo ecodesign	COP minimo ecodesign	Coefficiente di utilizzo							
Tipologia pompe di calore	Denominazione commerciale	Pe < 12kW	12 < Pe < 35 kW	> 35 kW				Zona Climatica	CL ₁						
aria/aria < 12kW	Split/Aircoolt	0,7	NP	NP	149	3,6	-	A	800						
	Split/MultiSplit (DHW+SD)	0,7	NP	NP	134	3,45	-	B	850						
	Fixed double duct	0,2	NP	NP	-	-	2,6	C	1000						
aria/aria > 12kW	Fixed double duct (DHW+SD)	0,2	NP	NP	-	-	2,65	D	1400						
	VRF/VRF	NP	0,15	0,05	137	3,5	-	E	1700						
	Rooftop	0,15	0,15	0,05	125	3,2	-	F	2000						
acqua/aria	acqua/aria	0,16	0,16	0,06	137	3,625	-								
aria/acqua	aria/acqua	0,15	0,15	0,06	110	2,825	-								
aria/acqua a bassa T	aria/acqua a bassa T	0,15	0,15	0,06	125	3,2	-								
acqua/acqua	acqua/acqua	0,16	0,16	0,06	110	2,95	-								
acqua/acqua a bassa T	acqua/acqua a bassa T	0,16	0,16	0,06	125	3,25	-								
salincola/aria < 12kW	salincola/aria < 12kW	0,16	ND	ND	146	3,8	-								
salincola/aria > 12kW	salincola/aria > 12kW (DHW +SD)	0,16	ND	ND	134	3,42	-								
salincola/acqua	salincola/acqua	ND	0,16	0,06	137	3,625	-								
salincola/acqua a bassa T	salincola/acqua a bassa T	0,16	0,16	0,06	110	2,825	-								
		0,16	0,16	0,06	125	3,2	-								
Durata dell'incentivo		2	potenza < 35 kW												
		5	potenza > 35 kW												
Tipologia di intervento	SCOP	COP	%	Potenza tecnica	N° macchine	Potenza tecnica tot.	SCOP	COP	%	hp	Quf	CI	EL	Ia tot	I tot
Tipologia pompe di calore	Denominazione commerciale	minimo	minimo	minimo	kW							(euro/kWh)	(kW)	(euro/anno)	(euro)
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	€	€
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	€	€
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	€	€
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	€	€

Figura 5.6 - Calcolo incentivo pompe di calore elettriche Conto Termico 3.0.

A partire da tali dati, il foglio di calcolo applica automaticamente le relazioni di calcolo previste dal meccanismo incentivante, determinando l'entità del contributo economico potenzialmente riconoscibile. Il risultato dell'elaborazione è rappresentato dall'importo dell'incentivo ottenibile, indicato come I_{tot} , e dalla sua articolazione temporale (Ia_{tot}), elementi che vengono successivamente integrati nel modello di analisi economico-finanziaria sviluppato nella tesi. All'interno della metodologia adottata, lo strumento Excel assume quindi un ruolo specifico nel processo di valutazione degli interventi.

6 Casi di studio – Analisi dello stato di fatto

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione dei tre edifici oggetto di studio e alla definizione delle loro caratteristiche nello stato di fatto, fase preliminare indispensabile per lo sviluppo delle successive analisi energetiche. Sebbene gli edifici presentino destinazione d'uso analoga e siano stati modellati seguendo la medesima procedura di calcolo, essi mostrano alcune differenze dal punto di vista geometrico, costruttivo e impiantistico che influenzano le rispettive prestazioni energetiche. Verranno pertanto presentate le principali caratteristiche degli edifici analizzati, al fine di ricostruire in modo coerente la configurazione di ciascun edificio precedente agli interventi di riqualificazione energetica e individuare una base di riferimento per la successiva valutazione delle soluzioni progettuali adottate.

6.1 Edificio A

L'azienda oggetto di analisi è situata nella provincia di Reggio Emilia e, dal punto di vista della classificazione energetica degli edifici, rientra all'interno della categoria d'uso E8, che comprende edifici adibiti ad attività industriali e artigianali. L'edificio si sviluppa prevalentemente su un unico piano fuori terra, con volumi interni destinati ad attività operative di lavorazione e stoccaggio. Ai fini della simulazione energetica, l'edificio è stato modellato su due livelli, in coerenza con la possibilità offerta dal software di articolare i locali su più piani e di rappresentare correttamente geometrie non uniformi. Il magazzino si sviluppa prevalentemente a tutta altezza (7,55 m); tuttavia, nella porzione posta sul fronte sinistro, la presenza di un blocco uffici su due livelli, parzialmente sovrapposto all'area di stoccaggio, determina una riduzione locale dell'altezza utile. Tale configurazione è stata rappresentata mediante la suddivisione in locali distinti e la successiva aggregazione degli stessi, al fine di descrivere correttamente il volume complessivo. La porzione adibita a uffici, pur essendo adiacente, è stata considerata come edificio vicino, in quanto non oggetto degli interventi di riqualificazione impiantistica.

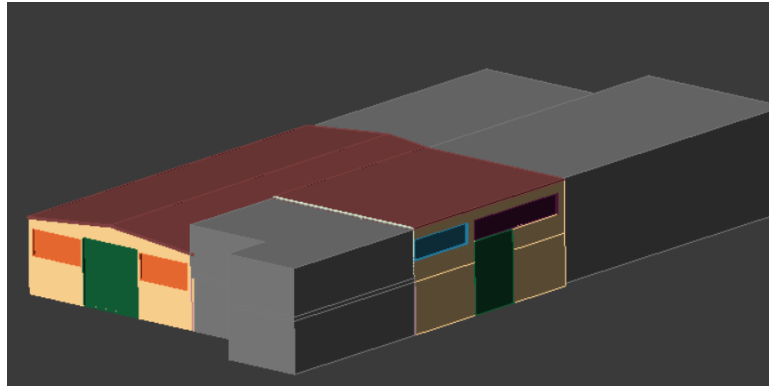


Figura 6.1 - Vista 3D dell'edificio A.

Tabella 6.1 - Zone dell'edificio A.

Identificativo Zona	Utilizzo	Superficie Netta [m²]	Volume Lordo [m³]
Zona 1	Lavorazione	363.26	2186.80
Zona 2	Magazzino	234.34	1799.40
Totale		597.6	3986.2

Nei seguenti sottoparagrafi verranno illustrati i principali elementi geometrici e costruttivi dell'edificio e le modalità con cui tali dati sono stati inseriti all'interno del software di calcolo utilizzato per le simulazioni energetiche.

6.1.1 Caratteristiche dell'involucro edilizio

L'involucro edilizio rappresenta l'elemento principale attraverso il quale avvengono gli scambi termici tra ambiente interno ed esterno. Per la modellazione energetica dell'edificio è quindi necessario analizzare nel dettaglio i componenti che costituiscono la superficie disperdente, individuando le diverse tipologie costruttive e le relative stratigrafie; le principali strutture opache sono costituite da:

- pareti verticali (verso ambienti climatizzati, non climatizzati o verso l'esterno);
- pavimenti;
- solai interpiano (verso ambienti climatizzati o non climatizzati);
- coperture.

Si parte con la definizioni dei muri presenti nell'edificio. Prima di creare una parete opaca in Edilclima, è fondamentale definire il tipo di muro, in modo da poter

procedere correttamente con la definizione della stratigrafia. Di seguito viene mostrato un esempio per ciascuna tipologia di muro presente, evitando di ripetere muri con stratigrafia uguale ma con dimensioni differenti. Al termine, tutte le informazioni saranno riassunte in una tabella con spessori e valori termici, così da avere un quadro completo e immediato di tutte le pareti opache presenti nell'edificio. Il primo esempio è il muro M1 che consiste in una parete verso l'ambiente esterno da 27 cm costituita dai materiali presenti nella Figura 6.2:

Codice	Descrizione	Spessore [mm]	Cond. [W/mK]	R [m²K/W]	M.V. [kg/m³]	C.T. [kJ/kgK]	R.V.
e1022	Intonaco di calce e gesso	10,00	0,7000	0,014	1400	1,00	10
e8234	Blocco semipieno	250,00	0,4390	0,569	1072	0,84	7
e1023	Malta di calce o di calce e cemento	10,00	0,9000	0,011	1800	1,00	22

Figura 6.2 - Stratigrafia muro M1 (Edificio A).

Una volta definita la stratigrafia, il software esegue automaticamente la verifica termoigrometrica (che risulterà come in Figura 6.3) e crea i grafici relativi alle temperature, alle pressioni e alla distribuzione di condensa/evaporazione.

Verifica termoigrometrica

Verifica criticità di condensa superficiale

Includi nella verifica solo i mesi in cui è attivo il riscaldamento

Mese critico: gennaio

Fattore di temperatura mese critico: $f_{Rsi}^{max} = 0,811$

Fattore di temperatura componente: $f_{Rsi} = 0,717$

Umidità relativa superficiale accettabile: 80 %

Verifica fattore di temperatura: $f_{Rsi}^{max} \leq f_{Rsi}$ ❌

Verifica del rischio di condensa interstiziale (secondo UNI EN ISO 13788)

Non si verifica formazione di condensa interstiziale nella struttura durante tutto l'arco dell'anno.

Esito della verifica termoigrometrica: **Negativa**

Figura 6.3 - Verifica termoigrometrica muro M1 (Edificio A).

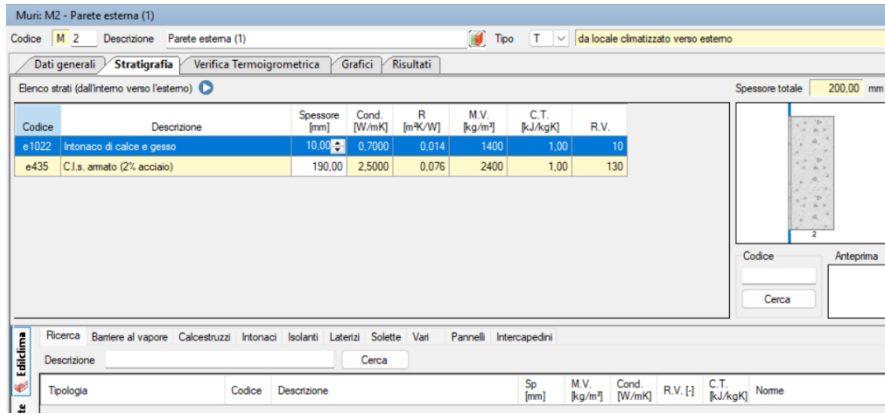


Figura 6.6 - Stratigrafia muro M2 (Edificio A).

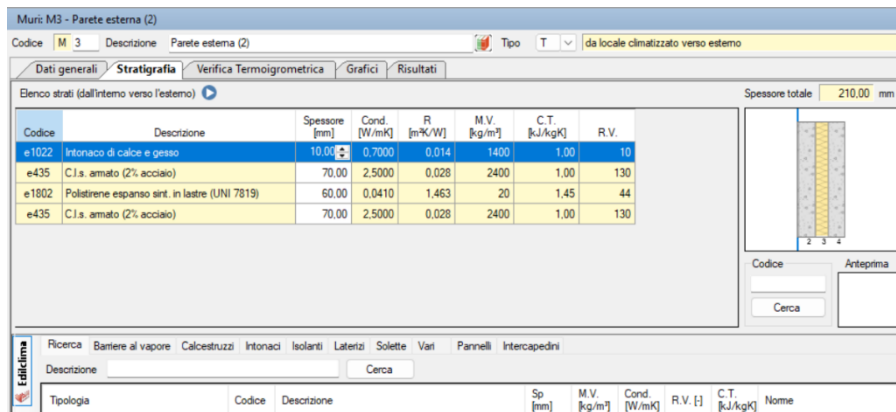


Figura 6.7 - Stratigrafia muro M3 (Edificio A).

Anche in questo caso il software restituisce i risultati relativi alla verifica termoigrometrica e crea i grafici relativi alle temperature, alle pressioni e alla distribuzione di condensa/evaporazione, però relativamente ai singoli muri che compongono la struttura disomogenea; i risultati finali sono invece disponibili sia singolarmente per i muri M2 e M3 che per il muro M4, come riportato di seguito:

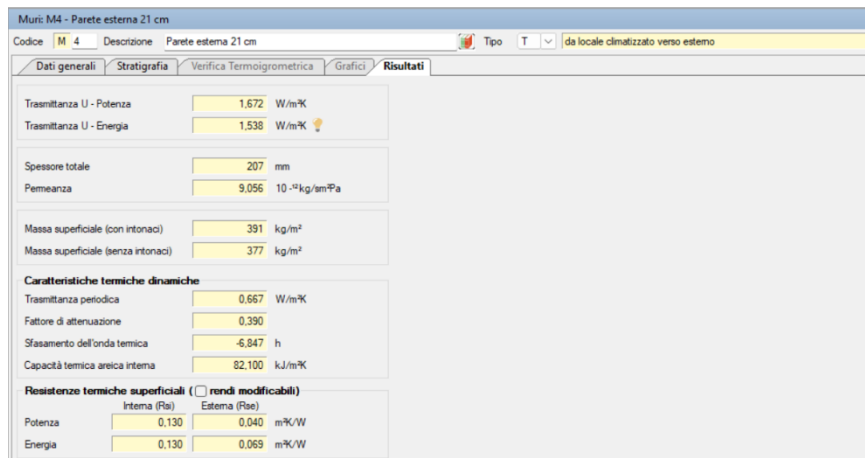


Figura 6.8 - Schermata risultati muro M4 (Edificio A).

Per le pareti dei locali climatizzati che confinano con ambienti non climatizzati (tipo U) nella scheda dei dati generali sarà disponibile una tendina aggiuntiva per specificare le caratteristiche di tali locali (Figura 6.9); è fondamentale definire il coefficiente $b_{tr,u}$ in quanto è necessario per stimare le dispersioni energetiche nei calcoli semplificati previsti per i locali non climatizzati.

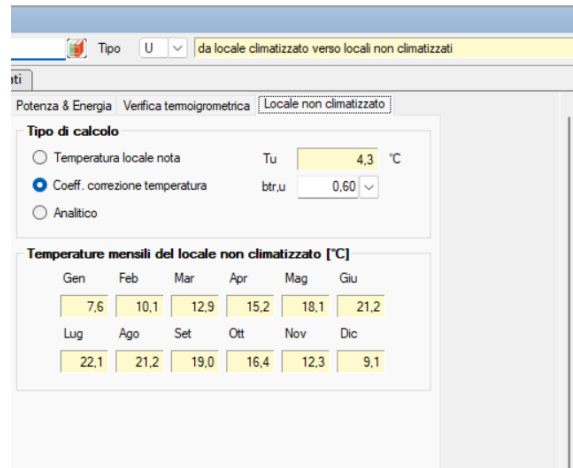


Figura 6.9 - Schermata dati generali, tipo di calcolo per locali non climatizzati, muro M101 (Edificio A).

In questo caso è stato preso come valore di $b_{tr,u}$ 0.60, tipicamente utilizzato per ambienti con serramenti esterni e con almeno due pareti esterne (e.g. le autorimesse). Essendo i passaggi analoghi a quelli precedenti, di seguito verrà solo riportata la Figura 6.10 relativa alla stratigrafia del Muro 101, in quanto la tipologia è la medesima, ma la stratigrafia è differente:

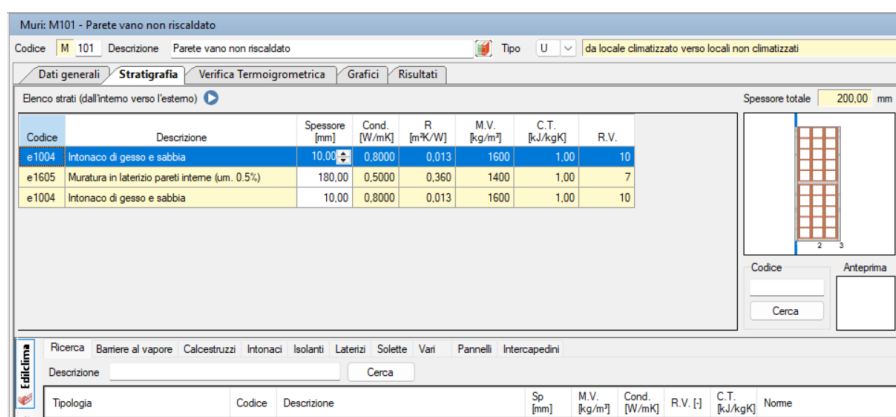


Figura 6.10 - Stratigrafia muro 101 (Edificio A).

Per quanto riguarda le pareti verso locali vicini (tipo N), si riporta come esempio il Muro 201. Anche per questa tipologia, nella scheda dei dati generali (Figura 6.11) sarà

disponibile una tendina aggiuntiva per specificare le caratteristiche di tali locali; in questo caso, essendo il muro confinante con un magazzino adiacente a temperatura nota di 18 °C, si è scelto quel metodo per la stima delle dispersioni energetiche.

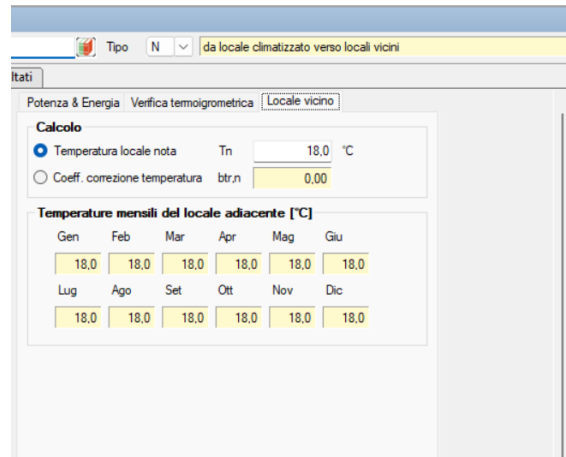


Figura 6.11 - Schermata dati generali, tipo di calcolo per locali climatizzati verso locali vicini, muro 201 (Edificio A).

Anche in questo caso, essendo i passaggi sempre gli stessi, si riporta solo la Figura 6.12 relativa alla stratigrafia del Muro 201:

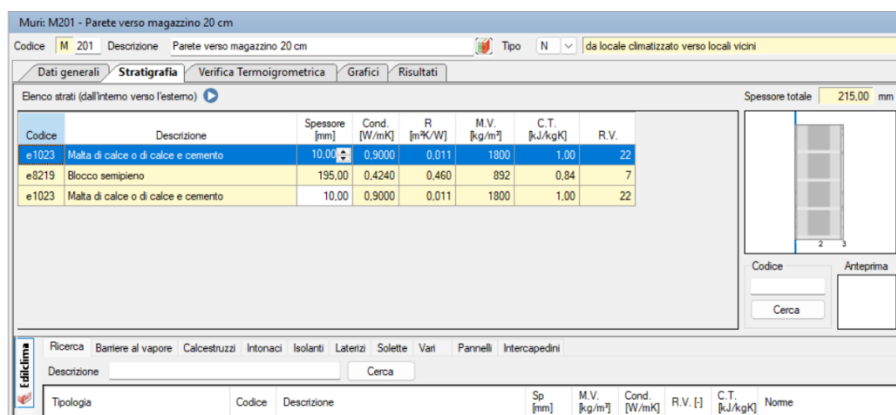


Figura 6.12 - Stratigrafia muro 201 (Edificio A).

Sono stati inoltre modellati i muri che separano la zona di lavorazione e il magazzino dalla zona uffici. Poiché quest'ultima non rientra nell'intervento di riqualificazione, tali ambienti sono stati considerati come locali adiacenti climatizzati e di conseguenza per la loro modellazione sono state applicate le stesse procedure descritte in precedenza, con l'unica differenza relativa alla temperatura interna assunta per questi locali, pari a 20 °C (come da Figura 6.13).

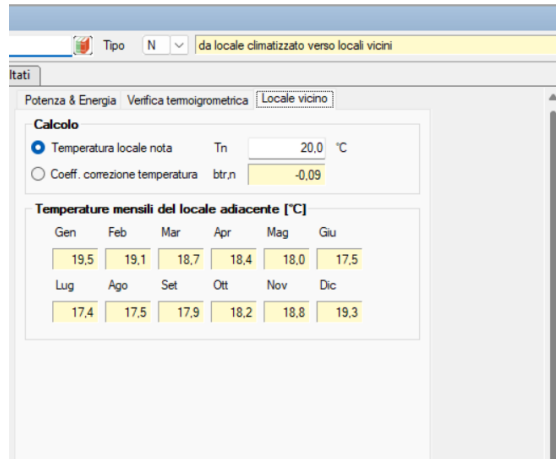


Figura 6.13 - Schermata dati generali, tipo di calcolo per locali climatizzati verso locali vicini, muro 204 (Edificio A).

Anche in questo caso, essendo i passaggi i medesimi, si riporta solo la Figura 6.14 relativa alla stratigrafia del Muro 204:

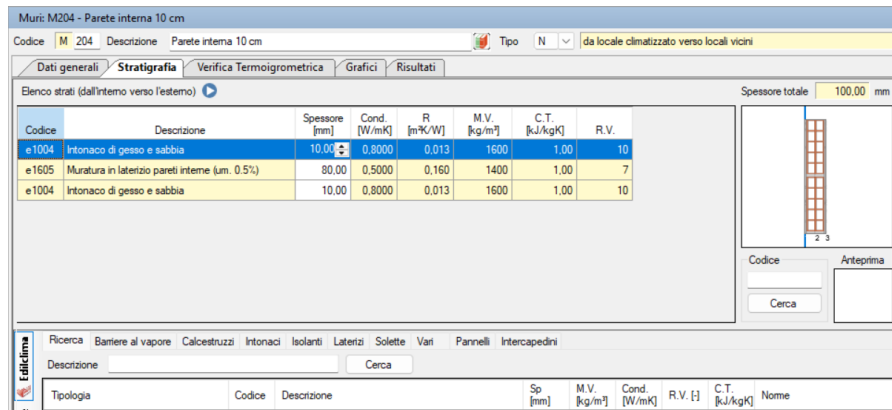


Figura 6.14 - Stratigrafia muro 204 (Edificio A).

All'interno della sezione dedicata ai muri su Edilclima, è possibile modellare le porte opache selezionando l'apposito check; in questo modo, la porta viene considerata come un serramento ai fini del calcolo delle trasmittanze medie nella successiva maschera "Risultati fabbricato". All'interno dell'edificio vengono modellate:

- la porta (codice M401) verso il magazzino adiacente a temperatura di 18 °C, con seguente stratigrafia:

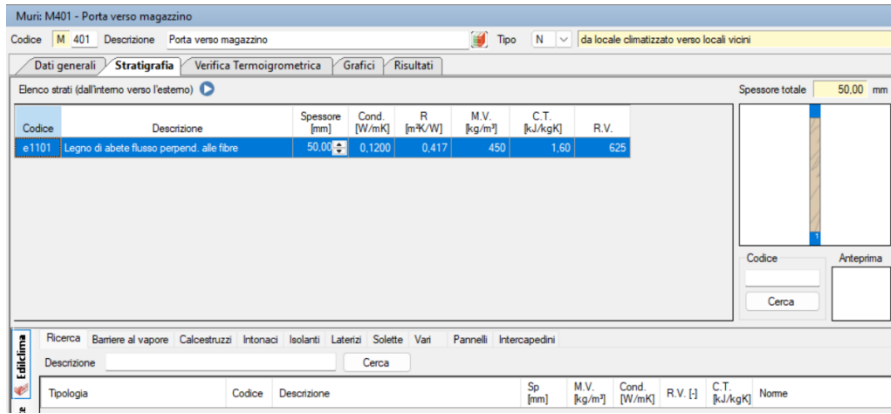


Figura 6.15 - Stratigrafia muro 401, porta (Edificio A)

- il portone del magazzino (codice M402) che dà verso l'esterno, con la seguente stratigrafia:

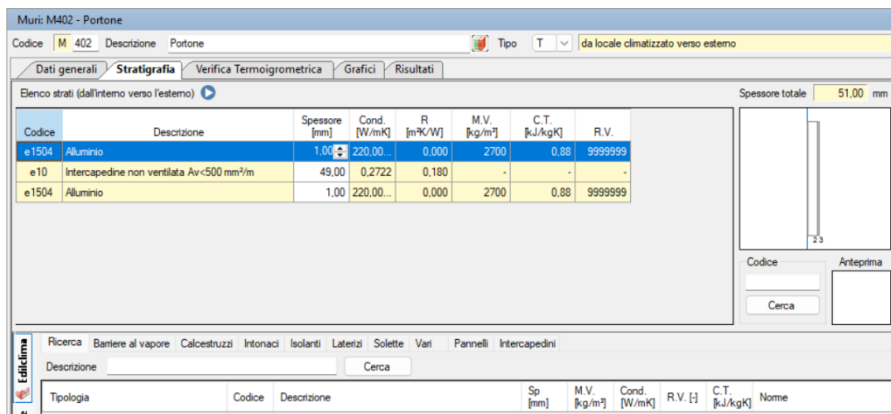


Figura 6.16 - Stratigrafia muro 402, portone (Edificio A).

Nella Tabella 6.2 vengono riepilogate tutte le murature presenti nell'edificio, includendo sia quelle già analizzate sia le altre non descritte nel dettaglio. Per ciascun elemento sono riportati il codice identificativo del muro, il tipo di muro, lo spessore e i principali parametri termo-fisici utilizzati nel calcolo energetico.

Tabella 6.2 - Riepilogo murature (Edificio A).

Cod.	Tipo	Spessore (mm)	U_p (W/m ² K)	U_e (W/m ² K)	Trasmittanza Periodica (W/m ² K)
M1	T	270	1.307	1.260	0.539
M2	T	200	3.842	3.459	1.591
M3	T	210	0.587	0.577	0.205
M4	T	207	1.672	1.538	0.667
M101	U	200	1.550	1.550	0.626
M102	U	100	2.247	2.247	1.715
M103	U	300	1.183	1.183	0.228
M201	N	215	1.347	1.347	0.772
M202	N	270	1.174	1.174	0.434
M203	N	315	1.734	0.734	0.209
M204	N	100	2.247	2.247	1.715
M205	N	135	1.942	1.942	1.213
M206	N	330	1.105	1.105	0.168
M207	N	300	1.183	1.183	0.228
M208	N	200	1.550	1.550	0.626
M401	N	50	1.478	1.478	1.425
M402	T	51	2.857	2.640	2.639

Nell'edificio A è presente una sola tipologia di pavimento uguale per tutte le zone; per i componenti di tipo G, nella modellazione in Edilclima, è prevista una sezione dedicata (Figura 6.17) in cui vengono definite le caratteristiche del componente in relazione alle condizioni del terreno con cui è a contatto. Essendo la pavimentazione uguale su tutte le zone dell'edificio ed essendo la parete M1 quelle maggiormente presente, per semplicità di modellazione si è presa come riferimento la sola parete M1 per i dati del pavimento controterra.

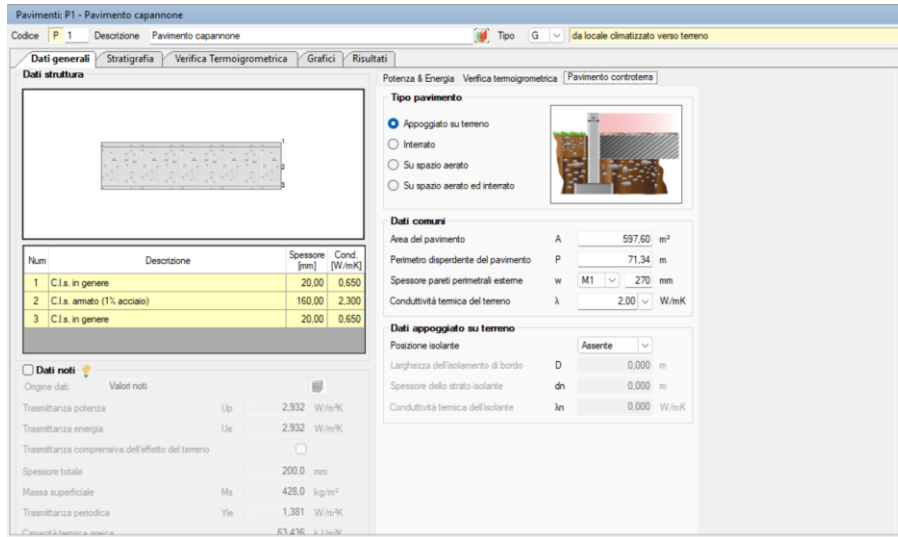


Figura 6.17 - Schermata dati generali, tipo di pavimento (Edificio A).

La stratigrafia del pavimento, la verifica termoigrometrica, i grafici e infine i risultati finali sono riportati nelle Figure a seguito:

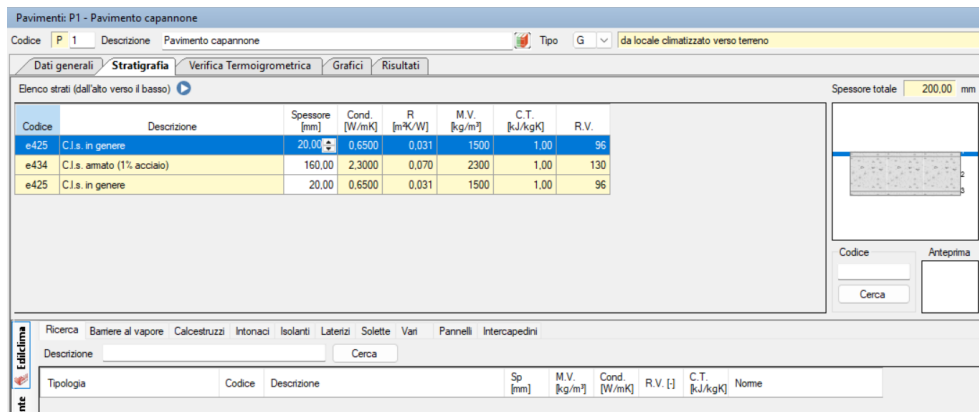


Figura 6.18 - Stratigrafia pavimento (Edificio A).

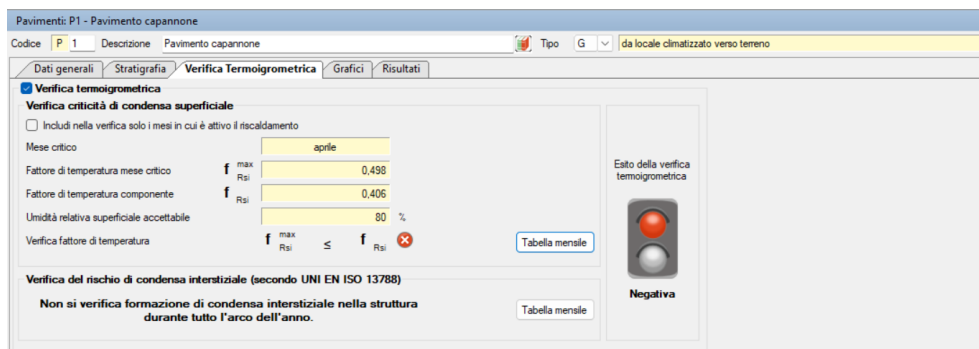


Figura 6.19 - Verifica termoigrometrica pavimento (Edificio A).

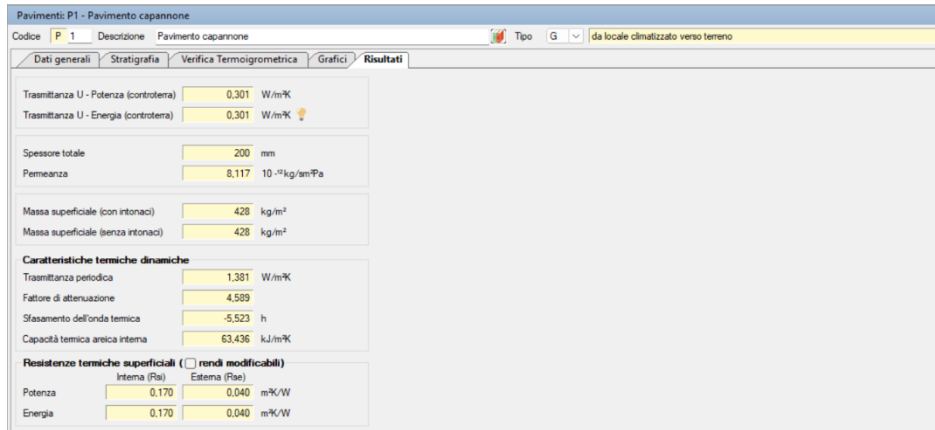


Figura 6.20 - Schermata risultati pavimento (Edificio A).

Per quanto riguarda i soffitti, sono presenti una copertura e un solaio interpiano (tra una porzione del magazzino e il piano superiore non climatizzato).

- la stratigrafia della copertura, la verifica termoigrometrica, i grafici e infine i risultati finali sono i seguenti:

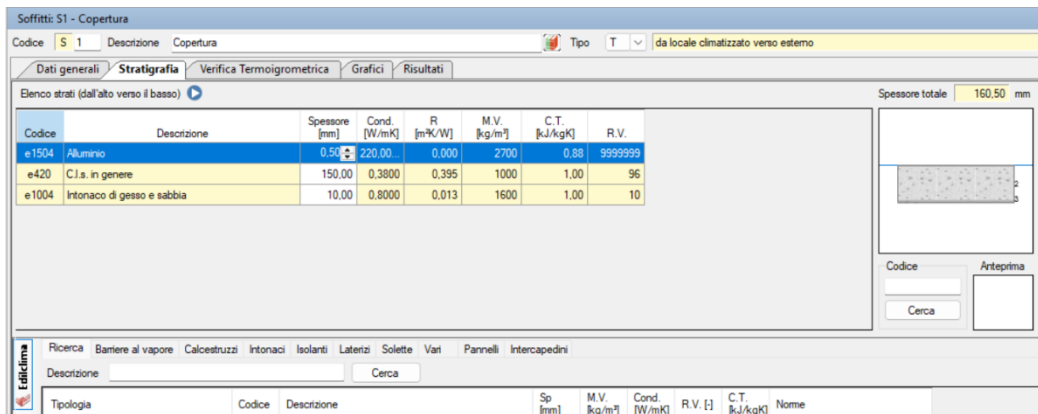


Figura 6.21 - Stratigrafia copertura (Edificio A).

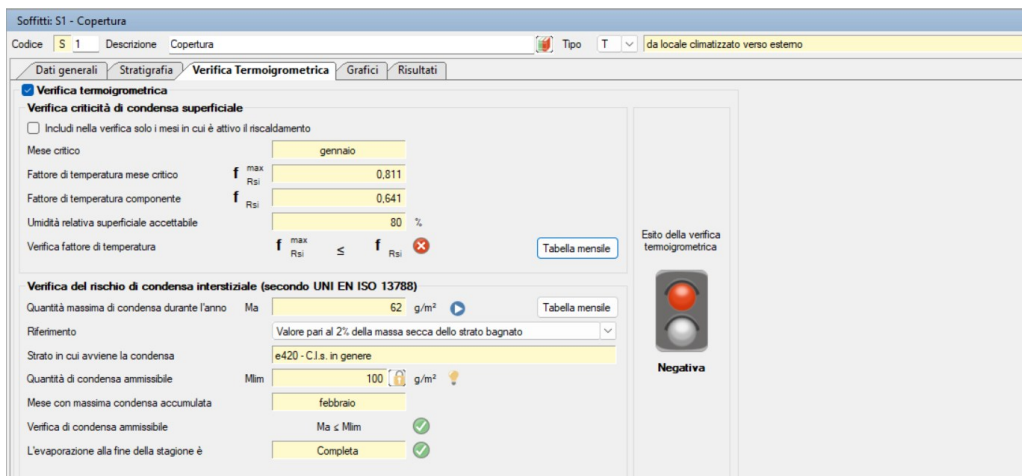


Figura 6.22 - Verifica termoigrometrica copertura (Edificio A).

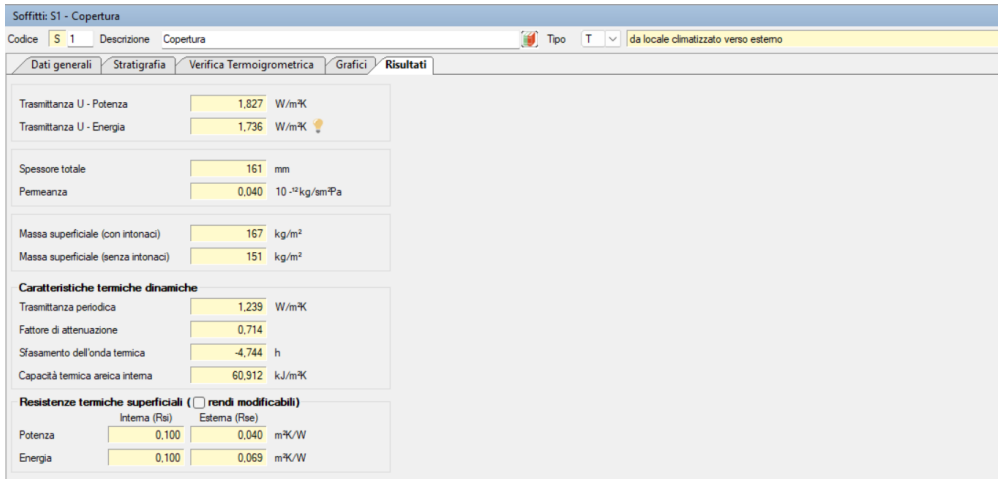


Figura 6.23 - Schermata risultati copertura (Edificio A).

- la stratigrafia del solaio interpiano, la verifica termoigrometrica, i grafici e infine i risultati finali sono i seguenti. Essendo una struttura di tipo U viene definito il valore di $b_{tr,u}$ pari a 0.60 per il locale non climatizzato adiacente.

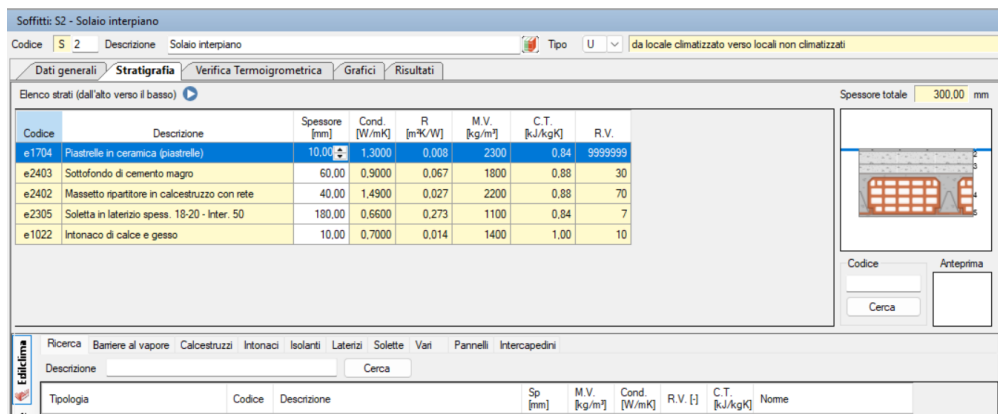


Figura 6.24 - Stratigrafia solaio interpiano (Edificio A).

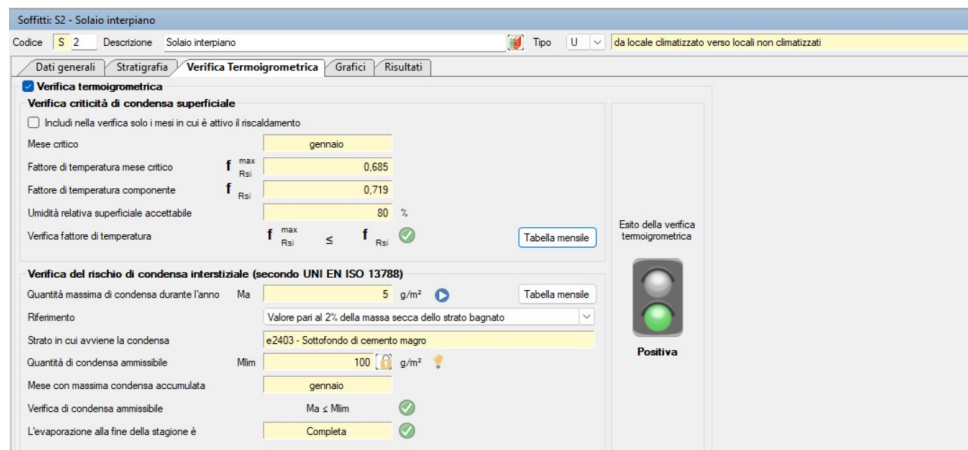


Figura 6.25 - Verifica termoigrometrica solaio interpiano (Edificio A).

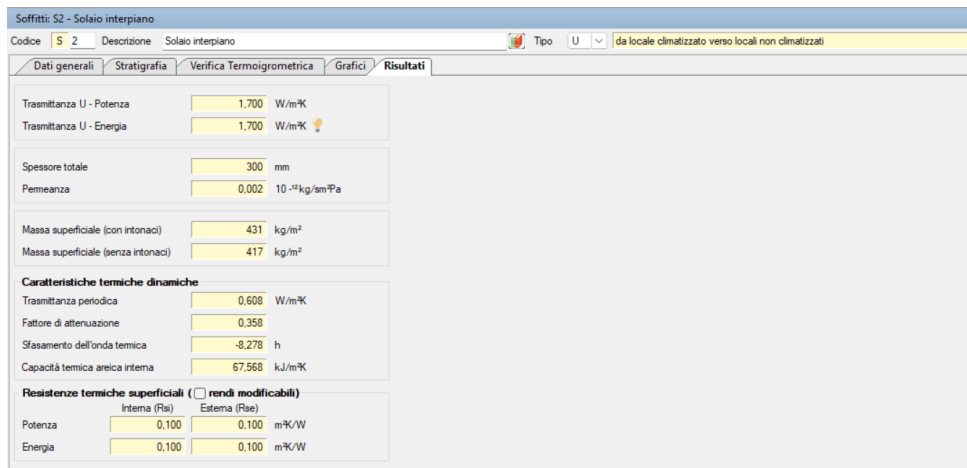


Figura 6.26 - Schermata risultati solaio interpiano (Edificio A).

Nel processo di modellazione energetica è stata inoltre posta particolare attenzione all'individuazione dei ponti termici, ossia quelle zone dell'involucro edilizio in cui si verificano discontinuità geometriche o di materiche che determinano un incremento localizzato dei flussi di calore; queste discontinuità si manifestano frequentemente in corrispondenza di:

- attacchi tra pareti e solai;
- collegamenti tra pareti e copertura;
- contorni dei serramenti;
- spigoli dell'involucro.

La presenza di ponti termici non comporta soltanto un aumento delle dispersioni energetiche, ma può determinare anche criticità come la formazione di condensa superficiale e lo sviluppo di muffe. I ponti termici presenti nell'edificio sono stati modellati mediante il software IRIS, al fine di ottenere una valutazione più accurata del comportamento termo-fisico dei nodi costruttivi; i risultati ottenuti sono stati successivamente importati all'interno di Edilclima per essere integrati nel modello energetico complessivo dell'edificio. L'unico ponte termico modellato direttamente in Edilclima è quello relativo al telaio dei serramenti, scelta adottata per semplicità di modellazione e in linea con la prassi operativa utilizzata durante l'attività di tirocinio. Per il ponte termico relativo al telaio (W - Parete - Telaio) viene utilizzata la funzione di configurazione dedicata, nella quale si definiscono la tipologia di ponte termico, la

presenza o meno di isolamento nella parete e le caratteristiche e la posizione del telaio. Successivamente si associa la parete interessata e il programma calcola automaticamente i risultati, includendo anche la verifica del rischio di formazione di muffa:

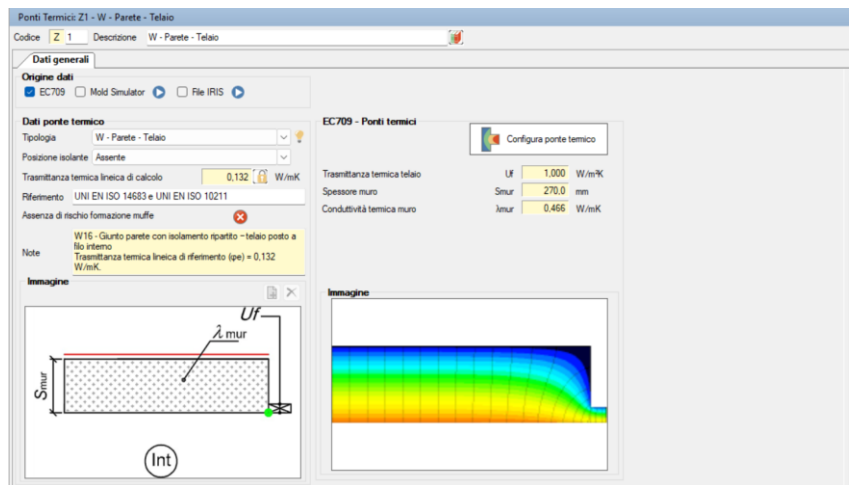


Figura 6.27 - Ponte termico parete-telaio (Edificio A).

Per quanto riguarda il ponte termico C-Angolo tra pareti (Figura 6.28), si fa riferimento al ponte termico che interessa gli spigoli sporgenti dell'involucro edilizio. Il calcolo termico considera prevalentemente una sola muratura (M1), valutando la dispersione di calore concentrata in tali angoli.

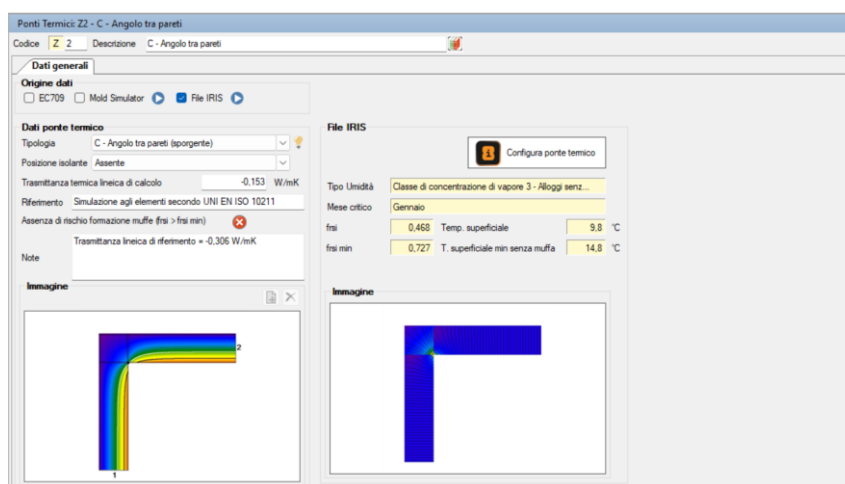


Figura 6.28 - Ponte termico angolo tra pareti (Edificio A).

Il ponte termico P - Parete - Pilastro (Figura 6.29) si riferisce ai pilastri che attraversano l'involucro dell'edificio, creando discontinuità nella stratigrafia, influenzando la distribuzione dei flussi termici e la continuità dell'isolamento. Anche

in questo caso si è fatto riferimento alla muratura M1 essendo quella maggiormente presente.

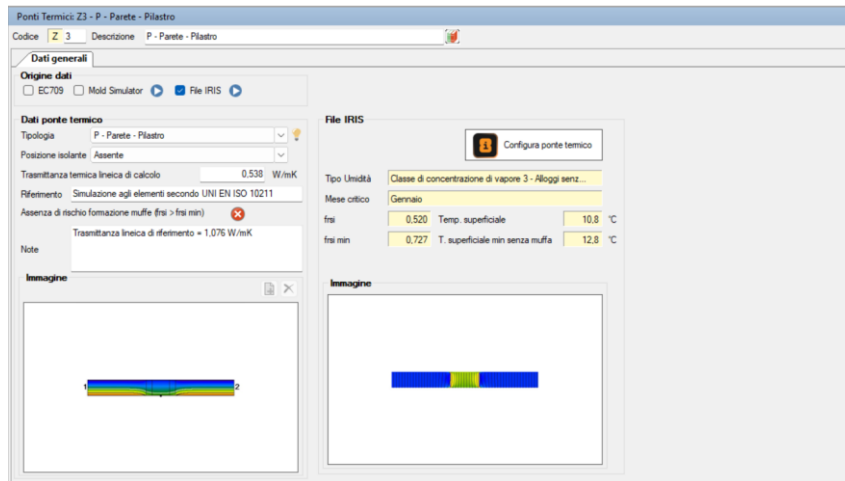


Figura 6.29 - Ponte termico parete-pilastro (Edificio A).

Si ha poi il ponte termico R – Parete – Copertura che coinvolge la zona in cui le pareti esterne incontrano la copertura dell'edificio; a causa della differenza geometrica e di stratigrafia, questa configurazione può favorire la condensazione superficiale nei periodi freddi. In questo caso viene calcolato il ponte termico tra la parete M1 e la copertura (Figura 6.30) e quello tra la parete M4 e la copertura (Figura 6.31).

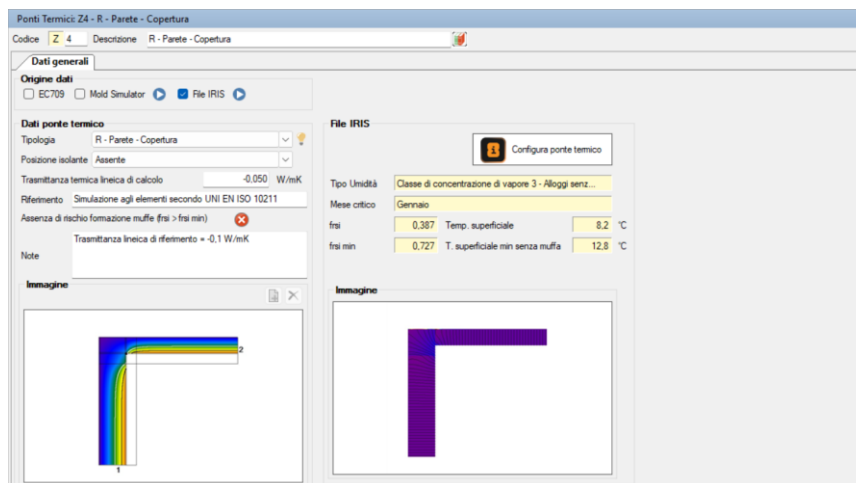


Figura 6.30 - Ponte termico parete M1-copertura (Edificio A).

prestazionali tipiche degli edifici realizzati nel periodo considerato. Dal punto di vista energetico, tali componenti risultano generalmente caratterizzati da valori di trasmittanza termica più elevati rispetto alle strutture opache, contribuendo in maniera significativa alle dispersioni termiche complessive dell'edificio.

Per quanto riguarda la prima struttura trasparente (W1), nella maschera dei dati generali (Figura 6.33) essendo esso a vetro singolo si avranno i seguenti dati:

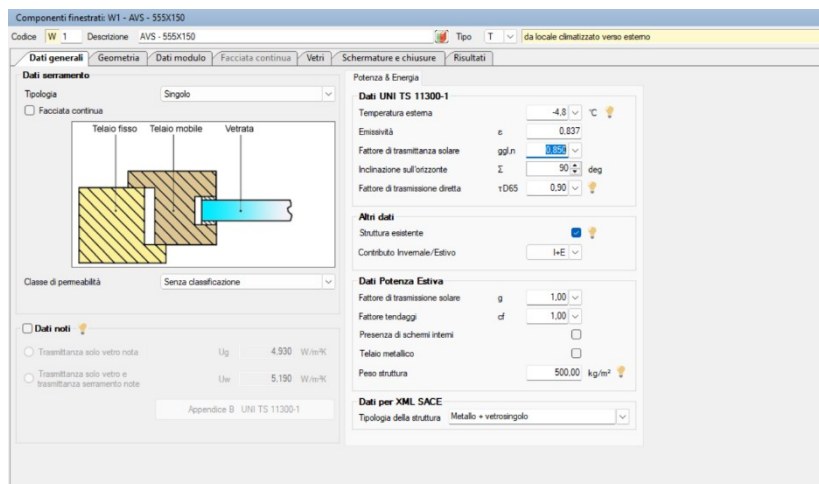


Figura 6.33 - Maschera dati generali serramento W1 (Edificio A).

Passando alla geometria dell'infisso, si vanno a definire la forma e le dimensioni (in questo caso è una finestra di dimensioni 555X150 mm), tenendo anche in considerazione lo spessore dei traversi e dei montanti e il numero e lo spessore di eventuali divisori verticali e orizzontali come da Figura 6.34; in questo modo il software genera una raffigurazione di quello che è il componente.

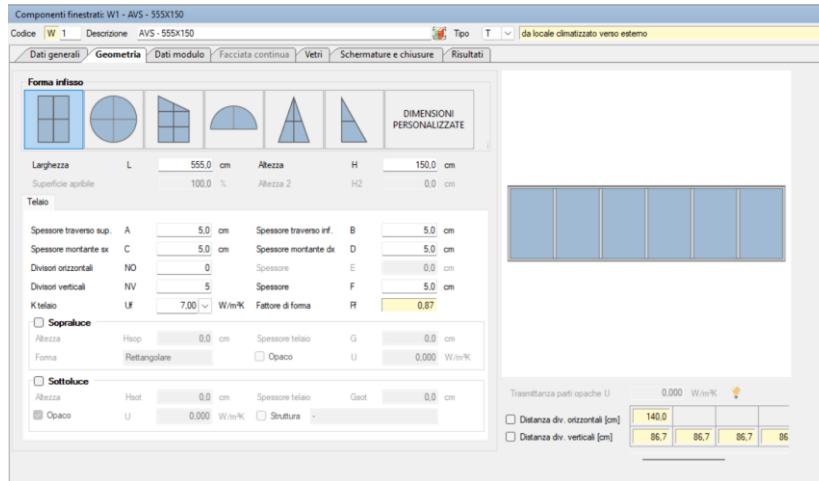


Figura 6.34 - Maschera geometria serramento W1 (Edificio A).

Attraverso la maschera “Dati Modulo” è poi possibile associare al serramento il relativo ponte termico Parete – Telaio creato precedentemente:

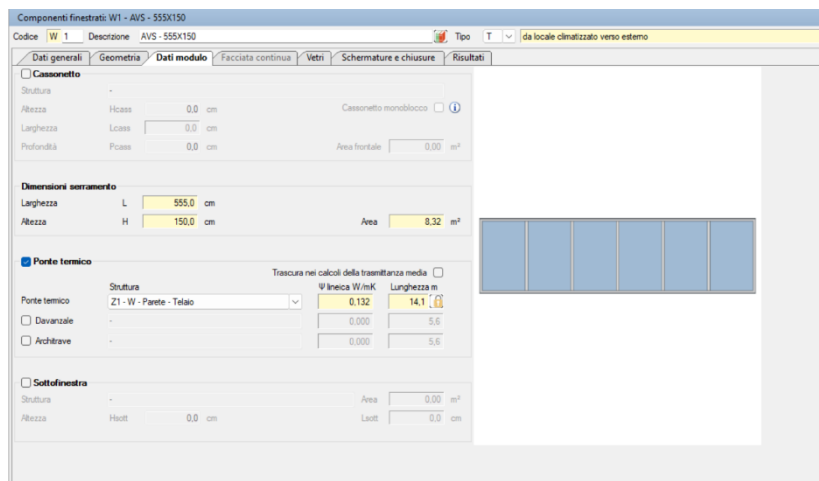


Figura 6.35 - Maschera dati modulo serramento W1 (Edificio A).

Successivamente si vanno a compilare i campi relativi alla vetratura, che nel caso dell’edificio in esame, fanno riferimento ad un vetro singolo di spessore 4 mm in vetro (che corrisponde ad un valore di λ pari a 1).

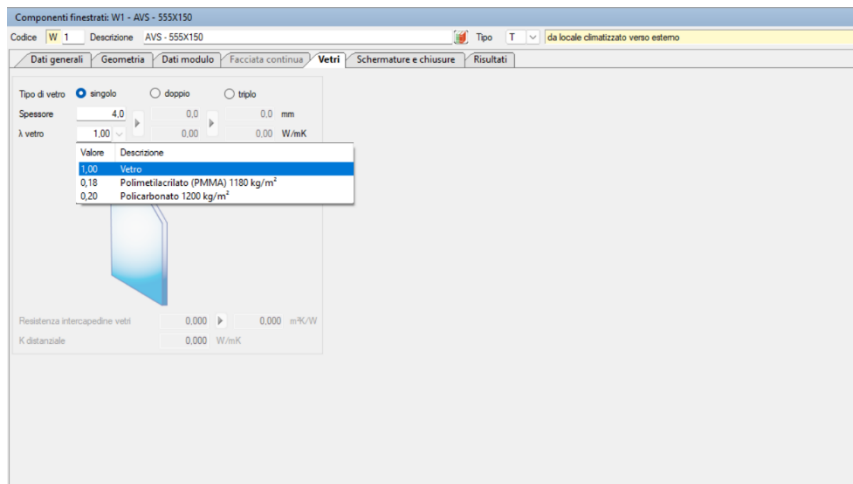


Figura 6.36 - Maschera vetri serramento W1 (Edificio A).

Non essendoci nessun tipo di schermatura o chiusura oscurante, i fattori sono impostati su 1 come da Figura 6.37:

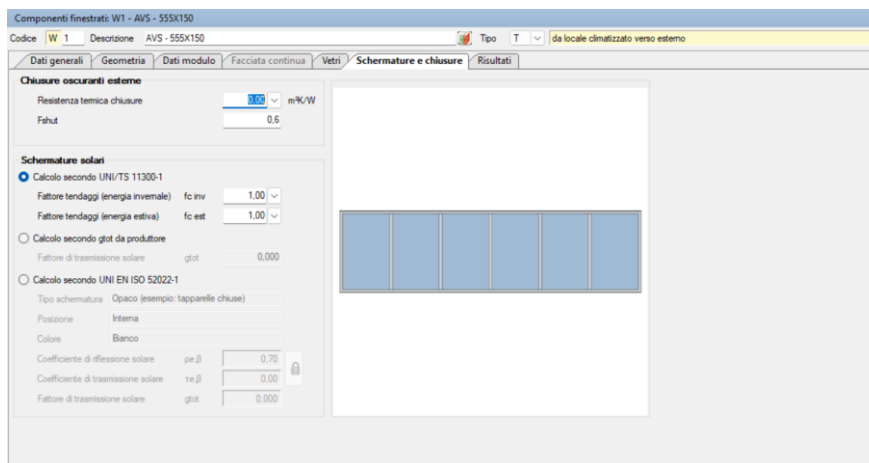


Figura 6.37 - Maschera schermature e chiusure serramento W1 (Edificio A).

Alla fine il Edilclima fornirà i seguenti risultati (Figura 6.38):

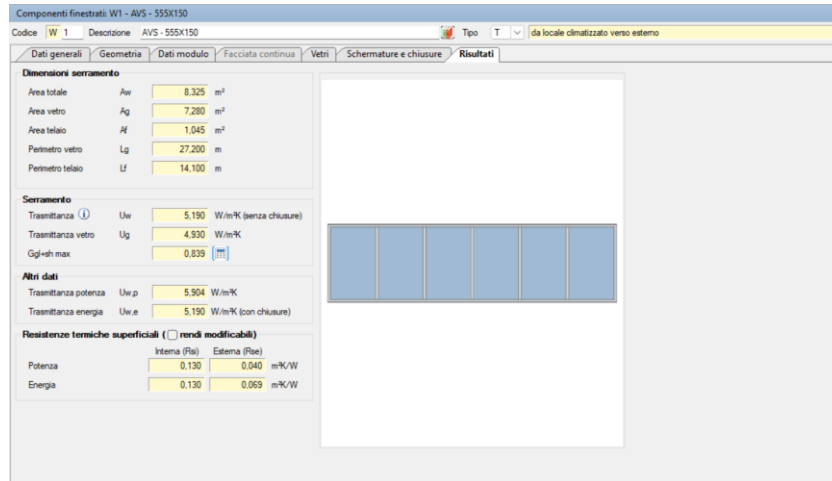


Figura 6.38 - Maschera risultati serramento W1 (Edificio A).

All'interno dell'edificio sono presenti due portoni che danno verso l'esterno dell'edificio costituiti da una parte inferiore opaca e una superiore trasparente, di conseguenza, al fine di modellarli nella maniera più corretta, si è deciso di considerarli come componenti finestrati. Ad esempio per il componente W4 (stessa considerazione vale per il componente W7), l'inserimento di una parte opaca all'interno dell'infisso avviene selezionando la porzione interessata della struttura; una volta definita tale area, viene attivato il campo relativo alla trasmittanza delle parti opache (U), nel quale è possibile inserire il valore desiderato o utilizzare quello associato alla parete su cui l'infisso si trova richiamando una muratura precedentemente definita. A parte questo passaggio, il resto della procedura rimane la stessa di prima.

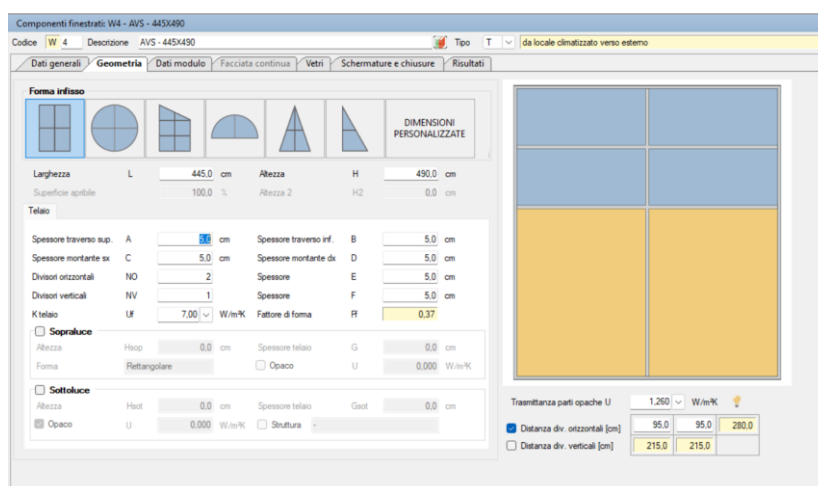


Figura 6.39 Maschera geometria portone W4 (Edificio A).

Poiché la procedura di modellazione dei serramenti risulta identica per tutti gli elementi finestrati presenti nell'edificio, si è scelto di non ripetere nel dettaglio i medesimi passaggi per ciascun caso; le differenze tra i serramenti riguardano principalmente le dimensioni e la tipologia di materiale utilizzato per il vetro, pertanto, le principali caratteristiche termo-fisiche dei serramenti sono sintetizzate nella Tabella seguente.

Tabella 6.3 - Tabella riepilogativa dei serramenti (edificio A).

Codice	Tipo	Tipologia Vetro	U_w(W/m²K)	U_g (W/m²K)	Area Tot. [m²]
W1 - AVS	T	Vetro	5.190	4.930	8.325
W2 -AVS	T	Vetro	5.179	4.930	13.049
W3 - AVS	T	Polycarbonato	4.811	4.569	3.846
W4 - AVS	T	Polycarbonato	2.224	4.569	21.805
W5 -AVS	T	Polycarbonato	4.803	4.569	8.269
W6 - AVS	T	Polycarbonato	4.802	4.569	8.356
W7 - AVS	T	Polycarbonato	3.669	4.569	24.500

6.1.2 Input grafico e definizione dei locali climatizzati

La modellazione geometrica dell'edificio è stata effettuata attraverso la fase di input grafico, che consente di ricostruire digitalmente la configurazione dell'edificio oggetto di studio. Per predisporre la base grafica necessaria alla modellazione, le planimetrie dell'edificio sono state importate all'interno dell'ambiente di lavoro del software in formato CAD; a partire da tale base grafica è stato quindi possibile procedere alla generazione del modello, inserendo progressivamente le pareti, i solai, le coperture, le superfici finestrate e i ponti termici. All'interno del modello sono state poi definite automaticamente le zone termiche climatizzate (Zona 1 relativa alla lavorazione e Zona 2 relativa al magazzino), evidenziate in Figura 40); gli elementi grigi in figura rappresentano gli edifici vicini presenti.

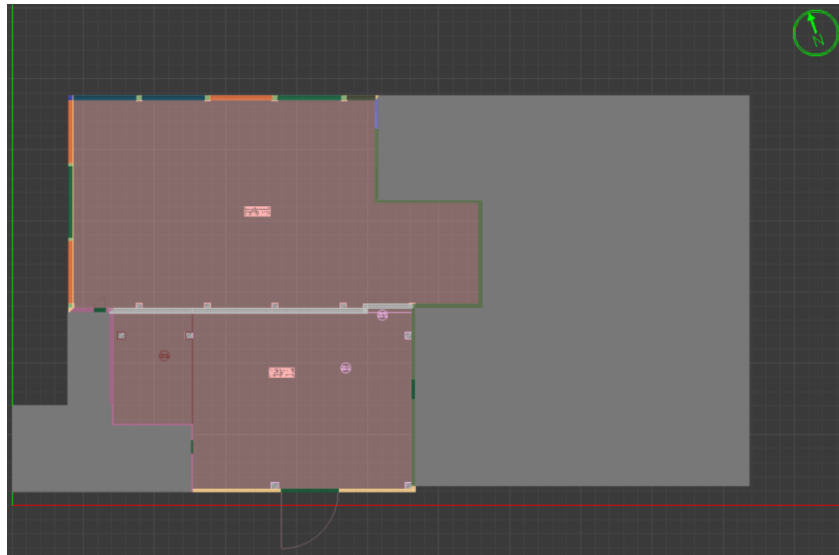


Figura 6.40 - Input grafico Edilclima (Edificio A).

Una volta completata la modellazione geometrica, è stata attivata la funzione di posizionamento del simbolo per l'orientamento del "Nord" all'interno dell'area di disegno e attraverso la funzione "Mappe" di Edilclima, che consente di acquisire un'immagine aerea del territorio in cui è ubicato l'edificio, si è proceduto con l'inserimento di eventuali edifici limitrofi o altri ostacoli che possono influenzare l'apporto di radiazione solare sulle superfici disperdenti ai fini del calcolo degli ombreggiamenti.

Infine, prima di procedere con le successive elaborazioni, è stata eseguita una verifica complessiva del modello, controllando la correttezza dei dati inseriti e l'assenza di eventuali errori di impostazione, così da garantire l'affidabilità dei risultati delle simulazioni energetiche.

6.1.3 Impianto termico esistente

La produzione di energia termica a servizio dell'edificio è affidata a un sistema di generazione decentralizzato, installato nel 2010. L'impianto è costituito da tre unità indipendenti basate sulla tecnologia AquaSplit: due a servizio della zona lavorazione e una dedicata alla zona magazzino. Le tre unità sono alimentate a gas metano con potenza termica utile nominale pari a circa 31 kW e rendimento di generazione che si attesta intorno all'87%. Il sistema è composto da tre caldaie installate all'esterno che provvedono al riscaldamento di un fluido termovettore (miscela acqua-glicole), il

quale viene messo in circolazione verso le unità interne tramite un circuito idraulico. All'interno degli ambienti sono installati gli aerotermi, dotati di batterie di scambio e ventilatori, che consentono il riscaldamento dell'aria per convezione forzata e la successiva immissione nei locali. Il funzionamento è automatico e regolato da termostato ambiente: alla richiesta di calore si attivano il circolatore e il bruciatore, mentre i ventilatori entrano in funzione al raggiungimento della temperatura utile del fluido. Il circuito di combustione è completamente separato dall'ambiente interno, garantendo condizioni di sicurezza e qualità dell'aria negli spazi serviti.

6.1.4 Prestazioni energetiche

Una volta completata la modellazione dell'edificio all'interno del software di simulazione energetica e inseriti tutti i parametri relativi alla geometria, alle caratteristiche termo-fisiche dell'involucro e ai sistemi impiantistici presenti, è stato possibile procedere alla valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio nello stato di fatto. Il modello di calcolo consente infatti di determinare diversi indicatori energetici utili a descrivere il comportamento del sistema edificio-impianto, tra cui i fabbisogni energetici per i servizi di climatizzazione, gli indici di prestazione energetica e la classe energetica dell'edificio.

Un primo elemento di analisi è rappresentato dalla Figura 6.41 che mostra l'incidenza percentuale dei principali elementi costruttivi sulle dispersioni complessive dell'edificio A; attraverso questa rappresentazione è possibile individuare quali componenti contribuiscano maggiormente alle perdite di calore, distinguendo tra superfici opache verticali, coperture, serramenti e ponti termici.

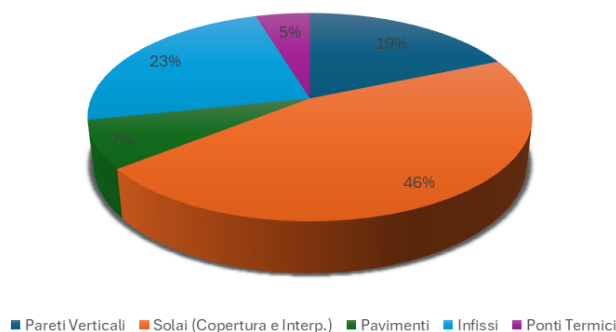


Figura 6.41 - Incidenza dei componenti edilizi sulle dispersioni dell'edificio A.

Sommarario											
Dettagli											
Scambi termici per componente											
Riassunto zone											
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Dispersioni			Apporti				Consumo specifico
				Gc.tr [kWh]	Gc.ve [kWh]	Gc.ht [kWh]	Gsol.w [kWh]	Girt [kWh]	Ggn [kWh]	Gc.nd [kWh]	
1	Lavorazione	363	2184,1	22586	3728	26314	20328	9520	29848	15501	7 kWh/m ³
2	Magazzino	427	1797,4	13465	3101	16567	7982	11182	19164	9085	5 kWh/m ³

Figura 6.43 - Dispersioni e apporti energia estiva (Edificio A).

In Figura 6.44 si può vedere il quadro complessivo dei fabbisogni di energia primaria, dei vettori energetici utilizzati e delle emissioni di CO_2 associate al funzionamento dell'edificio. Questo tipo di rappresentazione permette di collegare il fabbisogno energetico dell'edificio alle fonti energetiche effettivamente utilizzate, evidenziando il contributo dei vettori energetici al consumo complessivo e alle emissioni di CO_2 . Tali informazioni risultano particolarmente rilevanti nell'ambito della valutazione della sostenibilità energetica dell'edificio, poiché consentono di quantificare l'impatto ambientale associato al funzionamento del sistema edificio-impianto nello stato di fatto.

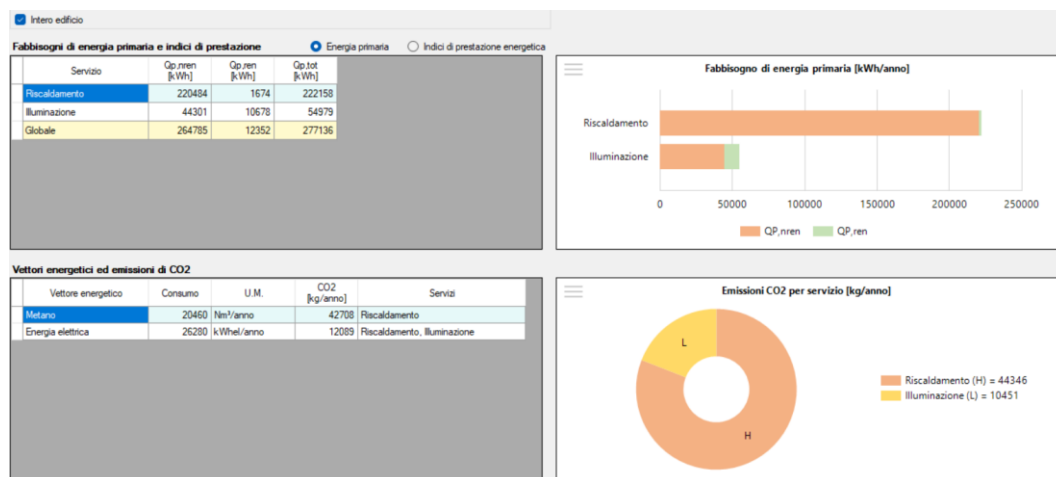


Figura 6.44 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO_2 (Edificio A).

Un ulteriore livello di sintesi è rappresentato dagli indici di prestazione energetica (Figura 6.45) che permettono di valutare il comportamento energetico complessivo dell'edificio e che rappresentano il parametro di riferimento utilizzato per la classificazione energetica; gli indici di prestazione energetica tengono conto sia delle caratteristiche dell'involucro edilizio sia dell'efficienza dei sistemi impiantistici e permettono quindi di descrivere in maniera sintetica la quantità di energia necessaria per garantire le condizioni di comfort richieste all'interno dell'edificio.

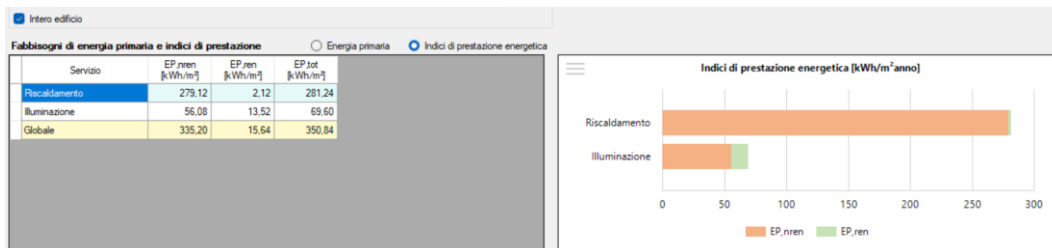


Figura 6.45 - Indici di prestazione energetica (Edificio A).

Nella sezione dedicata ad ulteriori calcoli che il software permette di fare, vi è la sezione dedicata al calcolo della trasmittanza media H'_t , utile per descrivere il comportamento termico dell'involucro edilizio. Per l'edificio A H'_t risulta pari a $1.349 \text{ W/m}^2\text{K}$.

L'analisi puntuale dei dati evidenzia quindi una situazione di marcata inefficienza energetica, con entrambe le zone dell'edificio in Classe Energetica G, il livello più basso della scala di classificazione nazionale. Nello specifico, la Zona 1 (Lavorazione) presenta un valore di $EP_{gl,nren}$ pari a $405.52 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$. Tale valore, rapportato all'estesa superficie netta di 363 m^2 , riflette un fabbisogno energetico primario non rinnovabile molto elevato, dovuto alla scarsa resistenza termica dei componenti opachi e trasparenti dell'involucro. Parallelamente, la Zona 2 (Magazzino), pur registrando un valore di $EP_{gl,nren}$ pari a $171.5 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$, conferma l'omogeneità negativa delle prestazioni globali del fabbricato.

6.2 Edificio B

L'edificio B riguarda anch'esso una realtà aziendale nella provincia di Reggio Emilia; a differenza del caso precedente, si è fatto riferimento a un modello energetico già disponibile nell'ambito dell'attività di tirocinio, che è stato analizzato al fine di applicare la metodologia sviluppata e trarre considerazioni comparative tra i diversi casi studio.

6.2.1 Descrizione dell'edificio

Dal punto di vista morfologico, l'edificio si sviluppa su un piano fuori terra ed è caratterizzato da ambienti destinati allo svolgimento delle attività operative,

rientrando pertanto nella categoria d'uso principale E8, relativa agli edifici adibiti ad attività industriali e artigianali.

Tabella 6.4 - Zone edificio B.

Identificativo Zona	Utilizzo	Superficie Netta [m ²]	Volume Lordo [m ³]
Zona 1	lavorazione	1714.17	12278.82

Le caratteristiche termo-fisiche delle strutture sono state definite all'interno del modello energetico fornito dall'azienda e successivamente utilizzate per l'elaborazione dei risultati energetici riportati nei paragrafi successivi. L'involucro edilizio dell'edificio è pertanto costituito dai seguenti componenti:

- pareti opache:

Tabella 6.5 - Riepilogo murature edificio B.

COD.	TIPO	SPESSORE (mm)	U_p (W/m ² K)	U_e (W/m ² K)	TRASMITTANZA PERIODICA (W/m ² K)
M1	T	210	2.028	1.901	0.852
M2	T	250	1.803	1.702	0.589
M101	U	210	1.751	1.751	0.658
M102	U	500	0.756	0.756	0.036
M103	U	250	1.078	1.078	0.370
M201	N	300	0.938	0.938	0.223
M202	N	250	1.078	1.078	0.370
M401	N	50	2.857	2.611	2.611
M402	T	50	2.273	2.273	2.272
M402	T	50	2.273	2.273	2.272

- pavimento controterra:

Tabella 6.6 - Riepilogo pavimento edificio B.

Cod.	Tipo	Spessore (mm)	U_p (W/m ² K)	U_e (W/m ² K)	Trasmittanza Periodica (W/m ² K)
P1	G	200	0.251	0.251	1.410

- copertura:

Tabella 6.7 - Riepilogo copertura edificio B.

Cod.	Tipo	Spessore (mm)	U_p (W/m ² K)	U_e (W/m ² K)	Trasmittanza Periodica (W/m ² K)
S1	T	200	2.234	2.081	1.062

- ponti termici:

Tabella 6.8 - Riepilogo ponti termici edificio B.

Codice	Descrizione Nodo	Trasmittanza Lineica Ψ [W/mK]
Z1	GF - Parete-Solaio controterra	0.209
Z2	R - Parete-Copertura	-0.447
Z3	W - Parete-Telaio	0.076
Z4	C - Angolo tra pareti sporgente	-0.341

- serramenti: i serramenti W1 e W2 presentano un telaio metallico senza taglio termico e vetrocamera (non vi è presenza di tendaggi o schermature), mentre i serramenti W2 e W3 sono degli shed in polycarbonato:

Tabella 6.9 - Riepilogo serramenti edificio B.

Cod.	Tipo	Dimensione (mm)	Tipologia Vetro	Uw (W/m ² K)	Ug (W/m ² K)	Area Tot. (m ²)
W1 - AVD	T	110X150	Vetro	5.190	4.930	8.325
W2 -AVD	T	110X240	Vetro	5.179	4.930	13.049
W3 - SHED	T	3400X200	Policarbonato	4.811	4.569	3.846
W4 - SHED	T	5200X200	Policarbonato	2.224	4.569	21.805

La definizione dell'input grafico comprende l'inserimento delle strutture opache, trasparenti e dei ponti termici e infine la caratterizzazione della zona termica (in rosso in Figura 6.47), caratterizzata da due locali; gli elementi grigi in figura rappresentano gli edifici vicini presenti.

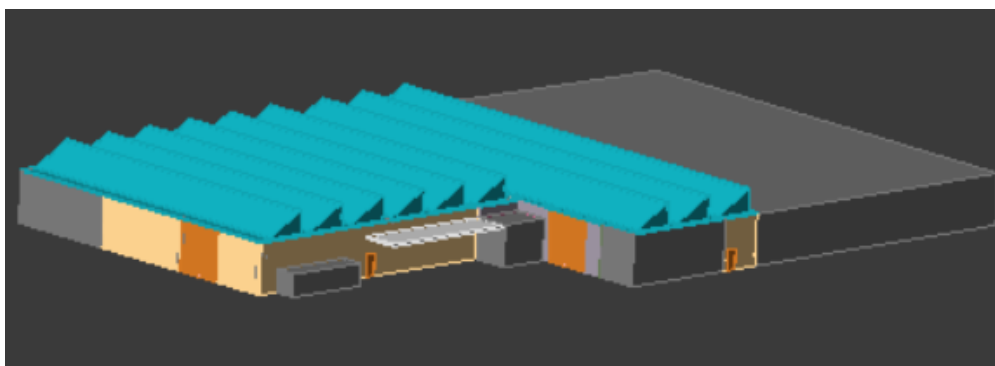


Figura 6.46 - Vista 3D dell'edificio B.



Figura 6.47 - Input grafico Edilclima (Edificio B).

Per quanto riguarda la produzione di energia termica a servizio dell'edificio, essa è affidata a un sistema di generazione decentralizzato ad aria calda basato su due generatori a basamento autonomi e indipendenti. Queste unità riscaldano direttamente l'aria ambiente senza l'utilizzo di un fluido termovettore intermedio (come l'acqua), immettendola poi negli spazi tramite canalizzazioni metalliche posizionate nella parte alta dell'edificio; a livello di rendimenti di generazione, essi si attestano intorno al 90%. L'edificio è dotato di un impianto solare fotovoltaico di tipo centralizzato per l'autoproduzione di energia elettrica, come riportato nel software. L'installazione prevede moduli fotovoltaici posizionati con un orientamento ottimale perfettamente a Sud ($0,0^\circ$) e un'inclinazione rispetto al piano orizzontale di 30° . Il campo fotovoltaico è composto da 920 moduli, ciascuno con una superficie utile di circa 1.70 m^2 e una potenza di picco nominale di 440 Wp , con un'efficienza nominale pari allo 0.26. La potenza di picco complessiva installata sull'edificio risulta pari a 405 kWp . Per i calcoli energetici, è stato applicato un fattore di efficienza globale (fpv) del sottocampo pari a 0.75, per tener conto delle perdite del sistema.

6.2.2 Prestazioni energetiche

Una volta definito il modello energetico dell'edificio B sulla base dei dati forniti dall'azienda, si passa alla valutazione delle prestazioni energetiche nello stato di fatto,

attraverso il calcolo dei principali indicatori energetici. Analogamente a quanto illustrato per l'edificio A, l'analisi energetica consente di valutare il comportamento del sistema edificio-impianto in termini di dispersioni termiche dell'involucro, fabbisogni energetici per i diversi servizi e prestazioni energetiche complessive dell'edificio.

L'analisi dei flussi termici ha permesso di ripartire la dispersione totale dell'edificio tra i vari macro-componenti dell'involucro, come illustrato in Figura 6.53:

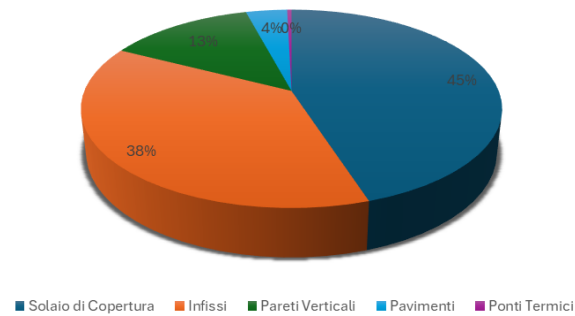


Figura 6.48 - Incidenza dei componenti edilizi sulle dispersioni dell'edificio B.

Le Figure 6.50 e 6.51 riportano il bilancio energetico dell'edificio nel periodo invernale ed estivo, evidenziando i contributi delle dispersioni termiche attraverso l'involucro edilizio e gli apporti energetici dovuti alle sorgenti interne e alla radiazione solare.

Somario											
Scambi termici per componente											
Riassunto zone											
Dispersioni											
Apporti											
Zona	Descrizione	Su [m²]	V [m³]	Qh.tr [kWh]	Qh.ve [kWh]	Qh.ht [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	Consumo specifico
1	Zona climatizzata	1714	12278.8	526472	56356	582827	70538	45172	115709	473364	39 kWh/m³

Figura 6.49 - Dispersioni e apporti energia invernale (Edificio B).

Somario											
Scambi termici per componente											
Riassunto zone											
Dispersioni											
Apporti											
Zona	Descrizione	Su [m²]	V [m³]	Qc.tr [kWh]	Qc.ve [kWh]	Qc.ht [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	Consumo specifico
1	Zona climatizzata	1714	12278.8	554942	65293	620235	245884	67881	313765	109036	9 kWh/m³

Figura 6.50 - Dispersioni e apporti energia estiva (Edificio B).

La Figura 6.51 mostra invece i fabbisogni di energia primaria associati ai diversi servizi energetici dell'edificio, unitamente ai vettori energetici utilizzati e alle emissioni di CO₂ correlate al funzionamento del sistema edificio-impianto. L'analisi dei vettori energetici rivela una profonda asimmetria tra il potenziale di decarbonizzazione dell'edificio e l'attuale impiego delle fonti rinnovabili; infatti, sebbene il servizio di illuminazione mostri una gestione virtuosa alimentata

integralmente dal fotovoltaico, il sistema di riscaldamento continua a rappresentare un vincolo critico per la sostenibilità globale del complesso. La persistente dipendenza dalla combustione fossile per compensare le marcate carenze termiche dell'involucro impedisce il miglioramento della classe energetica e la riduzione dell'impronta ecologica.

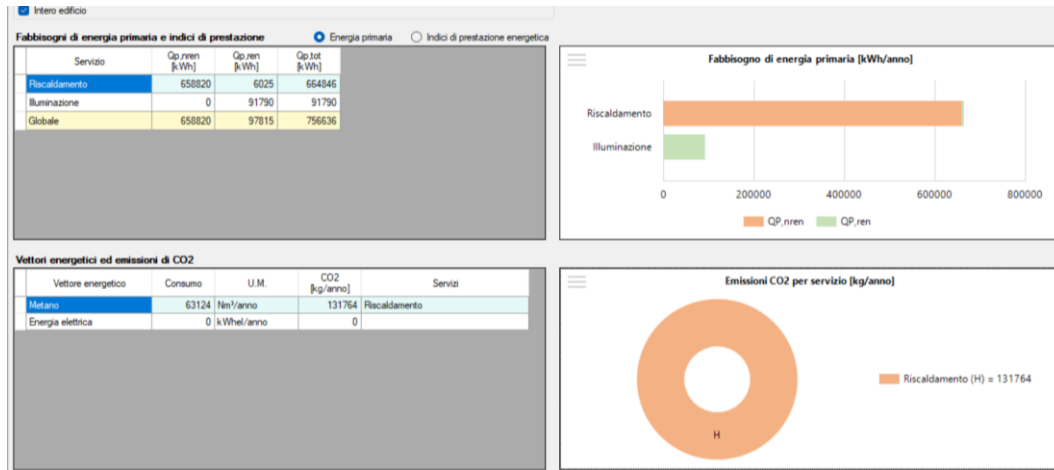


Figura 6.51 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici e emissioni di CO₂ (Edificio B).

Gli indici di prestazione energetica risultanti dal calcolo sono riportati nella Figura 6.53:

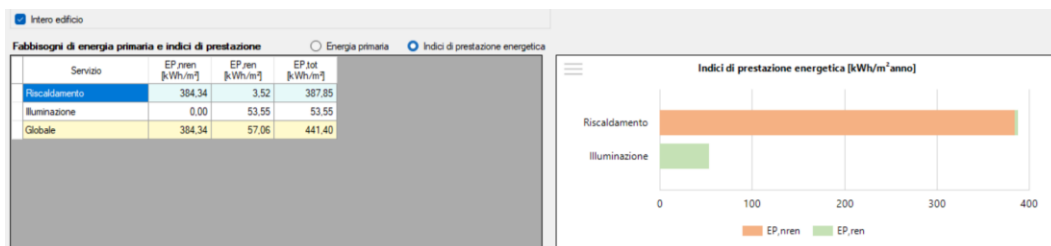


Figura 6.52 - Indici di prestazione energetica (Edificio B).

Per quanto riguarda la trasmittanza media H'_t , per l'edificio B il valore risulta pari a $1.722 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Il quadro prestazionale delineato, colloca l'edificio nella classe energetica G, con un $EP_{gl,nren}$ pari a $383.34 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$; tale risultato riflette lo stato di obsolescenza dell'involucro e sancisce l'inefficienza globale del sistema, rendendo necessari interventi di riqualificazione profonda per allineare l'immobile agli attuali standard di sostenibilità energetica.

6.3 Edificio C

L'azienda oggetto di studio è situata anch'essa nella provincia di Reggio Emilia; come per l'edificio B, nel presente paragrafo vengono quindi riportate esclusivamente le caratteristiche principali dell'edificio e i risultati delle prestazioni energetiche nello stato di fatto.

6.3.1 Descrizione dell'edificio

L'edificio C costituisce il terzo caso studio analizzato nel presente lavoro. L'immobile è destinato principalmente ad attività di tipo produttivo, rientrando pertanto nella categoria principale E8, relativa agli edifici adibiti ad attività industriali e artigianali, nella categoria E2, relativa ad edifici adibiti ad uso uffici o assimilabili. L'edificio si sviluppa su 2 livelli fuori terra.

Tabella 6.10 - Zone edificio C.

Identificativo Zona	Utilizzo	Superficie Netta (m²)	Volume Lordo (m³)
Zona 1	Uffici	530.9	1.920.08
Zona 2	Area lavorazione	1.179.14	9.566.41
Totale		2.885.87	11.486.49

Le caratteristiche termo-fisiche delle strutture sono state definite all'interno del modello energetico fornito dall'azienda e successivamente utilizzate per l'elaborazione dei risultati energetici riportati nei paragrafi successivi. L'involucro edilizio dell'edificio è pertanto costituito dai seguenti componenti

- pareti opache:

Tabella 6.11 - Riepilogo murature edificio C.

Cod.	Tipo	Spessore (mm)	U_p (W/m²K)	U_e (W/m²K)	Trasmittanza Periodica (W/m²K)
M1	T	310	0.398	0.393	0.108
M2	U	200	1.150	1.150	0.709
M3	N	200	1.150	1.150	0.709
M401	T	55	1.834	1.730	1.591

– pavimenti:

Tabella 6.12 - Riepilogo pavimenti edificio C.

Cod.	Tipo	Spessore (mm)	U_p (W/m²K)	U_e (W/m²K)	Trasmittanza Periodica (W/m²K)
P1	D	315	1.346	1.346	0.298
P2	G	260	0.350	0.350	0.246
P3	U	315	1.351	1.351	0.298
P4	T	301	1.684	1.595	0.470
P5	G	260	0.214	0.214	0.249

– soffitti:

Tabella 6.13 - Riepilogo soffitti edificio C.

Cod.	Tipo	Spessore (mm)	U_p (W/m²K)	U_e (W/m²K)	Trasmittanza Periodica (W/m²K)
S1	U	90	0.439	0.439	0.432
S2	D	315	1.666	1.666	0.531
S3	U	315	1.666	1.666	0.531
S4	T	372	0.508	0.499	0.078

– ponti termici:

Tabella 6.14 - Riepilogo ponti termici edificio C.

Codice	Descrizione Nodo	Trasmittanza Lineica Ψ [W/Mk]
Z1	C-Angolo tra pareti	0.019
Z2	IF - Parete - Solaio interpiano	0.440
Z3	GF - Parete - Solaio controterra	0.000
Z4	R - Parete - Copertura	0.246
Z5	W - Parete - Telaio	0.169

- serramenti: tutti i serramenti presentano un telaio metallico senza taglio termico con vetro basso-emissivo (non vi è presenza di tendaggi o schermature):

Tabella 6.15 - Riepilogo serramenti edificio C.

Cod.	Tipo	Dimensione (mm)	Tipologia Vetro	Uw (W/m²K)	Ug (W/m²K)	Area Tot. (m²)
W1 - AVB	T	2200X2800	Vetro	2.808	1.946	6.160
W2 -AVB	T	2500X1400	Vetro	3.524	1.946	3.500
W3 - AVB	T	3750X1800	Vetro	3.249	1.946	6.750
W4 - AVB	T	8500X1800	Vetro	3.242	1.946	15.300
W5 - AVB	T	1250X2800	Vetro	4.056	1.946	3.500
W6 - AVB	T	1000X750	Vetro	4.215	1.946	0.750
W7 - AVB	T	1000X1340	Vetro	3.705	1.946	1.340

Si specifica che nella modellazione 3D dell'edificio (Figura 6.55) la copertura non risulta visibile, in quanto definita come struttura di tipo U confinante con ambienti non climatizzati. Tale scelta modellistica riflette la stratigrafia termica reale, dove il solaio di sottotetto funge da unico elemento di separazione tra il volume riscaldato e i locali superiori non climatizzati. La definizione dell'input grafico comprende l'inserimento delle strutture opache, trasparenti e dei ponti termici e infine la caratterizzazione delle due zone termiche (in rosso in Figura 6.54 per il piano terra e Figura 6.55 per il primo piano), suddivise nei rispettivi locali climatizzati.

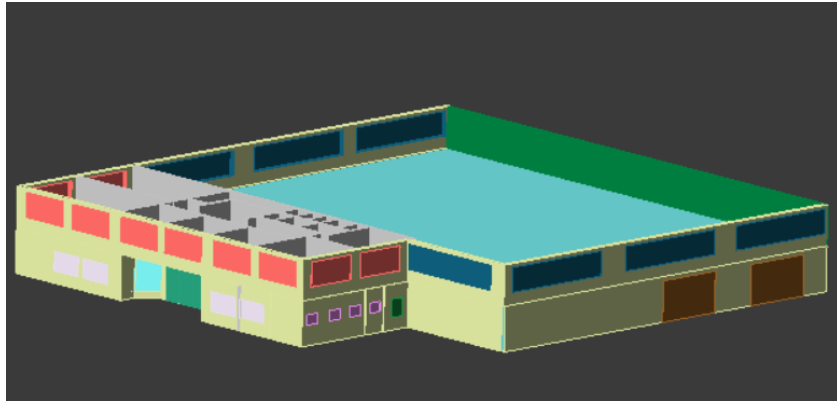


Figura 6.53 - Vista 3D dell'edificio C.

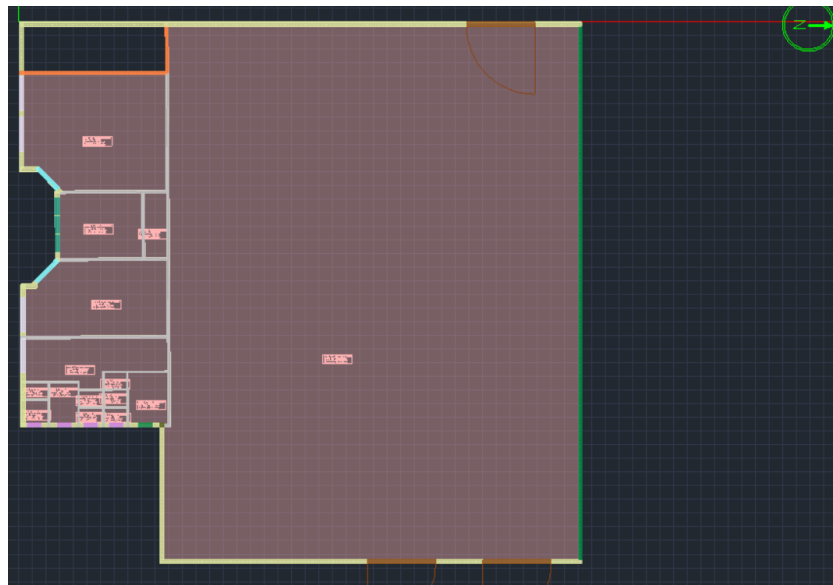


Figura 6.54 - Input grafico piano terra Edilclima (Edificio C).

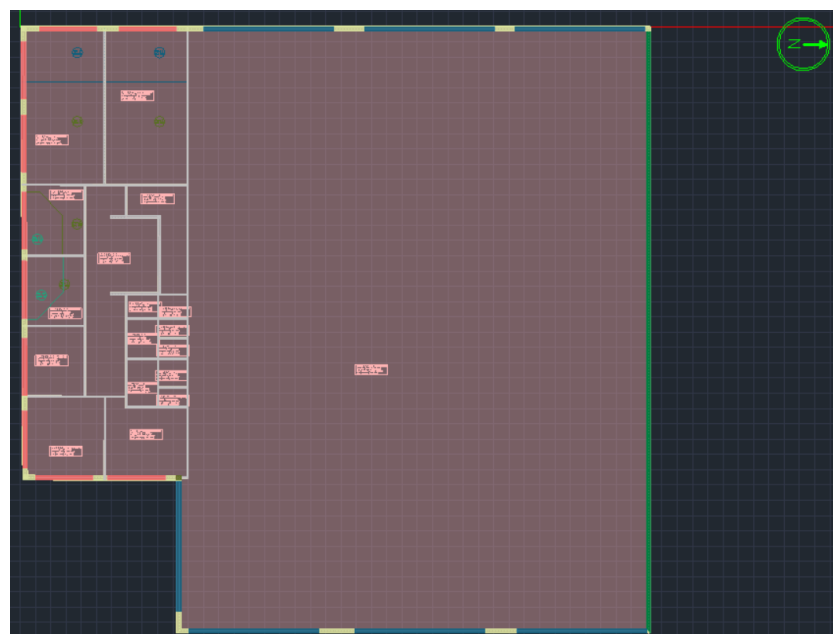


Figura 6.55 - Input grafico piano primo Edilclima (Edificio C).

Il sistema impiantistico dell'edificio è configurato per gestire separatamente le esigenze del blocco uffici e quelle del magazzino, utilizzando una combinazione di sistemi idronici e tecnologie a irraggiamento. L'energia termica per il riscaldamento invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) è generata in modo centralizzato all'interno di una centrale termica al piano terra. Il sistema è costituito da tre caldaie a gas metano collegate in cascata con un rendimento intorno al 90%; questa configurazione permette un'elevata flessibilità, poiché i generatori possono attivarsi in sequenza in base all'effettiva richiesta di calore, ottimizzando i consumi rispetto a un unico generatore di grande potenza. La distribuzione del comfort termico avviene in due modi distinti:

- Zona Uffici: la diffusione avviene tramite ventilconvettori (fancoils), che garantiscono una risposta rapida sia durante la stagione invernale che in quella estiva.
- Zona Magazzino: il riscaldamento è affidato a strisce radianti a soffitto.

Per quanto riguarda la climatizzazione estiva, il servizio è limitato al solo blocco uffici ed è garantito da un gruppo frigorifero elettrico dedicato, che alimenta i medesimi ventilconvettori utilizzati in inverno.

6.3.2 Prestazioni energetiche

Una volta descritto il modello energetico dell'edificio C, si passa alla valutazione delle prestazioni energetiche nello stato di fatto. L'analisi dei flussi termici ha permesso di ripartire la dispersione totale dell'edificio tra i vari macro-componenti dell'involucro, come illustrato in Figura 6.62:

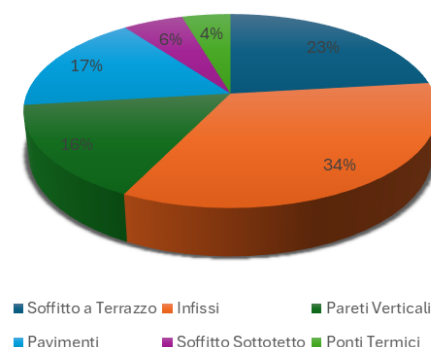


Figura 6.56 - Incidenza dei componenti edilizi sulle dispersioni dell'edificio C.

Le Figure 6.59 e 6.60 illustrano il bilancio energetico dell'edificio durante la stagione invernale ed estiva, evidenziando i contributi legati alle dispersioni termiche attraverso l'involucro edilizio e agli apporti energetici derivanti sia dalla radiazione solare sia dalle sorgenti interne.

Sommar											
Scambi termici per componente											
Riassunto zone											
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Dispersioni			Apporti				Consumo specifico
				Qh.tr [kWh]	Qh.ve [kWh]	Qh.it [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	
1	Zona climatizzata	531	1920.1	50334	10841	61175	15570	13990	29560	33594	17 kWh/m ³
2	Zona climatizzata	1179	9566.4	80841	44385	125225	13909	31073	44382	82082	9 kWh/m ³

Figura 6.57 - Dispersioni e apporti energia invernale (Edificio C).

Sommar											
Scambi termici per componente											
Riassunto zone											
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Dispersioni			Apporti				Consumo specifico
				Qc.tr [kWh]	Qc.ve [kWh]	Qc.it [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	
1	Zona climatizzata	531	1920.1	47659	9849	57508	30987	20259	51246	13483	7 kWh/m ³
2	Zona climatizzata	1179	9566.4	27010	21045	48055	30942	31242	62185	26859	3 kWh/m ³

Figura 6.58 - Dispersioni e apporti energia estiva (Edificio C).

La Figura 6.61 riporta invece la distribuzione dei fabbisogni di energia primaria associati ai diversi servizi energetici dell'edificio, insieme ai vettori energetici impiegati e alle corrispondenti emissioni di CO₂.

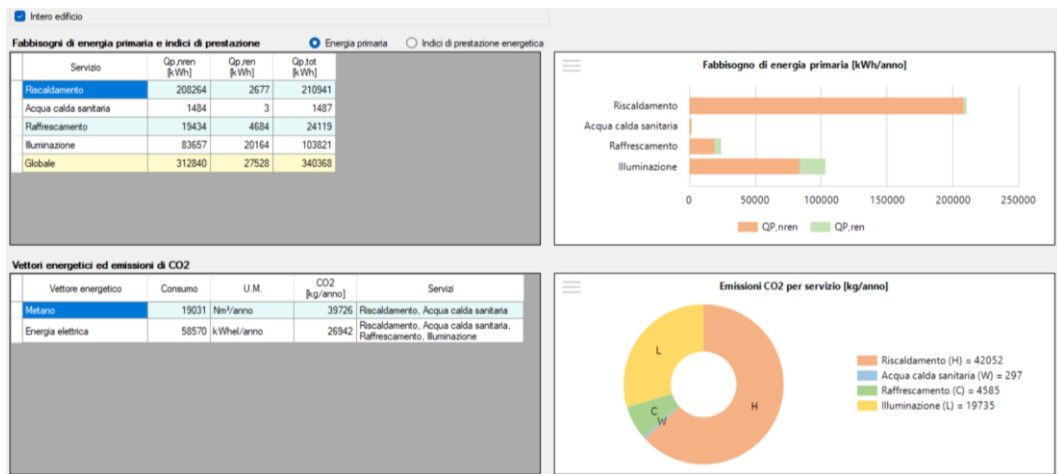


Figura 6.59 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO₂ (Edificio C).

Gli indici di prestazione energetica, riportati nella Figura 6.62, forniscono una sintesi del comportamento energetico dell'edificio, esprimendo la quantità di energia richiesta per garantire le condizioni di comfort interno:

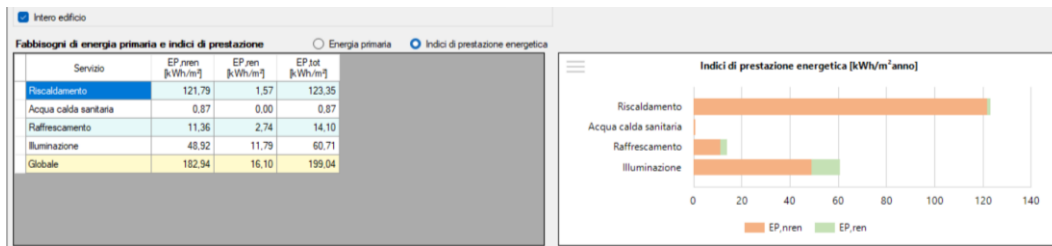


Figura 6.60 - Indici di prestazione energetica (Edificio C).

La trasmittanza media H'_t per l'edificio C risulta pari a $0.581 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Le due zone dell'edificio C risultano avere prestazioni energetiche differenti:

- la Zona 1 (Classe D) presenta un consumo di $186.26 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$,
- la Zona 2, nonostante un valore numerico inferiore ($126.01 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$), ricade in Classe E, probabilmente a causa della diversa destinazione d'uso (E.8) che prevede parametri di riferimento più stringenti.

L'analisi dello stato di fatto dei tre edifici oggetto di studio ha consentito di definire il quadro energetico iniziale degli edifici, evidenziando le principali caratteristiche geometriche, costruttive e impiantistiche che influenzano le prestazioni energetiche complessive. I risultati ottenuti rappresentano il riferimento di partenza per le successive valutazioni. Al fine di sintetizzare le principali caratteristiche degli edifici analizzati, nelle tabelle seguenti sono riportati i parametri geometrici e gli indicatori energetici principali relativi allo stato di fatto. Tali valori costituiscono il riferimento per le analisi sviluppate nei capitoli successivi.

Tabella 6.16 - Principali indicatori energetici degli edifici.

Edificio	H'_t ($\text{W/m}^2\text{K}$)	$E_{\text{gl,Nren}}$ ($\text{Kwh/m}^2 \text{ A}$)	Classe Energetica
Edificio A (zona 1)	1.349	405.52	G
Edificio A (zona 2)		171.5	G
Edificio B	1.722	453.79	G
Edificio C (zona 1)	0.581	186.26	D
Edificio C (zona 2)		126.01	E

7 Strategie di riqualificazione energetica e analisi dei risultati

Il presente capitolo analizza le strategie di riqualificazione applicate ai casi studio descritti in precedenza, con l'obiettivo di valutarne l'impatto in termini di riduzione dei consumi energetici, delle emissioni di CO_2 e dei costi di esercizio. Per isolare l'efficacia delle diverse soluzioni tecnologiche, gli interventi sono stati implementati nel modello energetico tramite il software Edilclima mantenendo invariati i parametri geometrici e le caratteristiche dell'involucro, definendo così uno "stato di progetto" che costituisce la base per la successiva analisi comparativa. L'esposizione segue un percorso logico che parte dalla descrizione tecnica delle soluzioni adottate per giungere alla valutazione delle prestazioni ambientali ed economico-finanziarie, includendo il calcolo degli incentivi derivanti dal meccanismo del Conto Termico 3.0. Il capitolo si conclude con un confronto trasversale tra i tre edifici, finalizzato a estrapolare considerazioni di carattere generale utili a orientare le scelte di efficientamento in contesti analoghi.

7.1 Descrizione delle strategie di intervento implementate

Le strategie di riqualificazione analizzate si focalizzano sulla sostituzione dei sistemi impiantistici; intervenire sugli impianti rappresenta talvolta la via meno invasiva e più efficace per incrementare l'efficienza complessiva senza alterare la struttura dell'edificio. Dal punto di vista metodologico, il passaggio alla configurazione di progetto è stato simulato mantenendo invariati i parametri geometrici, le prestazioni dell'involucro e i profili d'uso. Tale isolamento delle variabili permette di quantificare in modo diretto l'impatto delle nuove soluzioni sui principali indicatori energetici e ambientali:

- fabbisogni energetici per i diversi servizi e consumi di energia primaria;
- mix dei vettori energetici utilizzati;
- emissioni di CO_2 .

Questi scenari costituiscono la base per il confronto sistematico tra stato di fatto e di progetto presentato nei paragrafi successivi.

7.1.1 Stato di progetto Edificio A

Nel caso dell'edificio A, l'intervento di riqualificazione energetica è stato definito a partire dalle criticità emerse nell'analisi dello stato di fatto, che ha evidenziato un sistema impiantistico caratterizzato da elevati consumi e da una limitata efficienza complessiva. In particolare, l'obsolescenza dei generatori esistenti e l'impiego di vettori energetici tradizionali rendevano l'impianto poco performante sia sotto il profilo energetico sia sotto quello ambientale. L'intervento ha quindi previsto la completa sostituzione dei generatori esistenti con un sistema basato su pompe di calore elettriche aria-aria ad alta efficienza, con l'obiettivo di elettrificare integralmente i consumi energetici dell'edificio. Nella zona dedicata alla lavorazione (Zona 1), la generazione termica è affidata a tre unità esterne: due pompe di calore da 28 kW ciascuna e una da 14 kW. Tali unità alimentano terminali interni ad espansione diretta, che trattano direttamente l'aria degli ambienti garantendo tempi di risposta molto rapidi e un rendimento di emissione pari al 97%. Le unità di questa zona presentano un coefficiente di prestazione in riscaldamento (COP) pari a circa 4.08. Per quanto riguarda la zona magazzino (Zona 2), è installata una pompa di calore da 28 kW, anch'essa collegata a unità interne ad espansione diretta. In questo caso, l'assenza di fluidi intermedi consente di massimizzare l'efficienza del sistema, con un rendimento di emissione pari al 98%; le macchine presentano rispettivamente un COP in riscaldamento con valori nominali prossimi a 4.28 e 4.08 in condizioni standard. L'intero sistema è gestito tramite regolazione elettronica modulante per singolo ambiente, consentendo un controllo puntuale delle condizioni termoigrometriche e un'ulteriore ottimizzazione dei consumi. Il punto centrale dell'intervento consiste quindi nel passaggio da un sistema tradizionale a gas a un sistema completamente elettrico basato su pompe di calore ad alta efficienza, con benefici significativi in termini di riduzione dei consumi energetici, delle emissioni e dei costi di esercizio. L'analisi dei carichi termici mostra come il fabbisogno dell'edificio sia fortemente influenzato dagli apporti solari e dal calore generato internamente (Figura 7.1 e 7.2).

		Dispersioni		Apporti							
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Qh.tr [kWh]	Qh.ve [kWh]	Qh.ht [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	Consumo specifico
1	Lavorazione	363	2184,1	72479	13644	86123	7401	9573	16973	69764	32 kWh/m ³
2	Magazzino	427	1797,4	44931	8095	53026	7562	11243	18806	35117	20 kWh/m ³

Figura 7.1 - Dispersioni e apporti energia invernale nello stato di progetto (Edificio A).

		Dispersioni		Apporti							
Zona	Descrizione	Su Superficie utile della zona [m ²]	V Superficie utile della zona [m ³]	Qc.ve [kWh]	Qc.ht [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	Consumo specifico	
1	Lavorazione	363	2184,1	22586	4386	26972	20328	9520	29848	15338	7 kWh/m ³
2	Magazzino	427	1797,4	13465	3649	17114	7982	11182	19164	8952	5 kWh/m ³

Figura 7.2 - Dispersioni e apporti energia estiva nello stato di progetto (Edificio A).

Dalla sintesi dei vettori energetici emerge chiaramente il vantaggio di questa scelta: l'intero fabbisogno annuo è coperto da un consumo di circa 60.431 kWh di energia elettrica, eliminando totalmente le emissioni dirette prodotte dalle caldaie e riducendo l'impronta di CO₂ a circa 27.8 tonnellate all'anno. Osservando il bilancio dell'energia primaria, si nota come la quota di energia rinnovabile sia prevalente; questo perché la pompa di calore "raccolge" gratuitamente dall'ambiente esterno la maggior parte del calore necessario per far funzionare l'edificio. Gli indici di prestazione confermano la bontà dell'intervento. Nella zona lavorazione, l'indice di energia non rinnovabile ($EP_{gl,nren}$) di 151.75 kWh/m²anno per la zona lavorazione e 125.66 kWh/m²anno per la zona magazzino dimostra come, grazie ai nuovi impianti, sia possibile gestire volumi importanti limitando drasticamente lo spreco di risorse.

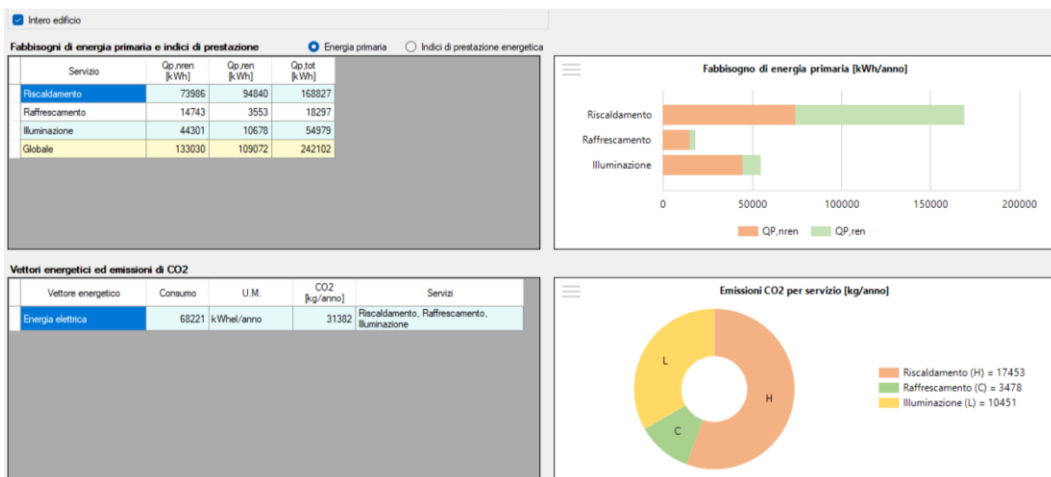


Figura 7.3 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO₂ nello stato di progetto (Edificio A).

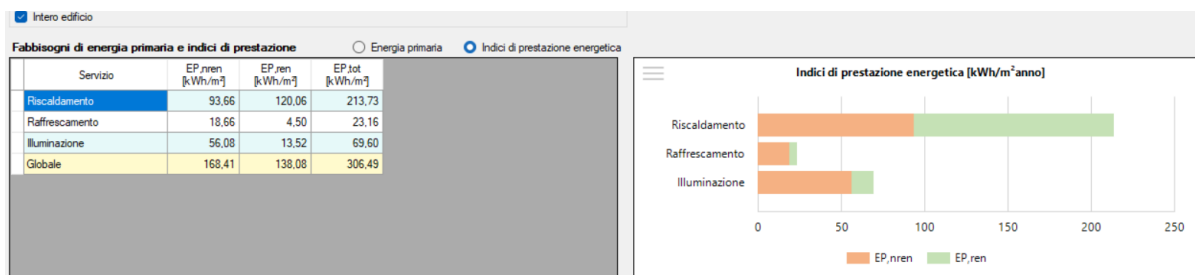


Figura 7.4 - Indici di prestazione energetica nello stato di progetto (Edificio A).

Infine, i risultati ottenuti portano l'immobile in Classe Energetica D con un $EP_{gl,nren}$ pari a $160.93 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per la Zona 1 e pari a $70.95 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per la Zona 2; considerando che si tratta di un edificio industriale (categoria E.8), il passaggio a questa classe rappresenta un traguardo significativo, certificando come la sostituzione dei generatori abbia trasformato la carrozzeria in una struttura più efficiente.

7.1.2 Stato di progetto Edificio B

L'intervento per l'edificio B si configura come una sostituzione del sistema impiantistico esistente, finalizzata al miglioramento delle prestazioni energetiche complessive dell'edificio. In questa configurazione, l'impianto fotovoltaico non subisce variazioni, rimanendo identico allo stato di fatto: il sistema resta composto da 920 moduli con orientamento a Sud e inclinazione di 30°C , per una potenza di picco complessiva di 404.80 kWp ; tale capacità produttiva, distribuita su una superficie captante di oltre 1.560 m^2 , permette di sostenere l'importante domanda elettrica derivante dalla nuova centrale termica, riducendo drasticamente la dipendenza dalla rete nazionale e massimizzando l'autoconsumo. La trasformazione radicale riguarda la climatizzazione ambientale, dove la precedente impiantistica viene sostituita con un sistema a espansione diretta basato su pompa di calore aria-aria. La generazione è affidata a 12 unità esterne (aventi un COP in riscaldamento con valori nominali prossimi a 4.33 in condizioni standard), dove sette unità operano come generatori principali per la copertura dei carichi nominali, mentre cinque unità sono dedicate alla quota di integrazione, intervenendo per gestire i picchi di richiesta o le condizioni climatiche più rigide. Questo parco macchine opera con tecnologia modulante, permettendo al sistema di adeguare istantaneamente la potenza erogata alle reali necessità termiche dei locali, ottimizzando così i coefficienti di prestazione energetica

durante tutto l'arco dell'anno. Per quanto riguarda la distribuzione agli ambienti, il fluido termovettore utilizzato è l'aria. Nella configurazione invernale, il calore viene immesso negli ambienti tramite bocchette collegate a sistemi ad aria calda, raggiungendo un rendimento di emissione del 94%, mentre nella stagione estiva, il medesimo impianto assicura il raffrescamento attraverso terminali a espansione diretta, con un rendimento di emissione che sale al 97%. L'intero sistema è governato da una logica di regolazione climatica per singolo ambiente; tale precisione qualifica l'intervento come una soluzione ad altissima efficienza, in grado di coniugare il benessere degli occupanti con una significativa riduzione dell'impatto ambientale dell'immobile.

L'analisi dei carichi termici, sia in regime invernale sia estivo (Figura 7.5 e Figura 7.6), mostra come il fabbisogno sia influenzato positivamente dagli apporti solari e interni, riducendo la quota di energia termica che le pompe di calore elettriche devono produrre.

Sommar io / Det tagli / Scambi termici per componente / Riassunto zone											
		Dispersioni					Apporti				
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Qh.tr [kWh]	Qh.ve [kWh]	Qh.ht [kWh]	Qeol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qh.nd [kWh]	Consumo specifico
1	Zona climatizzata	1714	12278.8	526472	56356	582827	70538	45172	115709	473364	39 kWh/m ³

Figura 7.5 - Dispersioni e apporti energia invernale nello stato di progetto (Edificio B).

Sommar io / Det tagli / Scambi termici per componente / Riassunto zone											
		Dispersioni					Apporti				
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Qc.tr [kWh]	Qc.ve [kWh]	Qc.ht [kWh]	Qeol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	Consumo specifico
1	Zona climatizzata	1714	12278.8	554942	65293	620235	245884	67881	313765	109036	9 kWh/m ³

Figura 7.6 - Dispersioni e apporti energia estiva nello stato di progetto (Edificio B).

La distribuzione mensile del fabbisogno di energia primaria evidenzia come la domanda energetica invernale, precedentemente legata al consumo di combustibili fossili, viene ora soddisfatta attraverso il vettore elettrico, ottimizzando i prelievi e sfruttando la stagionalità favorevole della produzione solare. La Figura 7.7 riporta la sintesi dei vettori energetici impiegati e il relativo bilancio elettrico, dove emerge chiaramente l'efficacia del passaggio alle pompe di calore. La nuova configurazione consente infatti di alimentare i servizi di riscaldamento, raffrescamento e ausiliari tramite l'energia autoprodotta in situ dal campo fotovoltaico.

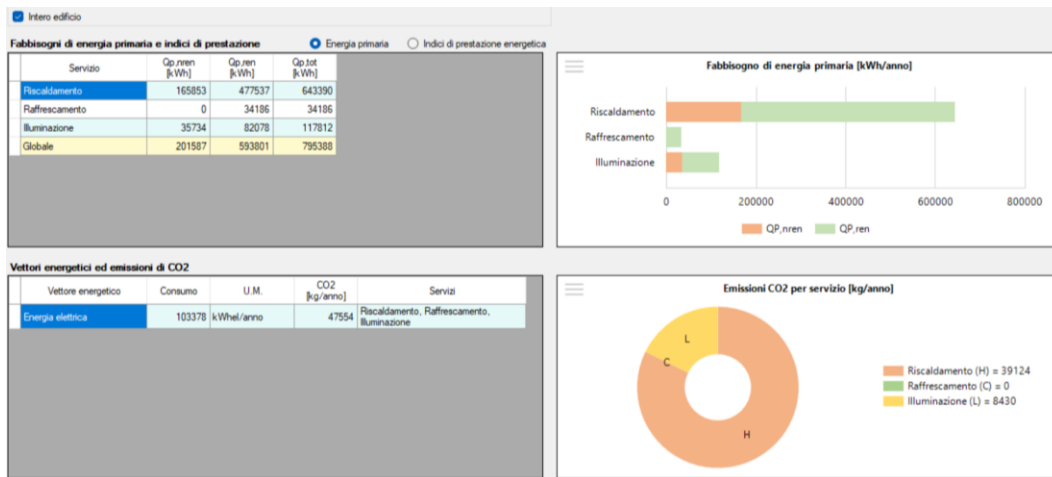


Figura 7.7 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO₂ nello stato di progetto (Edificio B).

Gli indici di prestazione energetica, dettagliati nella Figura 7.8, certificano il salto di qualità dell'edificio, ora in Classe Energetica A2. Inoltre, il valore di energia primaria non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ ora pari a 96.75 kWh/m²anno, risulta molto positivo se paragonato al fabbisogno nella configurazione dello stato di fatto.

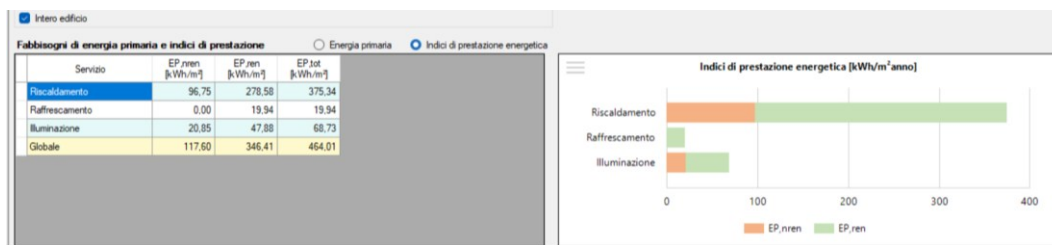


Figura 7.8 - Indici di prestazione energetica nello stato di progetto (Edificio B).

A differenza dell'edificio A, il caso studio B consente di analizzare l'efficacia degli interventi in un contesto con caratteristiche energetiche e dimensionali differenti, contribuendo alla definizione di considerazioni di carattere più generale nell'ambito del settore industriale.

7.1.3 Stato di progetto Edificio C

Nel caso dell'edificio C, la strategia si basa sulla sostituzione del sistema impiantistico esistente con una soluzione più efficiente dal punto di vista energetico. La riqualificazione impiantistica si basa sull'adozione di un sistema centralizzato integrato, progettato per garantire elevati standard di efficienza energetica e comfort ambientale. Il centro del sistema è costituito da un generatore ibrido che vede la cooperazione tra una pompa di calore elettrica aria-acqua reversibile (avente un COP

in riscaldamento con valori nominali prossimi a 3.36 in condizioni standard) e una caldaia a condensazione alimentata a metano (avente rendimento a 80-60°C di 98%); la pompa di calore è caratterizzata da un funzionamento modulante a potenza variabile e agisce come generatore principale per il riscaldamento invernale e la produzione di acqua calda sanitaria, oltre a occuparsi del raffrescamento estivo. Ad essa si affianca una caldaia a condensazione con una potenza nominale di circa 112 kW, che interviene a supporto per soddisfare i picchi di carico termico o le condizioni climatiche più rigide. Il fluido termovettore viene distribuito agli ambienti tramite una rete orizzontale di piano che alimenta terminali di tipo ventilconvettore, i quali sono gestiti da un sistema di regolazione per singola zona con logica modulante, che assicura una distribuzione uniforme del calore a una temperatura media di mandata di 45°C in inverno, minimizzando gli sprechi e massimizzando i rendimenti di emissione. La gestione dell'energia termica è ottimizzata attraverso serbatoi di accumulo coibentati posizionati in centrale termica, mentre la rete di distribuzione è isolata per ridurre le dispersioni passive. L'intero sistema impiantistico è supportato da un importante contributo di energia rinnovabile garantito da un nuovo impianto fotovoltaico composto da 35 moduli in silicio monocristallino per una potenza complessiva di 1.4 kWp; l'energia prodotta da tale impianto viene impiegata per alimentare i componenti elettrici del sistema, tra cui le unità esterne della pompa di calore, i circolatori e i ventilatori dei terminali, riducendo drasticamente il prelievo dalla rete e l'impatto ambientale dell'edificio in termini di emissioni di CO₂.

L'analisi dei carichi termici, sia in regime invernale sia estivo (Figura 7.9 e Figura 7.10), mostra come il fabbisogno sia influenzato positivamente dagli apporti solari e interni, riducendo la quota di energia netta richiesta ai generatori.

Sommar											
Scambi termici per componente											
Riassunto zone											
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Dispersioni			Apporti				Consumo specifico
				Qh.tr [kWh]	Qh.ve [kWh]	Qh.ht [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qh.nd [kWh]	
1	Zona climatizzata	531	1920.1	50415	24553	74968	15545	13990	29536	47011	24 kWh/m ³
2	Zona climatizzata	1179	9566.4	94185	51929	146114	13909	31073	44982	101792	11 kWh/m ³

Figura 7.9 - Dispersioni e apporti energia invernale nello stato di progetto (Edificio C).

		Dispersioni		Apporti							
Zona	Descrizione	Su [m ²]	V [m ³]	Qc.tr [kWh]	Qc.ve [kWh]	Qc.ft [kWh]	Qsol.w [kWh]	Qint [kWh]	Qgn [kWh]	Qc.nd [kWh]	Consumo specifico
1	Zona climatizzata	531	1920.1	39784	18405	58189	28734	18654	47388	11148	6 kWh/m ³
2	Zona climatizzata	1179	9566.4	27013	21045	48058	30924	31242	62167	26855	3 kWh/m ³

Figura 7.10 - Dispersioni e apporti energia estiva nello stato di progetto (Edificio C).

Invece, il grafico relativo al fabbisogno di energia primaria mensile evidenzia come la domanda energetica per il riscaldamento, pur rimanendo la voce principale, venga gestita in modo integrato tra non rinnovabile e rinnovabile. La ripartizione dei vettori energetici e delle relative emissioni di CO₂ conferma l'efficacia dell'intervento; nonostante l'utilizzo residuo del metano (circa 15867 Nm³/anno), il passaggio al vettore elettrico per il raffrescamento e la quota prevalente del riscaldamento permette di contenere le emissioni derivanti dall'elettricità a soli 7386 kg/anno. Gli indici di prestazione energetica, dettagliati nella Figura 7.11, certificano tale salto di qualità dell'immobile.

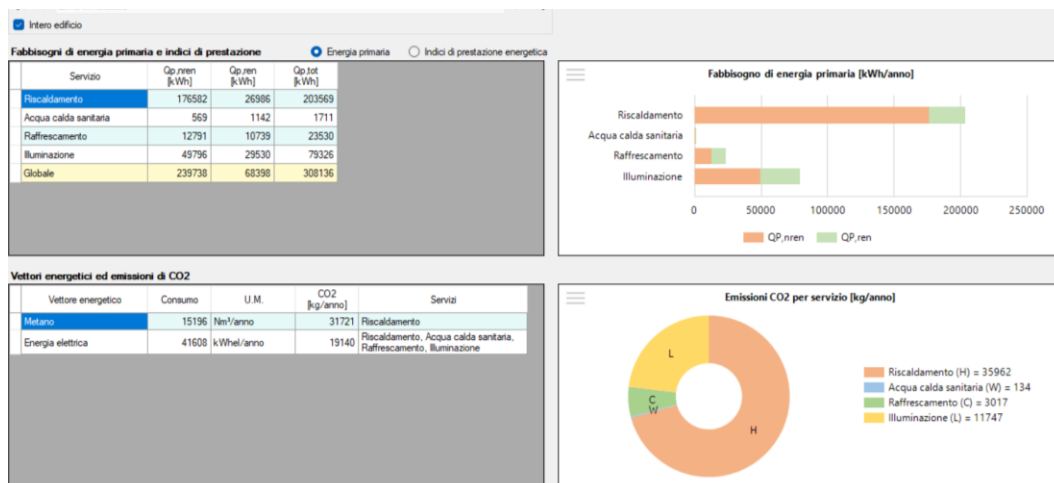


Figura 7.11 - Fabbisogni di energia primaria, vettori energetici ed emissioni di CO₂ nello stato di progetto (Edificio C).

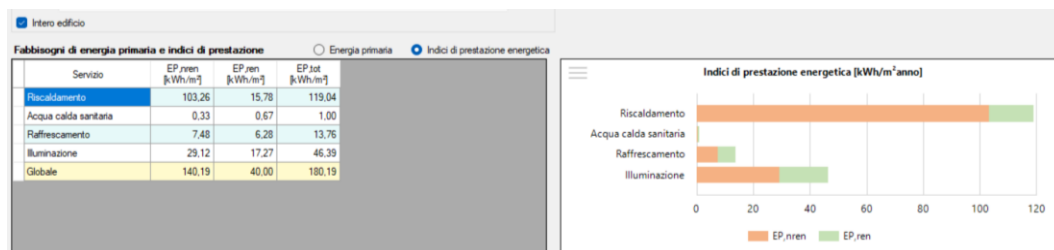


Figura 7.12 - Indici di prestazione energetica nello stato di progetto (Edificio C).

Il valori di energia primaria non rinnovabile ($EP_{gl,nren}$), pari a 135 kWh/m²anno per la Zona 1 e pari a 110.29 kWh/m²anno per la Zona 2, risultano estremamente

competitivi se rapportati rispettivamente a 530.90 m^2 e 1179.14 m^2 . Infine, la certificazione dei risultati attesta il raggiungimento della Classe Energetica B per la Zona 1 e C per la Zona 2, dimostrando come la riqualificazione tecnologica e l'integrazione tra sistemi a pompa di calore e solare fotovoltaico abbiano trasformato l'immobile in una struttura energeticamente efficiente e orientata alla sostenibilità ambientale.

Le configurazioni impiantistiche definite costituiscono la base per le successive analisi comparative, nelle quali verranno valutati gli effetti degli interventi in termini di prestazioni energetiche, ambientali ed economiche. Al fine di sintetizzare il confronto tra le configurazioni impiantistiche analizzate, si riporta di seguito una tabella riepilogativa dei rendimenti di generazione nello stato di fatto e nello stato di progetto per ciascun caso studio:

Tabella 7.1 - Rendimenti di generazione pre e post intervento.

Edificio	Stato Di Fatto - Tipo Generatore	η_{gen} [-]	Stato Di Progetto - Tipo Generatore	η_{gen} / COP [-]
A	Generatori a gas (AquaSplit)	≈ 0.87	Pompa di calore elettrica	COP (28 kW) = 4.28; COP (14 kW) = 4.08
B	Generatore tradizionale (gas)	≈ 0.90	Pompa di calore aria-aria	COP = 4.33
C	Generatore tradizionale (gas)	≈ 0.90	Sistema ibrido (PDC + caldaia condensazione)	COP = 3.36; $\eta \approx 0.98$

7.2 Analisi energetica, ambientale ed economica degli interventi

Definite le configurazioni di progetto, il presente paragrafo confronta tali prestazioni con quelle riferite allo stato di fatto, al fine di quantificare i benefici derivanti dalla riqualificazione. Coerentemente con l'approccio adottato, le variazioni prestazionali sono attribuite esclusivamente alle modifiche impiantistiche, garantendo la piena

comparabilità dei risultati tra i diversi edifici. L'analisi si sviluppa lungo tre direttrici principali:

- Ambito energetico: valutazione dei fabbisogni e degli indici di prestazione;
- Ambito ambientale: stima della riduzione delle emissioni di CO_2 ;
- Ambito economico: analisi dei costi di esercizio e degli indicatori di convenienza finanziaria.

I paragrafi successivi dettagliano i risultati ottenuti per ciascuna di queste aree.

7.2.1 Analisi energetica

L'analisi energetica rappresenta il primo livello di valutazione degli interventi di riqualificazione e consente di quantificare l'efficacia delle soluzioni impiantistiche adottate in termini di riduzione dei fabbisogni energetici e miglioramento delle prestazioni complessive degli edifici. A tal fine, per ciascun caso studio è stato effettuato il confronto tra lo stato di fatto e lo stato di progetto, considerando i principali indicatori energetici forniti dal software di calcolo, tra cui il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile (Figura 7.13), rinnovabile (Figura 7.14) e globale (Figura 7.15). L'analisi dei fabbisogni di energia primaria pre- e post-intervento permette di valutare l'efficacia degli interventi non solo in termini di risparmio assoluto, ma anche di qualità del mix energetico e di comfort ambientale raggiunto.

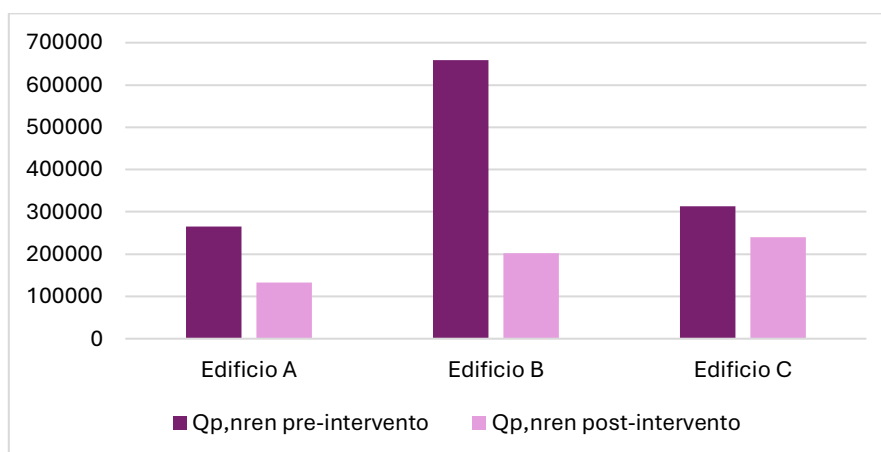


Figura 7.13 - Comparazione pre- e post-intervento dell'energia primaria non rinnovabile [kWh/anno].

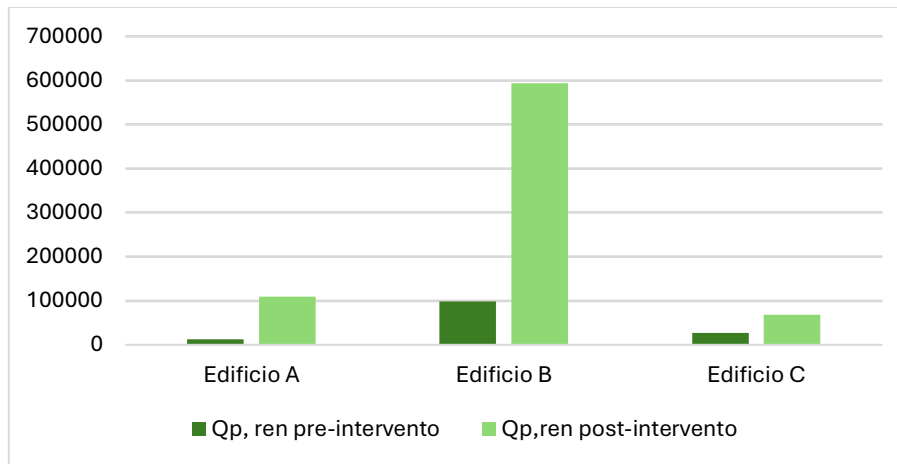


Figura 7.14 - Comparazione pre- e post-intervento dell'energia primaria rinnovabile [kWh/anno].

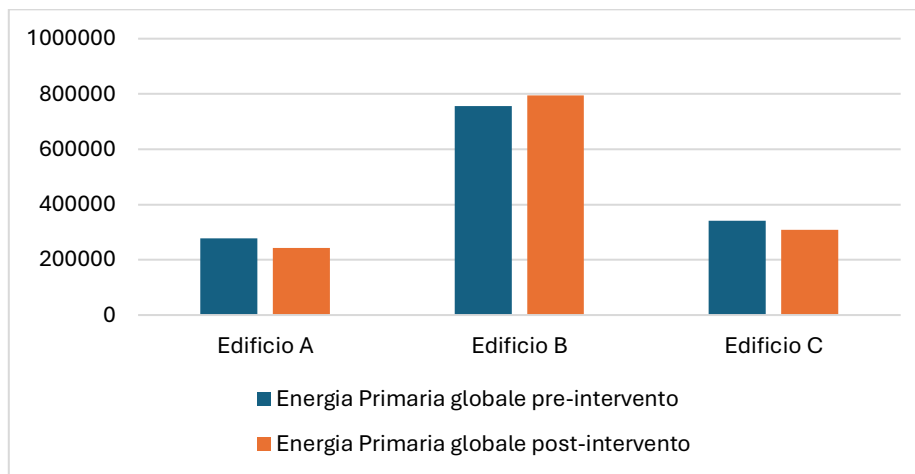


Figura 7.15 - Comparazione pre- e post-intervento dell'energia primaria globale [kWh/anno].

L'analisi dell'energia primaria non rinnovabile mostra una riduzione drastica nel passaggio allo stato di progetto, riflettendo il successo delle strategie di intervento, in quanto la sostituzione dei generatori tradizionali a gas metano con sistemi a pompa di calore ad alta efficienza permette di abbattere la dipendenza dai combustibili fossili. Tale contrazione rappresenta, quindi, un passo concreto verso la decarbonizzazione dei 3 edifici industriale, riducendo l'impatto ambientale diretto legato alle emissioni di CO_2 in situ. Specularmente, si osserva un incremento significativo dell'energia primaria rinnovabile. Questo dato riflette la trasformazione dell'edificio in un sistema capace di valorizzare le risorse naturali: l'energia termica prelevata dall'aria esterna tramite le pompe di calore e l'energia elettrica prodotta dagli impianti fotovoltaici (particolarmente rilevanti per gli edifici B e C) diventano le fonti prevalenti del bilancio energetico. L'aumento della quota rinnovabile è dunque un parametro

positivo, che certifica il raggiungimento di una maggiore autonomia energetica. La sintesi dell'efficacia degli interventi è affidata alla Figura 7.15, la cui interpretazione richiede un'analisi strettamente legata alle diverse configurazioni impiantistiche adottate e alla variazione dei servizi erogati. Il dato più rilevante è la capacità dei nuovi sistemi di gestire un incremento del comfort ambientale mantenendo il fabbisogno di energia primaria globale su livelli estremamente contenuti o, in alcuni casi, riducendolo rispetto allo stato di fatto. Per l'Edificio A, il passaggio a una configurazione completamente elettrica tramite pompa di calore permette di ottenere un risultato di eccezionale efficienza; nonostante lo stato di progetto introduca il servizio di raffrescamento estivo, precedentemente del tutto assente, l'energia primaria globale subisce una contrazione netta. Questo dimostra come l'elevato rendimento stagionale della pompa di calore sia stato in grado di compensare il nuovo carico termico estivo, abbattendo al contempo il fabbisogno invernale oltre la soglia del consumo storico legato alla sola caldaia a gas.

Al contrario, nell'Edificio B il grafico evidenzia un valore di energia primaria globale post-intervento leggermente superiore rispetto allo stato di fatto; questo è dovuto all'elettificazione del riscaldamento e all'aggiunta del raffrescamento, che hanno portato ad un fabbisogno elettrico maggiore, non più completamente compensato dal fotovoltaico. A questo si aggiunge il fatto che l'edificio è caratterizzato da una trasmittanza media elevata (H'_t pari a $1.77 \text{ W/m}^2\text{K}$), la quale comporta carichi termici importanti. L'introduzione del raffrescamento aumenta ulteriormente questi carichi, facendo crescere i consumi. Di conseguenza, nonostante gli impianti siano più efficienti e si registri una marcata riduzione della quota di energia primaria non rinnovabile, l'aumento dei carichi dovuto all'involucro e l'estensione del servizio portano a un lieve incremento dell'energia primaria globale, che non rappresenta un peggioramento ma è coerente con le condizioni del caso analizzato.

Infine, l'Edificio C evidenzia la riduzione più marcata dell'energia primaria globale, dovuta all'adozione di un sistema ibrido e l'installazione di un nuovo impianto fotovoltaico; la configurazione ibrida permette di modulare l'uso della pompa di calore e della caldaia a condensazione in base alla massima efficienza istantanea, mentre il nuovo apporto solare abbatte drasticamente il prelievo dalla rete.

L'analisi della distribuzione dei consumi in funzione dei vettori energetici rappresenta un passaggio cruciale per valutare gli effetti della riqualificazione non solo in termini quantitativi, ma anche qualitativi. Negli edifici industriali analizzati, caratterizzati da elevate superfici disperdenti e volumi importanti, la scelta del vettore incide drasticamente sia sulle prestazioni globali che sulla struttura dei costi di esercizio. Nello stato di fatto, i tre complessi presentano una configurazione eterogenea basata prevalentemente sul gas metano, soluzione storicamente privilegiata nel settore per affidabilità e costi contenuti. Nello specifico, mentre gli edifici A e C utilizzano un mix di metano ed energia elettrica, l'edificio B presenta un consumo di gas esclusivo, poiché i fabbisogni elettrici risultano integralmente compensati dall'impianto fotovoltaico esistente.

Tabella 7.2 - Vettori energetici pre- e post-intervento.

Edificio	Stato	Gas Metano [Nm³/Anno]	Energia Elettrica [Kwh/Anno]
A	Pre	20460	26280
	Post	0	68221
B	Pre	63124	0
	Post	0	103378
C	Pre	19031	58570
	Post	15196	41608

A seguito degli interventi di riqualificazione, si osserva una trasformazione profonda del mix energetico, determinata dalla sostituzione dei sistemi di generazione tradizionali con tecnologie basate prevalentemente su pompe di calore elettriche. Come evidenziato dai dati riportati nella Tabella 7.3, questa transizione assume sfumature differenti a seconda delle specificità di ogni edificio:

- Per l'edificio A si registra il passaggio a un sistema completamente elettrico, con la totale eliminazione del prelievo di gas metano a fronte di un aumento del fabbisogno elettrico necessario a coprire i nuovi carichi termici e il servizio di raffrescamento.
- Analogamente, per l'edificio B si assiste a una completa elettrificazione dei consumi;

- Il caso dell'edificio C merita una riflessione distinta, in quanto la configurazione impiantistica ibrida adottata consente di ottenere un beneficio duale: si osserva infatti una contrazione del consumo di gas metano, che non viene eliminato a causa della presenza di una pompa di calore ibrida, ma drasticamente ridotto grazie all'efficienza del nuovo sistema, accompagnata da una simultanea diminuzione del prelievo di energia elettrica dalla rete, dovuta alla presenza del nuovo impianto solare. Tale risultato sottolinea l'efficacia di una strategia integrata capace di ottimizzare simultaneamente entrambi i vettori energetici.

In termini generali, questa tendenza verso il vettore elettrico si configura come un processo di elettrificazione dei fabbisogni coerente con gli obiettivi internazionali di decarbonizzazione. La riduzione del gas metano apporta benefici ambientali diretti legati alla mancata combustione in situ, aspetto di primaria importanza nei contesti industriali ad alta intensità energetica. In questo scenario, la presenza di impianti fotovoltaici a supporto diventa determinante per bilanciare i carichi elettrici, sfruttando le ampie superfici di copertura tipiche di tali complessi edilizi. Al fine di garantire coerenza con la successiva analisi economica, il risparmio energetico non è stato valutato mediante la conversione dei consumi in un'unica unità energetica, bensì mantenendo distinti i diversi vettori energetici impiegati. Tale approccio consente di rappresentare in maniera più accurata le variazioni dei consumi e di evidenziare il contributo specifico di ciascun vettore energetico.

7.2.2 Analisi Ambientale

L'analisi ambientale rappresenta il vertice qualitativo dell'intero processo di riqualificazione, traducendo il risparmio energetico in un beneficio tangibile per l'ecosistema attraverso la drastica contrazione dell'impronta di carbonio degli edifici industriali. Come evidenziato nella Figura 7.16, il passaggio dallo stato di fatto allo stato di progetto innesca un abbattimento delle emissioni annue di CO_2 in tutti i casi studio, segnando un punto di svolta nel percorso verso la neutralità climatica degli edifici analizzati.

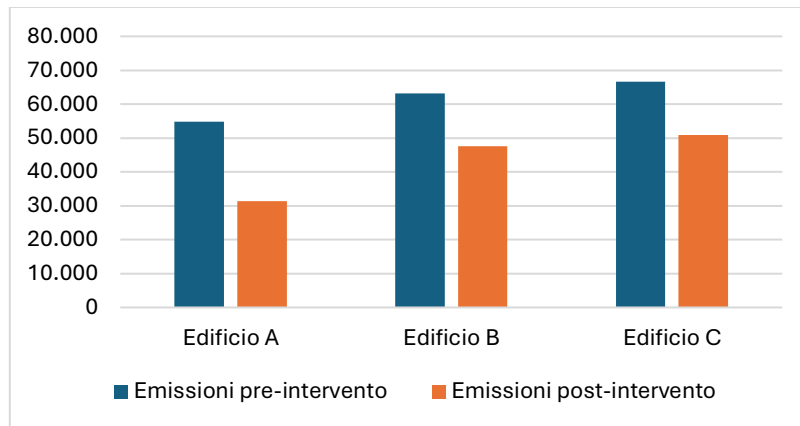


Figura 7.16 - Variazioni emissioni di CO_2 pre- e post-intervento [kg/anno].

Il punto centrale della trasformazione risiede nella strategia di decarbonizzazione dei sistemi di generazione:

- la completa dismissione delle caldaie a metano negli edifici A e B elimina alla radice le emissioni dirette in atmosfera, trasformando strutture storicamente dipendenti da fonti fossili in sistemi ad alta efficienza pronti per la transizione energetica.
- Anche nell'edificio C, la scelta di un sistema ibrido avanzato permette di marginalizzare il ruolo del gas naturale, riducendo le emissioni climalteranti a un livello minimo e tecnicamente ottimizzato.

Un ruolo di primo piano è giocato dal nuovo mix energetico, dove per gli edifici B e C il vettore elettrico risulta progressivamente sempre più pulito, sposandosi con l'energia prodotta in situ dagli impianti fotovoltaici. Questo circolo virtuoso permette di alimentare le pompe di calore con una quota rilevante di energia rinnovabile autoprodotta, minimizzando le emissioni indirette e massimizzando l'efficienza termodinamica globale.

In definitiva, i risultati ambientali dimostrano che la riqualificazione non è stata un semplice intervento di sostituzione impiantistica, ma una vera e propria operazione di rigenerazione ecologica. Ridurre le tonnellate di CO_2 immesse in atmosfera ogni anno significa, infatti, allineare il patrimonio industriale italiano agli standard europei attuali, trasformando edifici energivori in edifici sempre più sostenibili capaci di coniugare la produttività industriale con la salvaguardia dell'ambiente.

7.2.3 Analisi Economica

L'analisi economica degli interventi di riqualificazione è finalizzata a valutare la convenienza degli interventi in termini di ritorno dell'investimento. A tal fine, il risparmio energetico annuo viene tradotto in risparmio economico attraverso l'applicazione dei costi unitari dei vettori energetici, consentendo di quantificare il beneficio monetario ricorrente associato agli interventi. In termini generali, il risparmio economico è calcolato come:

$$R = [(E_{gas,pre} \cdot c_{gas}) + (E_{el,pre} \cdot c_{el})] - [(E_{gas,post} \cdot c_{gas}) + (E_{el,post} \cdot c_{el})] \quad (7.1)$$

Tale approccio consente di mantenere la coerenza con la formulazione generale, tenendo al contempo conto delle differenti condizioni di costo associate ai vettori energetici e delle trasformazioni impiantistiche introdotte. Come riferimento, sono stati presi in considerazione dei prezzi calcolati come media sull'anno 2025 per il metano e per l'energia elettrica, arrivando a dei valori pari a 1.10 €/Sm³ per il gas e 0.4 €/kWh per la corrente elettrica. Inoltre, per garantire l'omogeneità dei dati, i consumi espressi in Nm³ (riferiti alla temperatura di 0°C) sono stati convertiti in Sm³. Poiché questi ultimi identificano il volume del gas a 15°C, è stato applicato un coefficiente correttivo di 1.055; tale passaggio si rende necessario poiché, mantenendo costante la pressione atmosferica, l'espansione termica del gas ne aumenta il volume all'aumentare della temperatura.

Per l'edificio A si ha:

$$R(A) = [(20460 \cdot 1.055) \cdot 1.10 + (26280 \cdot 0.4)] - [(68221 \cdot 0.4)] = 6967 \frac{\text{€}}{\text{anno}} \quad (7.2)$$

Per l'edificio B si ha:

$$R(B) = [(63124 \cdot 1.055) \cdot 1.10] - [(103378 \cdot 0.4)] = 31904 \frac{\text{€}}{\text{anno}} \quad (7.3)$$

Per l'edificio C si ha:

$$R(C) = [(19031 \cdot 1.055) \cdot 1.10 + (58570 \cdot 0.4)] - [(15196 \cdot 1.055 \cdot 1.10) + (41608 \cdot 0.4)] = 11235 \frac{\text{€}}{\text{anno}} \quad (7.4)$$

Tuttavia, trattandosi di interventi con un determinato investimento iniziale, questi risparmi non basterebbe a ripagarli in tempi sostenibili; ecco che allora entra in gioco l'incentivo del Conto Termico 3.0. Per l'Edificio A e l'Edificio B, l'intervento prevede l'installazione di sistemi a pompa di calore elettrica del tipo VRF/VRV, mentre per l'Edificio C l'intervento riguarda un sistema bivalente composto da una pompa di calore aria-acqua e una caldaia a condensazione. Alla luce dei criteri di ammissibilità del Conto Termico 3.0, che per le imprese escludono l'incentivazione di sistemi ibridi comprendenti generatori a gas, l'incentivo è stato richiesto esclusivamente per la pompa di calore elettrica.

Per gli interventi sulle pompe di calore elettriche (art. 8, comma 1, a), l'incentivo è calcolato come:

$$Ia_{tot} = E_i \cdot C_i = [P_{rated} \cdot Q_{uf} \cdot \left(1 - \frac{1}{SCOP}\right) \cdot \frac{\eta_s}{\eta_{s,min Ecodesign}}] \cdot C_i \quad (7.5)$$

Per l'Edificio A, si ha una macchina principale da 28 kW (moltiplicata per 3 unità, per un totale di 84 kW) e una singola unità da 14 kW. Le macchine presentano un'efficienza stagionale $\eta_s\%$ rispettivamente del 178.7 % e del 193.9%, determinando un coefficiente correttivo di premialità k_p pari a 1.30 e 1.42. Essendo l'edificio situato in Zona Climatica E, il coefficiente di utilizzo Q_{uf} è pari a 1700 ore/anno. Il coefficiente di valorizzazione C_i differisce per le due taglie: 0.055 €/kWh_t per il sistema da 84 kW e 0,150 €/kWh_t per quello da 14 kW. L'incentivo totale risulta pari a 24027.65 €, con l'erogazione che avviene in 2 anni con un incentivo annuo pari di 12013.82 €.

Per l'Edificio B, l'intervento prevede un sistema VRF composto da 12 unità da 28 kW ciascuna, per una potenza termica complessiva di 336 kW. Le macchine scelte vantano prestazioni superiori ai minimi di legge, con un'efficienza stagionale $\eta_s\%$ del 146.60% (rispetto al 137% richiesto), il che determina un coefficiente correttivo di premialità k_p pari a 1.07. Essendo l'edificio situato in Zona Climatica E, il coefficiente di utilizzo Q_{uf} è pari a 1700 ore/anno. Il coefficiente di valorizzazione C_i è pari a 0.055 €/kWh_t. L'incentivo annuo risulta pertanto pari a 24628.80 € e con l'erogazione che avviene in 2 anni, si ottiene un incentivo totale pari a 49257.60 €.

Per l'edificio C, l'intervento prevede l'installazione di una pompa di calore aria/acqua a bassa temperatura, con una potenza termica pari a 81.60 kW. La macchina scelta presenta prestazioni superiori ai requisiti minimi normativi, con un'efficienza stagionale $\eta_s\%$ pari a 139.66% (rispetto al valore minimo richiesto del 125%), determinando un coefficiente correttivo di premialità k_p pari a 1.12. Essendo l'edificio situato in Zona Climatica E, il coefficiente di utilizzo Q_{uf} è pari a 1700 ore/anno. Considerata la taglia dell'impianto ($P_n > 35$ kW), il coefficiente di valorizzazione C_i è pari a 0.060 €/kWh_t. Sulla base di tali parametri, l'incentivo annuo risulta pari a 6694.49 €, per un totale complessivo di € 33472.43 € (su 5 anni).

In nessun caso, l'incentivo totale previsto per i suddetti interventi può superare la quota del 65% delle spese ammissibili.

Il calcolo del VAN avviene come nella seguente formula:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (7.6)$$

Dove n è il numero di anni su cui viene calcolato il VAN, e che per l'analisi è stato posto pari a 30 anni. Il tasso di attualizzazione o tasso di interesse dell'investimento, che per l'analisi è stato scelto pari al 3%. I flussi di cassa sono così individuati:

- i flussi di cassa in ingresso sono la somma dei guadagni ottenuti grazie al risparmio in bolletta e grazie al contributo del Conto Termico 3.0 (per l'edificio C è stato considerato anche il Fondo Energia in quanto il solo impianto fotovoltaico è stato incentivato secondo tale forma di incentivazione; esso corrisponderà ad un flusso in ingresso nell'anno zero, per poi corrispondere a delle rate da restituire sui primi 3 anni, diventando quindi un'uscita).
- le uscite sono legate all'investimento iniziale e ai costi di manutenzione (non avendo valori di riferimento sono state ipotizzate pari all'1% dell'investimento iniziale).

Tabella 7.3 - Voci economiche per i tre edifici.

Voce Economica	Edificio A	Edificio B	Edificio C
Investimento Iniziale (all'anno zero)	-52700 €	-120000 €	-167621 €
Incentivo CT 3.0 (I_{tot})	24027.65 €	49257.60 €	33472.43 €
Fondo Energia (Finanziamento ammesso)	-	-	153.270,00 €
Risparmio Energetico Annuo	6967 €	31904 €	11235 €
Costi Manutenzione e Gestione annui	-1581 €	-3730 €	-5028.63 €

Sulla base dei flussi di cassa annuali così determinati, è possibile rappresentare l'andamento cumulato dell'investimento nel tempo per i tre edifici.

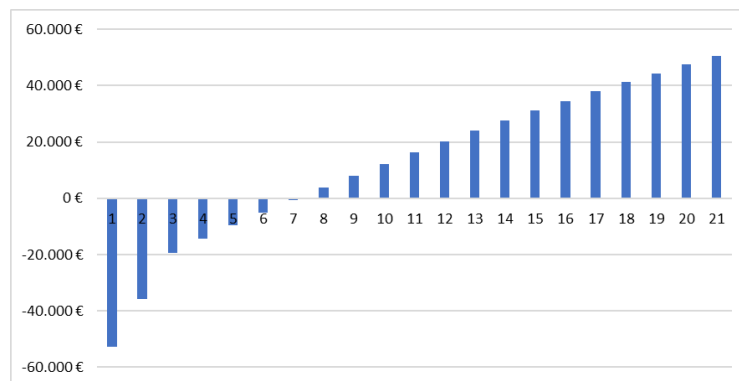


Figura 7.17 - VAN Edificio A.

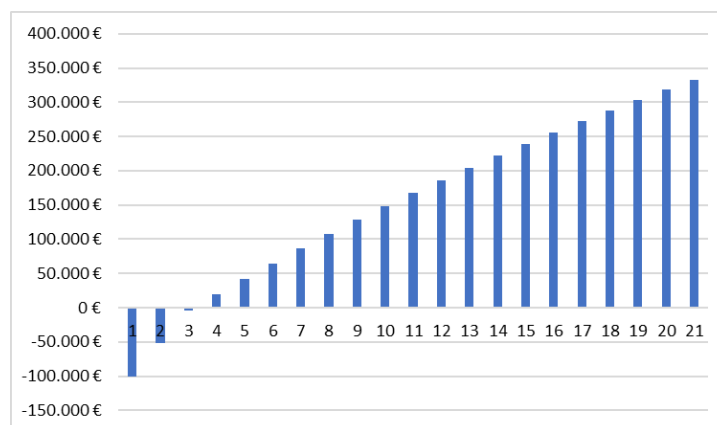


Figura 7.18 - VAN Edificio B.

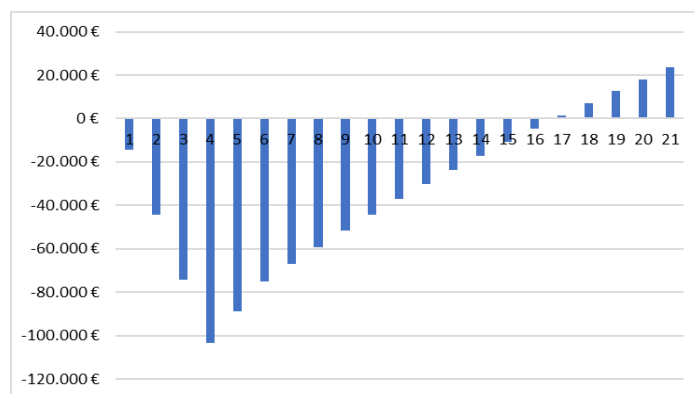


Figura 7.19 - VAN Edificio C.

L'analisi del VAN, illustrata nei diagrammi precedenti, rappresenta l'indicatore sintetico più efficace per validare la sostenibilità finanziaria degli interventi nel lungo periodo. Mentre l'analisi energetica ha dimostrato la fattibilità tecnica, le curve del VAN confermano che tale trasformazione non è solo un onere ambientale, ma un investimento capace di generare valore economico reale per l'impresa. Un'analisi di dettaglio rivela dinamiche specifiche per i tre casi studio:

- L'Edificio A presenta un rientro più equilibrato intorno al 7° anno; in questo caso, il risparmio generato dal vettore elettrico deve compensare non solo l'investimento, ma anche il carico energetico derivante dall'introduzione del servizio di raffrescamento estivo.
- L'Edificio B emerge come l'operazione finanziariamente più dinamica, raggiungendo il punto di pareggio intorno al 4° anno; nonostante l'elevato esborso iniziale, l'elettificazione totale tramite pompa di calore, operando su una struttura già dotata di impianto fotovoltaico, genera un risparmio operativo immediato.
- L'Edificio C, pur beneficiando del Fondo Energia che minimizza l'esposizione finanziaria iniziale, mostra la curva più piatta con un pareggio stimato intorno al 17° anno. Tale andamento è riconducibile alla natura del sistema ibrido, che garantisce una maggiore flessibilità, ma risparmi sui combustibili fossili meno drastici rispetto ad un sistema completamente elettrico puro, oltre a dover ammortizzare i costi del nuovo impianto fotovoltaico.

In conclusione, i diagrammi del VAN dimostrano che la riqualificazione energetica, se supportata da un corretto sistema di incentivazione e tecnologie adeguate, garantisce una redditività solida. Il valore finale del VAN al termine dell'orizzonte temporale considerato risulta ampiamente positivo in tutti i casi e inferiore alla vita utile degli impianti, a conferma del fatto che la decarbonizzazione del settore industriale non è solo una risposta necessaria alle stringenti normative europee, ma una scelta gestionale lungimirante capace di aumentare la competitività dell'asset aziendale nel tempo.

7.3 Confronto tra i casi studio e considerazioni strategiche

Il confronto tra i casi studio analizzati consente di costruire un quadro interpretativo utile alla definizione di criteri e linee guida per la riqualificazione energetica degli edifici industriali. In tale ambito, l'analisi è stata condotta assumendo come parametro centrale la trasmittanza media H'_t , espressa in W/m^2K , quale indicatore sintetico della qualità dell'involucro edilizio.

Dall'analisi emerge come H'_t incida sia sui consumi energetici sia sul potenziale di riduzione ottenibile attraverso gli interventi di riqualificazione. Il risparmio energetico percentuale è stato calcolato di seguito per i tre edifici, applicando un coefficiente correttivo di 10.69 per portare i Sm^3 in kWh:

– Edificio A:

$$\frac{((20460 \cdot 1.055 \cdot 10.69) + 26280) - 68221}{((20460 \cdot 1.055 \cdot 10.69) + 26280)} \cdot 100 \cong 70\% \quad (7.7)$$

– Edificio B:

$$\frac{(63124 \cdot 1.055 \cdot 10.69) - 103378}{(63124 \cdot 1.055 \cdot 10.69)} \cdot 100 \cong 85\% \quad (7.8)$$

– Edificio C:

$$\frac{((19031 \cdot 1.055 \cdot 10.69) + 58570) - ((15196 \cdot 1.055 \cdot 10.69) + 41608)}{((19031 \cdot 1.055 \cdot 10.69) + 58570)} \cdot 100 \cong 23\% \quad (7.9)$$

In Figura 7.20 viene riportata, per i tre edifici, la relazione tra il valore di H'_t e il risparmio energetico percentuale è riportata:

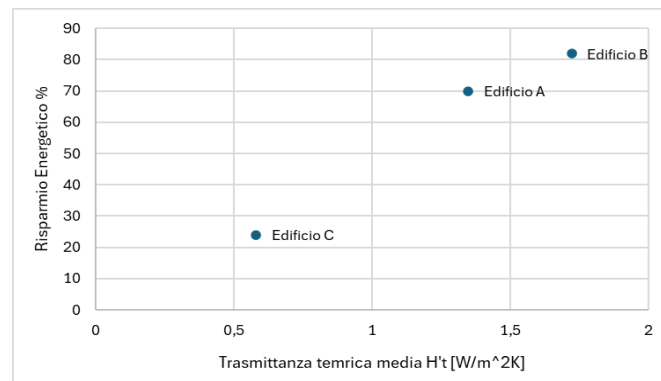


Figura 7.20 - Variazione del risparmio energetico percentuale rispetto al valore di H'_t .

Tale andamento evidenzia che gli edifici caratterizzati da valori più elevati di H'_t , ovvero l'Edificio A e l'edificio B presentano un maggiore margine di miglioramento, in quanto partono da condizioni energetiche iniziali fortemente penalizzanti. Tuttavia, tale risultato non deve essere interpretato come indicatore di una maggiore efficacia intrinseca degli interventi sugli edifici più disperdenti. Al contrario, esso riflette principalmente l'entità della trasformazione del sistema energetico edificio-impianto, che nei casi analizzati include la sostituzione dei sistemi tradizionali a gas con soluzioni elettriche ad alta efficienza e, nel caso dell'edificio B, l'integrazione di un impianto fotovoltaico. In questo senso, il risparmio percentuale rappresenta un indicatore relativo, fortemente influenzato dalle condizioni iniziali e dalla configurazione impiantistica adottata. In tale contesto, assume particolare rilevanza anche il passaggio tra differenti vettori energetici. Il sistema elettrico, infatti, consente l'impiego di pompe di calore caratterizzate da coefficienti di prestazione superiori all'unità; come evidenziato nella tabella riepilogativa dei rendimenti di generazione (Tabella 7.1), i valori di COP delle macchine installate nello stato di progetto risultano ampiamente maggiori di 1, non essendo essi limitati superiormente come i rendimenti di generazione delle caldaie; ciò implica che l'energia termica resa è superiore all'energia elettrica assorbita. In termini quantitativi, questo si traduce in un rendimento di generazione equivalente significativamente più elevato rispetto a quello dei sistemi a combustione, il cui valore è necessariamente inferiore all'unità. In tale quadro, si osserva quindi come l'Edificio C, è sì in una condizione più

favorevole, essendo caratterizzato da un valore di H'_t inferiore e quindi da un involucro meno disperdente, ma presenta un rendimento di generazione post-intervento più contenuto rispetto agli altri casi analizzati. Tale risultato è attribuibile alla presenza di un sistema ibrido, in cui la pompa di calore è affiancata da una caldaia, determinando una prestazione complessiva inferiore rispetto a sistemi completamente elettrici.

Alla luce di tali considerazioni, il parametro H'_t assume un ruolo centrale nella definizione delle strategie di intervento, in quanto consente di distinguere diverse condizioni operative e, conseguentemente, differenti approcci progettuali. Negli edifici caratterizzati da valori elevati di H'_t , tipici del patrimonio industriale esistente, la riqualificazione energetica non può essere perseguita esclusivamente attraverso interventi impiantistici, ma richiederebbe un approccio integrato che includa anche il miglioramento delle prestazioni dell'involucro. Difatti, nel caso di edifici caratterizzati da valori intermedi di H'_t , la possibilità di adottare strategie combinate, in cui interventi selettivi sull'involucro si affiancano all'ottimizzazione dei sistemi impiantistici, consentirebbe di raggiungere un equilibrio tra costi di investimento e benefici energetici. Infine, negli edifici con bassi valori di H'_t l'involucro risulta già sufficientemente performante da rendere particolarmente efficaci gli interventi di sostituzione degli impianti con sistemi integralmente elettrici.

A partire da questo elemento centrale, l'analisi evidenzia come la dimensione degli edifici rappresenti un ulteriore fattore determinante. L'aumento della scala comporta infatti una crescita significativa dei consumi energetici assoluti e, conseguentemente, del potenziale risparmio conseguibile. Tuttavia, tale incremento si accompagna a un aumento degli investimenti richiesti, con effetti non sempre favorevoli sugli indicatori economici. Nonostante ciò, la grande dimensione costituisce al contempo una rilevante opportunità, in quanto consente l'integrazione di sistemi di produzione da fonte rinnovabile su larga scala. In particolare, la presenza di impianti fotovoltaici emerge come uno degli elementi più influenti nel determinare le prestazioni complessive degli interventi. L'autoproduzione di energia elettrica consente infatti di compensare una quota significativa dei consumi introdotti dall'elettrificazione,

riducendo il fabbisogno di energia primaria e migliorando la sostenibilità economica degli interventi. Questo aspetto assume un ruolo strategico nel settore industriale, dove le ampie superfici di copertura rendono possibile l'installazione di impianti di grande taglia. Dal punto di vista ambientale, l'analisi conferma che la decarbonizzazione del settore industriale non può essere perseguita esclusivamente attraverso l'elettificazione dei consumi, ma richiede una contestuale integrazione di fonti rinnovabili. In assenza di autoproduzione, infatti, il passaggio a sistemi elettrici può comportare una semplice delocalizzazione delle emissioni, mentre la combinazione tra riduzione delle dispersioni, elettificazione e produzione rinnovabile consente di ottenere i risultati più significativi in termini di riduzione delle emissioni climalteranti.

Le evidenze emerse sono sintetizzate nella Tabella 7.4, che mette in relazione i principali parametri decisionali con le strategie di intervento più appropriate, configurandosi come uno strumento di supporto alle decisioni progettuali.

Tabella 7.4 - Riassunto linee guida.

Parametro	Condizione	Strategia Di Intervento
H'_t elevato (e.g., > 1 W/m^2K)	Involucro disperdente	Priorità a interventi sull'involucro + retrofit impiantistico
H'_t basso (e.g., ≤ 1 W/m^2K)	Involucro efficiente	Retrofit degli impianti
Grande dimensione (e.g., superficie disperdente > 1000 m^2)	Elevati consumi assoluti	Integrazione con FV e ottimizzazione economica
Presenza di FV	Autoproduzione	Sistema integralmente elettrico
Assenza di FV	Dipendenza dalla rete	Valutazione di sistemi ibridi

7.4 *Analisi di sensibilità e SWOT*

I risultati ottenuti evidenziano come la riqualificazione energetica degli edifici industriali possa generare benefici rilevanti in termini di riduzione dei consumi, delle emissioni e dei costi operativi. Tuttavia, tali risultati risultano strettamente dipendenti dalle ipotesi adottate nella modellazione energetica ed economica, rendendo necessario un approfondimento volto a valutare la robustezza delle conclusioni attraverso un'analisi di sensibilità e una successiva interpretazione strategica. L'analisi di sensibilità consente di valutare la variazione degli indicatori economici ed energetici al modificarsi dei principali parametri di input. Tra queste assumono un ruolo centrale il costo dei vettori energetici e il livello di incentivazione. In questo contesto, il meccanismo del Conto Termico 3.0 emerge come uno degli elementi più rilevanti nel determinare la sostenibilità economica degli interventi. L'incentivo, erogato nei primi anni successivi alla realizzazione, consente di ridurre l'investimento netto e di anticipare i flussi di cassa positivi, migliorando in modo significativo il tempo di ritorno dell'investimento. Il confronto tra scenari con e senza incentivo evidenzia come la sua assenza possa aumentare sensibilmente il tempo di ritorno dell'investimento (come mostrato in Figura 7.21 per l'edificio A, Figura 7.22 per l'edificio B e Figura 7.23 per l'edificio C).

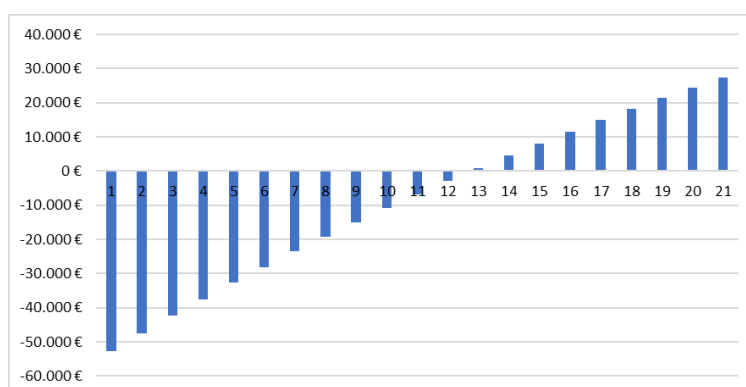


Figura 7.21 -VAN Edificio A (senza Conto Termico 3.0).

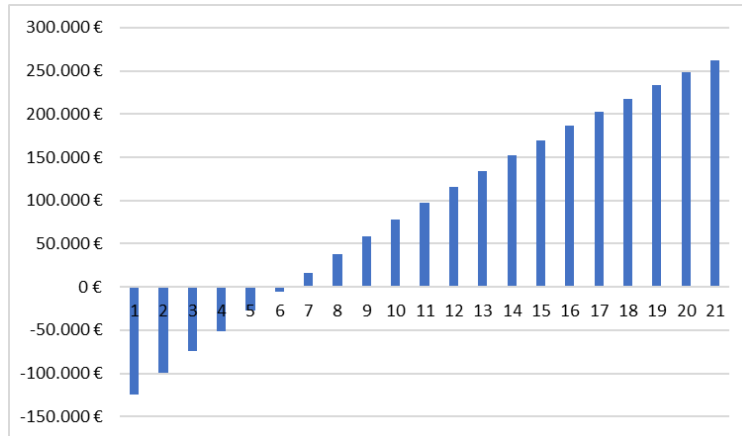


Figura 7.22 - VAN Edificio B (senza Conto Termico 3.0).

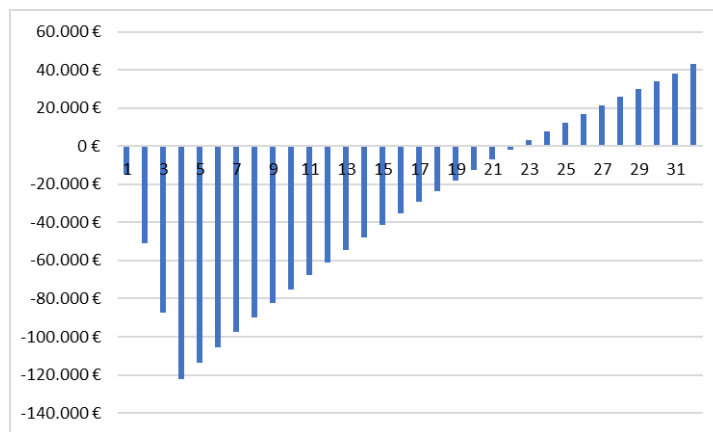


Figura 7.23 - VAN Edificio C (senza Conto Termico 3.0).

Accanto al tema degli incentivi, l'analisi mette in evidenza l'elevata sensibilità dei risultati rispetto al costo dell'energia. Il risparmio economico annuo risulta infatti direttamente proporzionale al prezzo dei vettori energetici, rendendo gli interventi particolarmente influenzati dalla volatilità dei mercati; in scenari caratterizzati da elevati costi dei combustibili fossili, le soluzioni basate sul passaggio a configurazioni integralmente elettriche risultano maggiormente vantaggiose; viceversa, un incremento del costo dell'energia elettrica può ridurre la convenienza delle pompe di calore, soprattutto in assenza di autoproduzione da fonte rinnovabile.

L'integrazione dell'analisi di sensibilità con una valutazione strategica consente di interpretare i risultati in una prospettiva più ampia, attraverso l'individuazione dei principali fattori interni ed esterni che influenzano la fattibilità degli interventi. In questo contesto, i punti di forza sono rappresentati dalla significativa riduzione dei

delle emissioni di CO_2 nonché dal miglioramento dell'efficienza complessiva del sistema edificio-impianto. Tra le principali criticità emergono invece gli elevati costi iniziali e la dipendenza dalle condizioni di mercato, in particolare dal prezzo dell'energia elettrica. Le opportunità sono costituite dalla disponibilità di strumenti di incentivazione e dalla crescente diffusione delle tecnologie rinnovabili, che consentono di migliorare la sostenibilità economica e ambientale degli interventi. Al contrario, le principali minacce sono rappresentate dalla volatilità dei prezzi energetici, dall'incertezza normativa sempre in aggiornamento e dal rischio di una non corretta integrazione tra impianti e caratteristiche dell'edificio.

8 Conclusioni e prospettive future

Le analisi condotte nel presente lavoro di tesi hanno permesso di costruire una lettura integrata della riqualificazione energetica degli edifici industriali, evidenziando come le prestazioni conseguibili non dipendano da singoli interventi isolati, ma dall'interazione tra caratteristiche dell'involucro, configurazione impiantistica e modalità di approvvigionamento energetico. In tale quadro, la trasmittanza media H'_t si configura come parametro chiave per interpretare il comportamento energetico degli edifici, in quanto esprime in forma sintetica il livello delle dispersioni e, conseguentemente, il fabbisogno termico strutturale. Le analisi evidenziano come le differenze tra i casi studio siano riconducibili in larga parte proprio a tale parametro: edifici caratterizzati da valori elevati di H'_t presentano condizioni iniziali più energivore e quindi margini di miglioramento più ampi, con risparmi percentuali dei consumi che raggiungono valori fino all'85%, come nel caso dell'edificio B, e pari al 70% per l'edificio A. Al contrario, edifici con involucro più performante evidenziano riduzioni più contenute, come nel caso dell'edificio C, in cui il risparmio si attesta intorno al 23%, ma raggiungono comunque livelli prestazionali finali più elevati e stabili. Questa lettura consente di superare un'interpretazione puramente quantitativa dei risultati, distinguendo tra entità del risparmio e qualità della prestazione raggiunta.

Da queste evidenze derivano implicazioni dirette per il processo decisionale: i risultati mostrano come, anche in assenza di interventi sull'involucro, la riqualificazione impiantistica possa portare a riduzioni molto significative dei consumi, soprattutto negli edifici più energivori. Tuttavia, il livello delle dispersioni dell'involucro continua a influenzare in modo determinante l'efficacia complessiva degli interventi, limitando o amplificando i benefici ottenibili. Al contrario, quando l'involucro presenta caratteristiche già adeguate, il focus può essere efficacemente posto sull'ottimizzazione impiantistica, che nei casi analizzati ha comunque consentito di ottenere risparmi percentuali più contenuti, ma significativi, dell'ordine del 20-30%. L'integrazione di impianti fotovoltaici ha inoltre contribuito in modo rilevante alla riduzione dei consumi di energia primaria non rinnovabile, grazie alla copertura di una quota significativa dei fabbisogni elettrici; questo aspetto risulta particolarmente

rilevante nel settore industriale, dove la disponibilità di ampie superfici consente di massimizzare i benefici dell'autoproduzione.

Le scelte impiantistiche devono quindi essere formulate in relazione alle caratteristiche specifiche dell'edificio, evitando soluzioni generalizzate. I risultati evidenziano come le configurazioni integralmente elettriche siano particolarmente efficaci in contesti favorevoli, mentre soluzioni ibride possono offrire maggiore flessibilità in presenza di fabbisogni termici elevati o condizioni operative variabili. Tale flessibilità risulta particolarmente rilevante nel settore industriale, dove i profili di utilizzo possono essere discontinui e fortemente dipendenti dai processi produttivi.

Dal punto di vista economico, la sostenibilità degli interventi risulta strettamente legata a variabili esterne, quali il costo dell'energia e la disponibilità di meccanismi incentivanti. In tale contesto, il Conto Termico 3.0 si configura come uno strumento in grado di incidere significativamente sulla fattibilità degli interventi, riducendo il carico finanziario iniziale e migliorando gli indicatori di redditività. I risultati mostrano, in particolare, come la convenienza degli interventi, espressa in termini di VAN, sia fortemente influenzata dalla presenza di incentivi, in quanto il Conto Termico 3.0 consente di anticipare il raggiungimento del VAN positivo mediamente di circa 4-5 anni e di incrementare in modo significativo la redditività degli investimenti. Tuttavia, la dipendenza da fattori esogeni introduce un livello di incertezza che rende necessario adottare approcci basati su scenari e analisi di sensibilità, al fine di valutare la robustezza delle soluzioni individuate. Accanto alla dimensione economica, assumono crescente rilievo le implicazioni ambientali, in particolare in relazione agli obiettivi di decarbonizzazione a livello nazionale ed europeo. In tale contesto, gli interventi hanno determinato una riduzione delle emissioni climalteranti compresa tra circa il 25% e il 40%, con risultati fortemente influenzati dalle condizioni iniziali del sistema edificio-impianto.

Pur nella coerenza dei risultati ottenuti, è necessario riconoscere alcuni limiti dell'approccio adottato. Il numero di casi studio analizzati, sebbene significativo, non esaurisce la varietà del patrimonio industriale esistente, che presenta condizioni estremamente eterogenee. Inoltre, le simulazioni si basano su ipotesi semplificate che

non sempre riescono a cogliere la complessità delle condizioni operative reali, in particolare per quanto riguarda i profili di utilizzo e le prestazioni effettive degli impianti. A ciò si aggiunge l'incertezza legata all'evoluzione dei mercati energetici e del quadro normativo, che può influenzare in modo rilevante la convenienza degli interventi nel medio-lungo periodo. Alla luce di tali considerazioni, gli sviluppi futuri della ricerca potrebbero orientarsi verso un ampliamento del campione analizzato e verso l'integrazione di modelli in grado di descrivere in modo dinamico il comportamento del sistema edificio-impianto. Ulteriori approfondimenti potrebbero riguardare, inoltre, l'estensione dell'analisi a indicatori ambientali basati sul ciclo di vita, al fine di fornire una valutazione più completa degli impatti degli interventi.

Nel complesso, il lavoro evidenzia come la riqualificazione energetica degli edifici industriali richieda un approccio sistemico, in cui le scelte progettuali siano guidate da una comprensione approfondita delle relazioni tra le variabili in gioco. In tale contesto, il parametro H'_t si conferma uno strumento utile per interpretare le condizioni di partenza e orientare le decisioni verso soluzioni coerenti con le esigenze energetiche, economiche e ambientali del settore.

Sitografia

[s1] «www.enea.it - "Glossario efficienza energetica"» [Online]. Available: <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica.html> [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s2] «Eurostat (2025), Energy statistics – an overview» [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/global-trends> [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s3] «Eurostat (2023), Energy statistics – an overview» [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview&action=statexpress&lang=it#Consumo_di_energia_finale [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s4] «EEA (2023), Italy – Europe’s environment 2025» [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/countries/italy> [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s5] C. Europea, «Energy Performance of Buildings Directive» [Online]. Available: https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_it [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s6] «Agenzia per la Coesione Territoriale - "L'Agenda 2030 delle Nazioni Unite per lo sviluppo sostenibile"» [Online]. Available: <https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/?lang=en> [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s7] UNFCCC, «The Paris Agreement» [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s8] EUR-LEX, «European Green Deal» [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640> [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s9] C. Europea, «Renovation Wave» [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/renovation-wave_en [Consultato il giorno dicembre 2025].

[s10] ENEA, «Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica 2024» [Online]. Available: <https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni/raee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica/rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica-2024.html> [Consultato il giorno dicembre 2025].

Bibliografia

- [1] «. B. 1. WCED. [Online].
- [2] «Piano Nazionale per l'Energia e il Clima (PNIEC)».
- [3] «Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia».
- [4] «DIRETTIVA 2010/31/UE Del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)».
- [5] «DIRETTIVA 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 25 ottobre 2012, sull'efficienza energetica».
- [6] «DIRETTIVA (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018.».
- [7] «DIRETTIVA (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 13 settembre 2023, sull'efficienza energetica».
- [8] «DIRETTIVA (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)».
- [9] «Decreto legislativo 192/2005, 2005».
- [10] «Decreto legislativo 311/2006, 2006».
- [11] «D.P.R 59/2009, 2009».
- [12] «D.M. 26 giugno 2009».
- [13] «Decreto legislativo 115/2008, 2008».
- [14] «Decreto legislativo 102/2014, 2014».
- [15] «Decreto legge 63/2013 - Legge 90/2013».
- [16] «D.M. 25 giugno 2015 - Requisiti Minimi, 2015».
- [17] «Decreto legislativo 48/2020, 2020».
- [18] «Decreto legge 76/2020 - Legge 120/2020».
- [19] «DGR 1261/2022».

- [20] «UNI/TS 11300-1: 2014, Prestazioni energetiche degli edifici - “Determinazione del fabbisogno di energia dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale” .».
- [21] «UNI/TS 11300-2: 2014, Prestazioni energetiche degli edifici - “Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione in ed».
- [22] «UNI/TS 11300-3: 2010, “Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva” .».
- [23] «UNI/TS 11300-4: 2012, “Prestazioni energetiche degli edifici - Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per il riscaldamento di ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria” .».
- [24] «UNI/TS 11300-5:2016, “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili” .».
- [25] «UNI/TS 11300-6:2016, “Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili” .».
- [26] «UNI 10349-1:2016, “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per».
- [27] «UNI/TR 10349-2:2016, “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto” ;».
- [28] « UNI 10349-3:2016, “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici” .».
- [29] M. D. E. D. S. ENERGETICA, «DECRETO 7 agosto 2025,2025».
- [30] G. d. S. E. (GSE), «REGOLE APPLICATIVE DEL D.M. 7 AGOSTO 2025 (Conto Termico 3.0), 2025».
- [31] «UNI CEI EN ISO 50001:2018: “Sistemi di gestione dell’energia - Requisiti e linee guida per l’uso” ;».
- [32] M. D. E. D. S. ENERGETICA, «ALLEGATI D.M. 7 Agosto 2025,2025».

