



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



## Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di modelli di simulazione per il calcolo dei consumi in condizioni standard (asset rating) e adattate all'utenza (tailored rating)

D. Palladino, C. Lavinia, F. Margiotta, F. Pagliaro

## DEFINIZIONE DI MODELLI DI SIMULAZIONE PER IL CALCOLO DEI CONSUMI IN CONDIZIONI STANDARD (ASSET RATING) E ADATTATE ALL'UTENZA (TAILORED RATING)

D. Palladino, C. Lavinia, F. Margiotta, F. Pagliaro (ENEA)

Con il contributo di: L. Colasuonno, V. Del Fatto, R. Guida, N. Labia

Aprile 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.16 - Definizione di modelli di simulazione per il calcolo dei consumi in condizioni standard (asset rating) e adattate all'utenza (tailored rating)*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro

## Indice

INDICE DELLE TABELLE .....	5
INDICE DELLE FIGURE.....	9
SOMMARIO.....	13
SUMMARY.....	14
1 INTRODUZIONE .....	15
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	17
2.1 SINTESI DEGLI OBIETTIVI E DEI RISULTATI OTTENUTI NELLA PRIMA ANNUALITÀ DI RICERCA .....	18
2.2 OBIETTIVI E PROGRAMMAZIONE DELLA SECONDA ANNUALITÀ .....	20
2.3 INDICATORI E BENCHMARK IN AMBITO ENERGETICO .....	23
2.3.1 <i>Stato dell'arte: excursus normativo</i> .....	23
2.3.2 <i>Stato dell'arte: Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale</i> .....	25
2.3.3 <i>Livelli di disaggregazione degli indicatori</i> .....	28
2.3.4 <i>Applicativi ENEA</i> .....	33
2.3.5 <i>Estensione dell'applicativo ENEA</i> .....	37
2.3.6 <i>Progetto ExcEED</i> .....	38
2.3.7 <i>Criticità e considerazioni finali sui indicatori e benchmark</i> .....	40
2.4 DEFINIZIONE DEI CASI STUDIO .....	43
2.4.1 <i>Condizioni climatiche e località di simulazione</i> .....	43
2.4.2 <i>Caratteristiche geometriche e dimensionali</i> .....	46
2.4.3 <i>Caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio</i> .....	56
2.4.3.1 Componenti opache .....	56
2.4.3.2 Componenti trasparenti .....	60
2.4.3.3 Semplificazioni adottate per l'analisi parametrica .....	61
2.4.4 <i>Servizi energetici e configurazione impiantistica</i> .....	65
2.4.5 <i>Caratterizzazione dei profili di utilizzo</i> .....	68
2.4.5.1 Produzione di acqua calda sanitaria .....	68
2.4.5.2 Edifici residenziali: riscaldamento e raffrescamento .....	69
2.4.5.3 Edifici non residenziali: riscaldamento e raffrescamento .....	76
2.4.6 <i>Combinazioni di calcolo dell'analisi parametrica</i> .....	78
2.5 ANALISI DELLE SIMULAZIONI ENERGETICHE.....	81
2.5.1 <i>Produzione acqua calda sanitaria</i> .....	81
2.5.1.1 Produzione acqua calda sanitaria: boiler elettrico .....	82
2.5.1.2 Produzione acqua calda sanitaria: generatore a combustione monostadio.....	85
2.5.1.3 Produzione acqua calda sanitaria: generatore a combustione multistadio.....	88
2.5.1.4 Produzione acqua calda sanitaria: generatore a combustione modulante .....	90
2.5.1.5 Produzione acqua calda sanitaria con generatore a condensazione .....	92
2.5.1.6 Produzione acqua calda sanitaria con pompa di calore.....	94
2.5.1.7 Produzione acqua calda sanitaria con solare termico .....	96
2.5.2 <i>Riscaldamento</i> .....	102
2.5.2.1 Categoria E.1 e impianto autonomo con generatore di calore a combustione di tipo standard .....	105
2.5.2.1.1 Livello di isolamento Liv-Iso-0 .....	106
2.5.2.1.2 Livello di isolamento Liv-Iso-1 .....	115
2.5.2.1.3 Livello di isolamento Liv-Iso-2 .....	120
2.5.2.1.1 Livello di isolamento Liv-Iso-3 .....	124
2.5.2.2 Correlazione tra generatori di calore a combustione .....	127
2.5.2.2.1 Livello di isolamento Liv-Iso-0 .....	127
2.5.2.2.2 Livello di isolamento Liv-Iso-1 .....	133
2.5.2.2.3 Livello di isolamento Liv-Iso-2 .....	134
2.5.2.2.4 Livello di isolamento Liv-Iso-3 .....	135
2.5.2.3 Categoria E.1 e impianto autonomo con generatore di calore a condensazione .....	137
2.5.2.3.1 Generatore a condensazione ad alta temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-0.....	137
2.5.2.3.2 Generatori a condensazione a bassa temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-2 .....	141

2.5.2.3.3	Generatori a condensazione a bassa temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-3 .....	144
2.5.2.4	Categoria E.1 e generatori di calore a pompa di calore .....	147
2.5.2.4.1	Livello di isolamento Liv-Iso-2 .....	147
2.5.2.4.2	Livello di isolamento Liv-Iso-3 .....	152
2.5.2.5	Correlazione tra impianti autonomi e centralizzati .....	156
2.5.2.6	Correlazione tra le diverse categorie di destinazione d'uso .....	160
2.5.3	<b>Raffrescamento</b> .....	162
2.5.3.1	Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-0 .....	165
2.5.3.2	Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-1 .....	168
2.5.3.3	Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-2 .....	171
2.5.3.4	Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-3 .....	174
2.5.3.5	Correlazione tra le diverse categorie di destinazione d'uso .....	177
2.5.4	<b>Contributo dell'impianto Fotovoltaico</b> .....	179
2.6	DEFINIZIONE DI BENCHMARK .....	180
2.6.1	<b>Produzione acqua calda sanitaria</b> .....	180
2.6.1.1	Energia primaria .....	181
2.6.1.2	Vettore energetico .....	183
2.6.1.3	Spesa media annua .....	185
2.6.2	<b>Riscaldamento</b> .....	187
2.6.2.1	Energia primaria .....	188
2.6.2.2	Vettore energetico .....	191
2.6.2.3	Spesa media annua .....	194
2.6.3	<b>Raffrescamento</b> .....	197
2.6.3.1	Energia primaria .....	198
2.6.3.2	Vettore energetico .....	199
2.6.3.3	Spesa media annua .....	201
2.7	RISULTATI .....	203
3	CONCLUSIONI .....	214
4	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	216
5	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....	220

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Reportistica di Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale (RdS) sugli indicatori di prestazione energetica in funzione della destinazione d’uso, indagata nel presente lavoro. ....	25
Tabella 2 – SafeSchool 4.0: classi di merito per il riscaldamento e per l’energia elettrica. ....	33
Tabella 3 – Condomini+ 4.0: classi di merito per il riscaldamento e per l’energia elettrica. ....	34
Tabella 4 – SafeSchool 4.0: formulazioni matematiche degli indicatori di prestazione energetica normalizzati per il riscaldamento e l’energia elettrica. ....	34
Tabella 5 – Condomini+ 4.0: formulazioni matematiche degli indicatori di prestazione energetica normalizzati per il riscaldamento e l’energia elettrica. ....	34
Tabella 6 – SafeSchool 4.0: fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell’edificio ((Fe) in funzione del valore assunto dal rapporto di forma dell’edificio. ....	35
Tabella 7 – SafeSchool 4.0 e Condomini+ 4.0: fattore di normalizzazione legato al regime di funzionamento dell’impianto termico/elettrico (ore di accensione giornaliera).....	36
Tabella 8 – Condomini + 4.0: fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell’edificio (Fe).....	36
Tabella 9 – Condomini + 4.0: fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell’impianto termico (mesi di attivazione annuali). ....	36
Tabella 10 – Condomini +4.0: fattore correttivo relativo alle condizioni di temperatura interna dell’ambiente ..... 37	37
Tabella 11 – Condomini+4.0: fattore correttivo connesso alla presenza di utenze speciali.....	37
Tabella 12 – Fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell’impianto di raffrescamento (mesi di attivazione annuali). ....	37
Tabella 13 – fattore correttivo relativo alle condizioni di temperatura interna dell’ambiente ..... 38	38
Tabella 14 – Indicatori di Prestazione Energetica KPI del progetto ExcEED: riscaldamento e raffrescamento. ....	39
Tabella 15 – Indicatori di Prestazione Energetica KPI del progetto ExcEED: energia elettrica e altri campi di applicazione. ....	39
Tabella 16 – Sintesi degli indicatori di prestazione energetica in funzione della forma di energia valutata.....	40
Tabella 17 – Sintesi degli indicatori di prestazione energetica in funzione del servizio energetico erogato (riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria). ....	41
Tabella 18 – Sintesi degli indicatori di prestazione energetica in funzione del servizio energetico erogato (raffrescamento, illuminazione, ventilazione e apparecchiature). ....	42
Tabella 19 – Principali parametri climatici dei venticinque Comuni prescelti. ....	44
Tabella 20 – Definizione della tipologia edilizia dei casi studio e della rispettiva nomenclatura. ....	47
Tabella 21 – Caratteristiche dimensionali dei casi studio di riferimento.....	47
Tabella 22 – Caratteristiche dimensionali dei moduli standard delle finestre adottate. ....	47
Tabella 23 – Caratteristiche del caso studio E1.i.U.....	48
Tabella 24 – Caratteristiche dei casi studio E1.t.PT, E1.t.PI e E1.t.PU. ....	50
Tabella 25 – Caratteristiche dimensionali dei casi studio E2.t.PT, E2.t.PI e E2.t.PU. ....	53
Tabella 26 – Caratteristiche dimensionali dei casi studio E5.t.PT.....	55
Tabella 27 – Tipologie costruttive selezionate in [1] per le diverse componenti opache. ....	57
Tabella 28 – Livelli di isolamento selezionati in [1] per le componenti opache. ....	57
Tabella 29 – Codice identificativo dei quattro livelli di isolamento adottati per le componenti opache.....	60
Tabella 30 – Tipologie di infisso selezionate in [1]. ....	61
Tabella 31 – Ponti termici considerati per l’analisi preliminari e valutati con analisi FEM.....	62
Tabella 32 – Incidenza percentuale dei ponti termici analizzati al variare del livello di isolamento delle componenti opache. ....	63
Tabella 33 – Percentuale di influenza sulle dispersioni dei ponti termici considerata ai fini dell’analisi parametrica.....	65
Tabella 34 – Configurazioni adottate per i sottosistemi impiantistici di emissione, regolazione e distribuzione per i servizi energetici selezionati. ....	66
Tabella 35 – Caratteristiche tecniche dei generatori di calore di tipo autonomo. ....	67
Tabella 36 – Caratteristiche tecniche della pompa di calore idronica.....	67
Tabella 37 – Caratteristiche tecniche della macchina frigorifera aria-aria. ....	67
Tabella 38 – Consumo medio di acqua per usi sanitari per apparecchio. ....	69
Tabella 39 – Profili di utilizzo per il consumo di acqua calda sanitaria per edifici residenziali.....	69
Tabella 40 – Accorpamenti dei dati ISTAT per la valutazione dei profili di utilizzo. ....	70

Tabella 41 – Esempio di costruzione della matrice delle ore di accensione di un impianto autonomo per fascia oraria, tipologia edilizia, epoca di costruzione e zona climatica. ....	75
Tabella 42 – Esempio di calcolo del valore medio dell’orario di accensione dell’impianto autonomo per un appartamento posto ad un piano intermedio e realizzato tra il 1970-1980 nelle zone climatiche C, D ed E. ....	75
Tabella 43 – Media e Moda delle ore di accensione dell’impianto a partire dal campione di dati ISTAT per edifici di categoria E.1 .....	75
Tabella 44 – Profili di utilizzo per il riscaldamento e il raffrescamento per edifici di categoria E.1 .....	76
Tabella 45 – Orari di apertura più frequenti per alcune tipologie di edifici non residenziali dal lunedì al venerdì.....	77
Tabella 46 – Profili di utilizzo per il riscaldamento e il raffrescamento per edifici di categoria E.2 e E.5.....	78
Tabella 47 – Definizione delle oltre 15000 combinazione per il caso studio E1.i.U.1. ....	79
Tabella 48 – Combinazione impiantistica per il servizio riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria (tipologia impiantistica autonoma: BE: boiler elettrico, GC1: generatore monostadio, GC2: generatore multistadio, GC3: generatore modulante, GC4-AT: generatore a condensazione operante ad alta temperatura, GC4-BT: generatore a condensazione operante a bassa temperatura, PdC: pompa di calore, ST: solare Termico). ....	80
Tabella 49 – Raggruppamento dei dati adottato nelle analisi sui consumi di acqua calda sanitaria sulla base della superficie utile del singolo caso studio.....	81
Tabella 50 – Codice identificativo dei casi studio in base al numero di pannelli del solare termico.....	97
Tabella 51 – Parametro climatico di riferimento, fattore di correzione $F_{ST}$ e producibilità media mensile pesata del solare termico.....	102
Tabella 52 – Caratteristiche dei casi studio E1.t.PT, E1.t.PI e E1.t.PU. ....	105
Tabella 53 – Coefficienti a e b per le due tipologie costruttive e in funzione del valore ricercato. ....	111
Tabella 54 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura ( $E_M$ ) con livello di isolamento Liv-Iso-0.....	113
Tabella 55 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in cemento armato ( $E_{CA}$ ) con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	114
Tabella 56 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie delle equazioni trovate (Eq. $E_M$ e Eq. $E_{CA}$ ). ....	115
Tabella 57 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	119
Tabella 58 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.....	119
Tabella 59 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie di equazioni trovate (Eq. $E_M$ e Eq. $E_{CA}$ ): confronto tra edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	120
Tabella 60 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	122
Tabella 61 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.....	122
Tabella 62 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie di equazioni trovate (Eq. $E_M$ e Eq. $E_{CA}$ ): confronto tra edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	123
Tabella 63 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	125
Tabella 64 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici di nuova costruzione caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	126
Tabella 65 – Errore relativo (espresso in percentuale) restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	132
Tabella 66 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	133
Tabella 67 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	134
Tabella 68 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per il caso di un generatore a condensazione operante a bassa temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-2.....	135
Tabella 69 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	136
Tabella 70 - Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per il caso di un generatore a condensazione operante a bassa temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-3.....	137
Tabella 71 – Coefficienti a e b in funzione della tipologia costruttiva e del valore ricercato.....	139

Tabella 72 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura ( $E_M$ ) con livello di isolamento Liv-Iso-0.....	139
Tabella 73 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in cemento armato ( $E_{CA}$ ) con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	140
Tabella 74 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie delle equazioni trovate (Eq. $E_M$ e Eq. $E_{CA}$ ) per generatori di calore a condensazione operanti ad alta temperatura ( $E_M$ e $E_{CA}$ ).....	141
Tabella 75 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	142
Tabella 76 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici con livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	143
Tabella 77 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	145
Tabella 78 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: coefficienti per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	146
Tabella 79 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	150
Tabella 80 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.....	151
Tabella 81 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	155
Tabella 82 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: coefficienti per : edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	155
Tabella 83 – Errore relativo restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici con impianto centralizzato. ....	160
Tabella 84 – Errore relativo restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.2. ....	161
Tabella 85 – Errore relativo restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.5. ....	162
Tabella 86 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	167
Tabella 87 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.....	167
Tabella 88 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.....	168
Tabella 89 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	169
Tabella 90 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.....	170
Tabella 91 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.....	171
Tabella 92 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	172
Tabella 93 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.....	173
Tabella 94 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.....	174
Tabella 95 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.....	175
Tabella 96 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.....	176
Tabella 97 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.....	177
Tabella 98 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.2. ....	178
Tabella 99 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.5. ....	179
Tabella 100 – Potere calorifico e costo medio dei vettori energetici considerati. ....	181
Tabella 101 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria: energia primaria totale.....	182
Tabella 102 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria integrata con uno o due pannelli di solare termico (ST-1 e ST-2) per la categoria E.1: energia primaria totale. ....	183
Tabella 103 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria: vettore energetico.....	184
Tabella 104 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria integrata con uno o due pannelli di solare termico per la categoria E.1: vettore energetico. ....	185
Tabella 105 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria: spesa media annua (€). ....	186
Tabella 106 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria integrata con uno o due pannelli di solare termico per la categoria E.1: spesa media annua (€). ....	187
Tabella 107 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-0: energia primaria.....	189
Tabella 108 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-1: energia primaria.....	189

Tabella 109 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-2: energia primaria.....	190
Tabella 110 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-3: energia primaria.....	191
Tabella 111 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-0: vettore energetico.....	192
Tabella 112 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-1: vettore energetico.....	192
Tabella 113 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-2: vettore energetico.....	193
Tabella 114 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-3: vettore energetico.....	194
Tabella 115 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-0: spesa media annua.....	195
Tabella 116 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-1: spesa media annua.....	195
Tabella 117 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-2: spesa media annua.....	196
Tabella 118 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-3: spesa media annua.....	197
Tabella 119 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-0: energia primaria non rinnovabile.....	199
Tabella 120 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-1: energia primaria non rinnovabile.....	199
Tabella 121 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-2: energia primaria non rinnovabile.....	199
Tabella 122 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-3: energia primaria non rinnovabile.....	199
Tabella 123 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-0: vettore energetico energia elettrica.....	200
Tabella 124 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-1: vettore energetico energia elettrica.....	200
Tabella 125 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-2: vettore energetico energia elettrica.....	200
Tabella 126 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-3: vettore energetico energia elettrica.....	201
Tabella 127 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-0: spesa media annua.....	201
Tabella 128 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-1: spesa media annua.....	201
Tabella 129 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-2: spesa media annua.....	202
Tabella 130 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-3: spesa media annua.....	202
Tabella 131 – Caratterizzazione edilizia e geometrica dei ventiquattro casi studio.....	204
Tabella 132 – Profili di utilizzo definiti per la produzione di acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento.....	206
Tabella 133 – Servizio di produzione dell’acqua calda sanitaria: valori del coefficiente angolare [m] e dell’intercetta [q] al variare della tipologia impiantistica da utilizzare nell’Equazione 4.....	206
Tabella 134 – Parametro climatico medio mensile di riferimento, fattore di correzione $F_{ST}$ e producibilità media mensile pesata del solare termico.....	207
Tabella 135 – Servizio energetico riscaldamento: valori dei coefficienti a e b al variare della tipologia impiantistica e del livello di isolamento dell’edificio.....	208
Tabella 136 – Servizio energetico raffrescamento: valori dei coefficienti a e b al variare del livello di isolamento dell’edificio.....	208
Tabella 137 – Produzione di acqua calda sanitaria per la categoria E.1: confronto dei benchmark medi associati al consumo del principale vettore energetico calcolato con l’asset rating e con il profilo $P_{acs-min}$ al variare della configurazione impiantistica e della zona climatica (ST–0: senza solare termico, ST–1: un pannello di solare termico, ST–2: due pannelli di solare termico).....	209
Tabella 138 – Climatizzazione invernale con generatore di calore standard: confronto dei benchmark medi associati alla spesa media annua calcolati con l’asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.....	210
Tabella 139 – Climatizzazione invernale con generatore di calore a condensazione operante ad alta temperatura (radiatori): confronto dei benchmark medi associati alla spesa media annua calcolati con l’asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.....	211
Tabella 140 – Climatizzazione invernale con generatori operanti a bassa temperatura (a condensazione in nero e pompa di calore in rosso): confronto dei benchmark medi associati alla spesa media annua calcolati con l’asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.....	212
Tabella 141 – Climatizzazione estiva: confronto dei benchmark medi associati all’energia primaria non rinnovabile calcolati con l’asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.....	213

## Indice delle Figure

Figura 1 – Programmazione delle fasi di lavoro previste nella seconda annualità di ricerca. ....	21
Figura 2 – Primo livello di disaggregazione dell’indicatore.....	29
Figura 3 – Secondo livello di disaggregazione dell’indicatore: forma di energia.....	29
Figura 4 – Secondo livello di disaggregazione dell’indicatore: dimensione del sistema. ....	29
Figura 5 – Secondo livello di disaggregazione dell’indicatore: settori della domanda di energia. ....	30
Figura 6 – Secondo livello di disaggregazione dell’indicatore: usi finali. ....	30
Figura 7 – Livelli di disaggregazione dell’indicatore adottati e benchmark risultanti. ....	32
Figura 8 – Località selezionate per l’analisi energetica parametrica. ....	44
Figura 9 – Confronto tra i Gradi Giorno forniti dal D.P.R. n. 412/93 [4] e quelli ricalcolati a partire dai dati climatici di [67].....	45
Figura 10 – Trend dell’energia primaria totale media rispetto i Gradi Giorno forniti dal D.P.R. n. 412/93 [4] e quelli ricalcolati a partire dai dati climatici di [67]. ....	46
Figura 11 – Pianta geometrica del caso studio E1.i.U.1: edificio isolato unifamiliare di superficie di circa 100 m <sup>2</sup> . ....	48
Figura 12 – Prospetti del caso studio E1.i.U.1: edificio isolato unifamiliare. ....	48
Figura 13 – Pianta geometrica del caso studio E1.i.U.2: edificio isolato unifamiliare di superficie di circa 136 m <sup>2</sup> . ....	49
Figura 14 – Pianta geometrica del caso studio E1.i.U.3: edificio isolato unifamiliare di superficie di 168 m <sup>2</sup> . ....	49
Figura 15 – Pianta geometrica dei casi studio E1.t.PT.1, E1.t.PI.1 ed E1.t.PU.1: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare di superficie pari a 80 m <sup>2</sup> . ....	50
Figura 16 – Pianta geometrica dei casi studio E1.t.PT.2, E1.t.PI.2 ed E1.t.PU.2: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare di superficie pari a 100 m <sup>2</sup> . ....	51
Figura 17 – Pianta geometrica dei casi studio E1.t.PT.3, E1.t.PI.3 ed E1.t.PU.3: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare di superficie pari a 120 m <sup>2</sup> . ....	51
Figura 18 – Prospetti dei casi studio E1.t.PT.1, E1.t.PI.1 ed E1.t.PU.1: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare: individuazione delle diverse condizioni al contorno considerate.....	52
Figura 19 – Pianta geometrica dei casi studio E2.t.PT.1, E2.t.PI.1 ed E2.t.PU.1: unità immobiliari in un edificio a torre di superficie pari 80 m <sup>2</sup> . ....	53
Figura 20 – Pianta geometrica dei casi studio E2.t.PT.2, E2.t.PI.2 ed E2.t.PU.2: unità immobiliari in un edificio a torre di superficie pari 100 m <sup>2</sup> . ....	54
Figura 21 – Pianta geometrica dei casi studio E2.t.PT.3, E2.t.PI.3 ed E2.t.PU.3: unità immobiliari in un edificio a torre di superficie pari 120 m <sup>2</sup> . ....	54
Figura 22 – Pianta geometrica del casi studio E5.t.PT.1: unità immobiliare in un edificio a torre di superficie pari 80 m <sup>2</sup> . ....	55
Figura 23 – Pianta geometrica del casi studio E5.t.PT.2: unità immobiliare in un edificio a torre di superficie pari 100 m <sup>2</sup> . ....	55
Figura 24 – Pianta geometrica del casi studio E5.t.PT.3: unità immobiliare in un edificio a torre di superficie pari 120 m <sup>2</sup> . ....	56
Figura 25 – Analisi delle caratteristiche termiche medie delle componenti opache verticali selezionate in [1]. ....	58
Figura 26 – Analisi delle caratteristiche termiche medie delle componenti opache orizzontali superiori selezionate in [1]. ....	59
Figura 27 – Caratteristiche termiche delle componenti opache verticali selezionate per l’analisi parametrica. ....	59
Figura 28 – Caratteristiche termiche delle componenti opache orizzontali selezionate per l’analisi parametrica. ....	60
Figura 29 – Incidenza percentuale dei ponti termici analizzati al variare dell’energia dispersa. ....	62
Figura 30 – Variazione percentuale dell’influenza dei ponti termici: PT <sub>copertura</sub> e PT <sub>fondazione</sub> . ....	64
Figura 31 – Variazione percentuale dell’influenza dei ponti termici: PT – Infisso. ....	64
Figura 32 – Suddivisione e raggruppamento dei dati Istat per la definizione dei profili di utilizzo: processo logico. ....	70
Figura 33 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per zone climatiche messo a confronto con la distribuzione reale dei Comuni italiani. ....	71
Figura 34 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per zone climatiche e per tipologia impiantistica. ....	71
Figura 35 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per epoca di costruzione e per tipologia impiantistica nelle sei zone climatiche. ....	72

Figura 36 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per tipologia edilizia (unifamiliare, plurifamiliare, appartamento al piano terra, al piano intermedio e al piano ultimo) e per epoca di costruzione nelle sei zone climatiche nel caso di impianto autonomo. ....	73
Figura 37 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per tipologia edilizia (unifamiliare, plurifamiliare, appartamento al piano terra, al piano intermedio e al piano ultimo) e per epoca di costruzione nelle sei zone climatiche nel caso di impianto centralizzato. ....	73
Figura 38 – Confronto dell’energia primaria totale per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating. ....	83
Figura 39 – Confronto dell’energia primaria totale per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating. ....	84
Figura 40 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 2. ....	85
Figura 41 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating. ....	86
Figura 42 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating. ....	87
Figura 43 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 3 e dall’Equazione 4. ....	87
Figura 44 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating. ....	88
Figura 45 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating. ....	89
Figura 46 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 3 e dall’Equazione 4. ....	89
Figura 47 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating. ....	90
Figura 48 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating. ....	91
Figura 49 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 3 e dall’Equazione 4. ....	92
Figura 50 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating. ....	93
Figura 51 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating. ....	93
Figura 52 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 3 e dall’Equazione 4. ....	94
Figura 53 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating. ....	95
Figura 54 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating. ....	95
Figura 55 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 2. ....	96
Figura 56 – Producibilità del solare termico normalizzata per alcune città italiane. ....	97
Figura 57 – Producibilità del solare termico normalizzata rispetto la configurazione ST-1. ....	98
Figura 58 – Producibilità normalizzata in funzione del parametro climatico. ....	99
Figura 59 – Producibilità media pesata del solare termico. ....	99
Figura 60 – Confronto tra la producibilità del solare termico restituita dalle simulazioni energetiche e quella dell’Equazione 8. ....	101
Figura 61 – Confronto tra l’energia primaria da compensare con altro sistema impiantistico nella configurazione ST-1 restituita dalle simulazioni energetiche e dall’ applicazione dell’Equazione 8: asset rating vs tailored rating. ....	102
Figura 62 – Trend dell’energia primaria calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	106
Figura 63 – Trend dell’energia primaria calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	107
Figura 64 – Confronto tra energia primaria calcolata con l’asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	107

Figura 65 – Confronto tra energia primaria calcolata con l’asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	108
Figura 66 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	109
Figura 67 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	109
Figura 68 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	110
Figura 69 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in cemento armato Liv-Iso-0. ....	110
Figura 70 – Analisi della precisione delle tre equazioni per il profilo tailored $P_{risc-med}$ : edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	112
Figura 71 – Trend dell’energia primaria calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	116
Figura 72 – Trend dell’energia primaria calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	116
Figura 73 – Confronto tra energia primaria calcolata con l’asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	117
Figura 74 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	118
Figura 75 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	118
Figura 76 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	121
Figura 77 – Confronto tra energia primaria simulata e restituita dalle relazioni matematiche per edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	124
Figura 78 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici di nuova costruzione caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	125
Figura 79 – Confronto tra energia primaria simulata e restituita dalle relazioni matematiche per: edifici di nuova costruzione caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	127
Figura 80 – Confronto tra l’energia primaria simulata con l’asset rating per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	128
Figura 81 – Confronto tra l’energia primaria simulata con il profilo $P_{risc-min}$ per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	128
Figura 82 – Confronto tra l’energia primaria simulata con il profilo $P_{risc-med}$ per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	129
Figura 83 – Confronto tra l’energia primaria simulata con il profilo $P_{risc-max}$ per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	129
Figura 84 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dall’Equazione 12 con il profilo $P_{risc-min}$ per i generatori di calore 2, 3 e 4 operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	130
Figura 85 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dall’Equazione 12 con il profilo $P_{risc-med}$ per i generatori di calore 2, 3 e 4 operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	131
Figura 86 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dall’Equazione 12 con il profilo $P_{risc-max}$ per i generatori di calore 2, 3 e 4 operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	131
Figura 87 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	138
Figura 88 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	138
Figura 89 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici con livello di isolamento Liv-Iso-02. ....	142
Figura 90 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	144

Figura 91 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici con livello di isolamento Liv-Iso-03.....	145
Figura 92 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	147
Figura 93 – Trend dell’energia primaria calcolata con il profilo asset rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici caratterizzati da livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	148
Figura 94 – Confronto tra energia primaria calcolata con l’asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	149
Figura 95 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	149
Figura 96 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	150
Figura 97 – Confronto tra energia primaria non rinnovabile simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	152
Figura 98 – Trend dell’energia primaria calcolata con il profilo asset rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	153
Figura 99 – Confronto tra energia primaria calcolata con il profilo asset e quella restituita con i tre profili tailored: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	153
Figura 100 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	154
Figura 101 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	154
Figura 102 – Confronto tra energia primaria non rinnovabile simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	156
Figura 103 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.....	157
Figura 104 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.....	158
Figura 105 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.....	158
Figura 106 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.....	159
Figura 107 – Confronto tra Gradi Giorno invernali (GG <sub>i</sub> ) e Gradi Giorno Estivi (GG <sub>e</sub> ) per le località prescelte. ....	163
Figura 108 – Trend dell’energia primaria non rinnovabile in funzione della località di simulazione (riportata in termini di Gradi Giorno estivi) e del livello di isolamento dell’edificio. ....	165
Figura 109 – Trend dell’energia primaria non rinnovabile calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno Estivi della località di simulazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	166
Figura 110 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0. ....	166
Figura 111 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1. ....	169
Figura 112 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2. ....	172
Figura 113 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3. ....	175

## Sommario

La presente attività di ricerca triennale si basa sulla definizione di benchmark che leghino la metodologia di calcolo semplificata della certificazione energetica (asset rating) a quella più dettagliata, ma dispendiosa, delle diagnosi energetiche (tailored rating). Le correlazioni identificabili permetterebbero di integrare i risultati dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), calcolato con l'asset rating, restituendo dei consumi dell'edificio più realistici. Questo obiettivo è considerato di estremo rilievo in quanto permetterebbe di mantenere invariata la metodologia semplificata esistente e, al contempo, di ottenere dei risultati più accurati.

Le attività svolte nel secondo anno di ricerca hanno rappresentato il fulcro dell'intero lavoro triennale in quanto hanno portato alla definizione delle equazioni di correlazione tra asset rating e tailored rating e al conseguente calcolo dei benchmark. Per questo motivo, le attività del secondo anno sono state oggetto di un'attenta e dettagliata programmazione per fasi successive: definizione dei casi studio, identificazione delle equazioni di correlazione attraverso le simulazioni energetiche parametriche e conseguente calcolo dei benchmark.

Aspetto molto ambizioso dell'attività è stato quello di definire delle equazioni di correlazione e, quindi, dei benchmark che non siano strettamente legati alle configurazioni indagate nel presente lavoro. A tal fine, i dati provenienti dalle simulazioni energetiche sono stati normalizzati rispetto alcuni parametri che maggiormente influiscono sul singolo servizio energetico. Questa attività ha permesso di ottenere delle equazioni applicabili a qualsiasi caso studio, restituendo con un errore limitato e accettabile.

Lo studio si è inizialmente basato sulle analisi svolte nel primo anno di ricerca che hanno permesso di delineare le caratteristiche del patrimonio edilizio italiano sotto diversi punti di vista (tipologico, costruttivo, impiantistico) e identificare alcune potenziali località di simulazione. In virtù dell'importanza delle attività del secondo anno, questi risultati sono stati ulteriormente raffinati dal punto di vista termofisico, analizzando il comportamento del sistema edificio-impianto in tutte le sue configurazioni permettendo di escludere quelle assimilabili. Questo lavoro preliminare ha permesso di ottimizzare le successive simulazioni, definendo con attenzione i casi studio tenendo conto delle caratteristiche variegate del patrimonio edilizio italiano.

Aspetto di rilievo nella definizione dei casi studio è stata l'identificazione di profili di utilizzo tailored per ogni servizio energetico; questi si sono basati sia sulla normativa vigente che su analisi di un campione di dati di Letteratura. Questa attività è quella che ha comportato le maggiori discrepanze con l'asset rating, dove il funzionamento dell'impianto non è assimilabile a quello reale.

Il cuore dell'attività del secondo anno è stato lo svolgimento delle simulazioni energetiche, che hanno permesso di individuare delle equazioni di correlazione tra asset rating e tailored rating per ogni servizio energetico considerato nell'edificio. Le simulazioni sono state svolte per tutte le combinazioni di casi studio in base al servizio energetico e alla variazione del contesto climatico. Durante la fase di analisi è stata applicata la normalizzazione dei risultati delle simulazioni parametriche al fine di ottenere delle relazioni applicabili anche a casi studio differenti.

Le equazioni di correlazione hanno permesso di identificare degli indicatori energetici che, a partire dai medesimi indicatori restituiti con il calcolo APE, ne integrano i valori avvicinandoli ai consumi reali in funzione del reale utilizzo dell'edificio. Le equazioni di correlazione sono state, inoltre, validate rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche e, dove necessario, ulteriormente affinate attraverso dei coefficienti correttivi.

Ultima fase delle attività del secondo anno è stata il calcolo di tre benchmark associati all'energia primaria, al consumo del vettore energetico impiegato e alla spesa media annua. I benchmark sono stati calcolati a partire dalle equazioni di correlazione per tutti i casi studio e confrontati con gli stessi provenienti attraverso l'asset rating. I risultati hanno evidenziando le carenze della metodologia semplificata rispetto a un comportamento dell'edificio-impianto più realistico, nonché l'effettivo vantaggio derivante dall'applicazione delle equazioni di correlazione elaborate.

Il completamento dell'attività di ricerca triennale consisterà nella validazione delle equazioni di correlazione e dei benchmark identificati, attraverso il confronto con i dati provenienti da casi studio reali nel terzo anno.

## Summary

The proposed three-year research activity has twofold aim: the first is the evaluation of mathematics correlation between the simplified calculation method used for energy certification (asset rating) and the one used for energy audits (tailored rating), the second is the definition of benchmark for different energy services.

The correlation between the two calculation methods would make it possible to integrate the simplified results of Energy Performance Certificates (EPC) with more accurate energy consumption data. The aim of this work is extremely relevant as it would allow to do not modify the energy certification methodology and, at the same time, to obtain more accurate results.

In this context, the activities have been planned in details in the following work-steps: case study definition, parametric energy simulation, identification of the correlation equations and benchmark calculation.

The first work-step has been based on the extensive analyses carried out in the first year of research, where the building typology, construction system and thermal characterization of Italian buildings have been investigated. In order to reduce the time consuming of energy simulation, the thermal behaviour of every building system structure has been further analysed allowing to keep similar configurations out and to take into account only the main characteristics of Italian buildings.

The more relevant topic investigated in the case study definition has been the identification of the buildings' use profile; they has been defined by analysing information coming from both the Italian legislation and a representative sample data.

The parametric energy simulations have been the core of the current research on which the correlation equations between asset rating and tailored rating have been defined for each energy service. In order to apply the equations to different case studies and boundary conditions, all the results coming from the energy simulations have been normalized by considering several parameters chosen among the ones that have the biggest influence on each energy service.

The energy indicators obtained from the correlation equations have allowed to integrate the energy consumptions calculated with the asset rating and to make them closer to real building consumptions. Furthermore, the correlation equations have been validated with the energy simulations results. Only for heating and cooling energy services, corrective coefficients have been also identified in order to minimize the error of the correlation equation results.

The calculation of the benchmarks has been the last work-step of the second-year activities. The benchmarks have been related to primary energy, energy carrier consumption and average annual outgoings.

Finally the benchmarks obtained by using the both calculation methods (asset and tailored) have been compared in order to highlight the main differences between them and, furthermore, to show the lacks of the simplified methodology and the potential of the proposed integration.

The conclusion of the three-year research, planned in the third year of research, will be the validation of the correlation equations and the benchmarks through real case studies.

## 1 Introduzione

La certificazione energetica è lo strumento messo a disposizione per definire le prestazioni energetiche di un immobile attraverso l'assegnazione di una specifica etichetta e sensibilizzare l'utente finale sulle tematiche energetiche.

L'etichetta energetica di un immobile, definita comunemente classe energetica, è basata sull'Indice di Prestazione Energetica non Rinnovabile ( $EP_{gl,nren}$ ) che tiene conto del suo fabbisogno energetico non rinnovabile attraverso una specifica metodologia di calcolo (*asset rating*) che considera delle condizioni di utilizzo dell'edificio standard: in questo modo la valutazione della classe energetica si basa su valutazioni standardizzate e semplificate a discapito però dell'accuratezza dei consumi, che potrebbero discostarsi da quelli reali anche in maniera significativa.

Per finalità diverse da quelle della certificazione energetica, le prestazioni energetiche di un edificio possono essere calcolate applicando la metodologia definita *tailored rating*, basata cioè sui profili di utilizzo reali dell'edificio; questa ulteriore metodologia, impiegata per la redazione delle diagnosi energetiche, però, richiede una maggiore conoscenza del sistema edificio-impianto e comporta un maggior costo per l'utente finale.

In quest'ottica, è nata la presente attività di ricerca triennale che si pone come obiettivo lo sviluppo di benchmark che, partendo dai risultati ottenuti tramite l'*asset rating*, permettano di stimare un consumo più realistico del fabbricato oggetto di indagine.

Le attività del primo anno di ricerca [1] hanno portato a un'estesa definizione del parco edilizio nazionale, evidenziando quali caratteristiche fossero quelle prevalenti sul territorio sotto diversi punti di vista: tipologico, dimensionale e geometrico, termofisico e impiantistico.

Importante novità durante l'analisi dello stato dell'arte è stata l'integrazione dei dati presenti in Letteratura con quelli riportati negli Attestati di Prestazione Energetica (APE) presenti nel Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE). In questo modo si è avuto accesso a una serie di informazioni sugli immobili italiani aggiornate e solitamente non reperibili.

Basandosi su questi risultati, è stato possibile iniziare il percorso di identificazione del legame tra metodologia di calcolo *asset* e metodologia di calcolo *tailored*.

Dopo una breve analisi dello stato dell'arte sugli indicatori energetici e sui benchmark, propedeutica alla comprensione dei risultati ottenuti, le attività del secondo anno sono state svolte e organizzate secondo le seguenti fasi logiche:

- definizione dei casi studio, in base ai parametri e le caratteristiche del parco edilizio nazionale evidenziate nel primo anno di attività. Questa fase è comprensiva anche dell'analisi e identificazione dei profili di utilizzo *tailored*;
- simulazione dei casi studio in tutte le loro configurazioni. Le analisi sono state svolte secondo l'*asset rating* e il *tailored rating*, utilizzando i profili identificati nella prima fase delle attività. I risultati sono stati correlati al fine di identificare il più importante risultato di questo anno di attività, ovvero delle equazioni di correlazione tra le due metodologie di calcolo al variare del servizio energetico;
- definizione dei benchmark ottenuti dall'applicazione delle equazioni di correlazione.

Scendendo più nel dettaglio delle tre fasi di attività, sono stati definiti quattro casi studio base le cui diverse configurazioni sono state ottenute attraverso la variazione di caratteristiche quali la tipologia costruttiva, il livello di isolamento, la tipologia impiantistica e la località di simulazione. Partendo dalle informazioni disponibili e dall'esperienza sul campo, il consumo di acqua calda per usi sanitari e gli orari di funzionamento dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento sono stati analizzati per le diverse destinazioni d'uso selezionate, definendo dei profili di utilizzo *tailored* più realistici e legati all'effettivo utilizzo del sistema edificio-impianto.

In considerazione di tutte le combinazioni possibili, le attività del secondo anno hanno richiesto lo svolgimento di numerose simulazioni energetiche (oltre un milione) per ciascun caso studio che è stato definito.

A partire dal campione di dati acquisito, si sono condotte numerose analisi al fine di delineare delle relazioni matematiche che legassero il profilo asset a quello tailored al variare di specifici parametri che caratterizzano ciascun servizio energetico. Un importante passo all'interno di questa valutazione è stata la normalizzazione dei risultati in modo tale che le relazioni matematiche identificate potessero essere comunque valide anche per casi studio diversi da quelli investigati nella presente linea di ricerca.

Le equazioni di correlazione identificate, infine, sono state oggetto di una prima verifica confrontando i risultati da loro restituiti con quelli delle simulazioni energetiche per ogni caso studio al variare di destinazione d'uso, tipologia costruttiva, tipologia impiantistica e località.

L'ultima attività svolta in questo secondo anno è stata il calcolo di benchmark, basati sia sulle stesse simulazioni energetiche che sulle equazioni di correlazione, che permettessero di estrapolare degli indicatori energetici di riferimento per i diversi casi studio al variare delle condizioni di utilizzo del sistema edificio-impianto e a partire dai risultati restituiti dall'asset rating.

I risultati di questo anno di attività sono considerabili come il cuore dell'intera ricerca, raggiungendo l'importante obiettivo di ottenere dati più realistici relativi a consumi e prestazioni energetiche degli edifici, senza introdurre metodologie di calcolo nuove e più dispendiose per l'utente finale. La correlazione tra asset rating e tailored rating apre a scenari e applicazioni di notevole interesse, permettendo di mantenere immutato il metodo di calcolo standard per la valutazione energetica di un edificio ma restituendo dei consumi più realistici in relazione all'effettivo utilizzo del sistema edificio-impianto.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Il core business delle attività svolte in questa seconda annualità di ricerca ha riguardato la definizione di alcune equazioni di correlazione tra asset rating e tailored rating a partire dalle quali sono stati introdotti e calcolati dei benchmark per alcune categorie di edificio.

L'ambizioso risultato raggiunto permette di mantenere invariata l'attuale metodologia di calcolo semplificata e poco dispendiosa adottata per la redazione degli Attestati di prestazione Energetica (APE), integrandone gli output con dei valori di consumo più aderenti al reale utilizzo del sistema edificio-impianto.

Per raggiungere questo apprezzabile risultato, l'attività è stata accuratamente pianificata delineando alcuni step principali in cui è suddivisa la presente trattazione.

Dopo un'attenta analisi dello stato dell'arte sugli indicatori energetici in cui si sono esaminati numerosi lavori di Letteratura nonché molteplici relazioni matematiche che sono risultate però non idonee e applicabili per gli obiettivi prefissati in questo lavoro, si sono delineati alcuni casi studio le cui caratteristiche termofisiche sono state desunte a partire anche dagli esiti della prima annualità di ricerca [1], in cui si erano evidenziate le principali caratteristiche (tipologiche, termiche e impiantistiche) del patrimonio edilizio italiano. Aspetto cruciale di questa fase è stato quello della definizione di alcuni profili di utilizzo del sistema edificio-impianto che permettessero di eseguire un calcolo energetico più congruente con la realtà e al contempo che fossero differenti dalle assunzioni standard della metodologia asset.

Il cuore dell'intera attività del secondo anno, nonché la fase più dispendiosa in termini di tempo, è stata quella delle simulazioni energetiche parametriche; queste sono state condotte per tre categorie di destinazione d'uso (E.1, E.2 ed E.5) variando il contesto climatico, le caratteristiche dimensionali e termiche dell'involucro edilizio nonché diversificando la configurazione impiantistica per servizio energetico.

A seguito delle numerose simulazioni energetiche condotte, tutti i risultati sono stati oggetto di una attenta analisi che, grazie a un processo di normalizzazione dei dati, ha permesso di estrapolare alcune relazioni matematiche di correlazione tra l'asset rating e il tailored rating.

Infine, basandosi sulle relazioni trovate, per ogni servizio energetico indagato e per ogni caso studio sono stati definiti tre benchmark associati all'energia primaria, al consumo del vettore energetico impiegato e alla spesa media annua.

Prima di proseguire la presente trattazione illustrando i risultati che hanno portato alla definizione delle equazioni di correlazione tra le due metodologie e dei benchmark, nei seguenti paragrafi sono illustrati in maniera sintetica quelli che sono stati gli obiettivi e i risultati della prima annualità di ricerca (2.1), da cui si sono basate e pianificate le attività del secondo anno (2.2).

## 2.1 Sintesi degli obiettivi e dei risultati ottenuti nella prima annualità di ricerca

Il lavoro del primo anno di attività è stato volto all'individuazione delle principali caratteristiche del sistema edificio-impianto a livello nazionale, partendo da un'estesa analisi della Letteratura [1] sullo stato dell'arte del patrimonio edilizio italiano.

In considerazione della ricchezza di informazioni necessarie per il calcolo del fabbisogno energetico di un fabbricato, tale documentazione è stata integrata con i dati riportati negli Attestati di Prestazione Energetica (APE) raccolti nel database nazionale del Sistema Informativo sugli APE (SIAPE) che ad oggi contiene quasi 2 milioni di APE appartenenti a 11 Regioni e 2 Province Autonome.

L'analisi condotta ha permesso di individuare le principali caratteristiche del parco edilizio italiano a partire dalla destinazione d'uso, alla tipologia edilizia, alle caratteristiche geometriche e termofisiche dell'involucro edilizio.

A partire dai dati ISTAT riferiti al censimento nazionale del 2011 [2, 3] è stato possibile individuare la categoria edilizia preminente nel territorio italiano e la suddivisione per destinazione d'uso, che vede circa l'84% degli immobili in quella residenziale, settore maggiormente oggetto di certificazione energetica (circa l'85% degli APE redatti).

Una ulteriore distinzione tra immobili non residenziali è stata possibile dall'analisi del SIAPE che ha permesso di distinguere per le categorie di edificio previste dal DPR 412/1993 [4]. I risultati hanno evidenziato come le categorie prevalenti tra gli edifici non residenziali siano:

- E.2 - Edifici adibiti a uffici e assimilabili (24%);
- E.5 - Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili (42%);
- E.8 - Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili (25%).

Inoltre, gli uffici (E.2) e le attività commerciali (E.5) sono risultati essere quelli caratterizzati da un maggior contributo legato alle fonti energetiche rinnovabili.

A partire dai dati presenti in Letteratura, specificamente facendo riferimento al Progetto Tabula [5, 6], sono state evidenziate le principali tipologie edilizie diffuse nel territorio nazionale:

- casa isolata (unifamiliare): costruzione edilizia per una sola famiglia, indipendente da altre unità abitative e generalmente corredata da giardino;
- casa a schiera: tipologia edilizia caratterizzata dall'accostamento di più unità abitative, una a fianco all'altra;
- casa in linea: tipologia edilizia plurifamiliare costituita da un vano scala (o aggregazione lineare di più corpi scala) che serve almeno due appartamenti per piano;
- casa a torre: costruzione che rappresenta l'evoluzione della casa in linea, caratterizzata da un maggiore sviluppo verticale (altezza superiore a ciascun lato della pianta).

Queste, seppur con delle limitazioni, possono essere considerate delle tipologie edilizie attribuibili non solo alla categoria E.1, ma anche alle categorie E.2 e E.5, le quali però, ovviamente, possono prevedere delle configurazioni anche notevolmente diverse (si pensi ad esempio ai centri commerciali).

Una volta definite le categorie e le tipologie edilizie preminenti, si sono investigati i principali parametri geometrici degli immobili, quali il numero e l'altezza dei piani, il numero di appartamenti per fabbricato, la superficie utile, il volume lordo nonché la superficie degli infissi. I dati sono stati ricavati da un confronto dettagliato tra le informazioni provenienti dalla Letteratura (in particolare dai dati Istat [7]) e quelle provenienti dal SIAPE.

L'obiettivo di questa analisi è stato non solo quello di identificare gli intervalli dimensionali e di numerosità più diffusi per ogni parametro, ma anche, e soprattutto, quello di approfondire la caratterizzazione geometrica delle destinazioni d'uso E.1, E.2 ed E.5 in base alla tipologia edilizia assegnata.

La correlazione dei dati degli APE con quelli desunti in Letteratura, in riferimento anche alla normativa energetica, ha inoltre permesso di approfondire l'evoluzione storica delle caratteristiche termiche dei componenti opachi e trasparenti che delimitano il volume del fabbricato. In particolare, in ottica delle

simulazioni parametriche, sono state analizzate le tre tipologie costruttive più diffuse e comuni nel territorio italiano: strutture in muratura, strutture in cemento armato e strutture di nuova concezione/costruzione.

Per ciascuna tipologia edilizia sono state considerate anche diverse configurazioni di isolamento termico in funzione dell'epoca di costruzione e della normativa energetica, con lo scopo di prendere in considerazione la maggior casistica possibile. Le caratteristiche termiche di ogni componente opaco sono state analizzate al variare della stratigrafia e in funzione della tipologia costruttiva, studiando quasi 700 configurazioni per gli elementi verticali e quasi 200 per quelli orizzontali.

Le configurazioni dell'involucro trasparente, invece, sono state scelte prevalentemente in base all'evoluzione normativa in materia di efficienza energetica, variando la tipologia di infisso e di vetro. Per le dimensioni dei componenti finestrati si è fatto riferimento al Regolamento Edilizio [8] per gli immobili residenziali o misti residenziali-non residenziali, che impone una superficie finestrata apribile minima non inferiore a 1/8 della superficie del pavimento, e alle precedenti attività di ricerca [9, 10] per gli immobili non residenziali.

Un volta caratterizzato il fabbricato, la ricerca si è focalizzata sull'analisi impiantistica, a partire dai servizi energetici che caratterizzano le diverse destinazioni d'uso. L'indagine si è basata sia sugli obblighi normativi [11], che su quelli effettivamente presenti, ottenendo i seguenti risultati:

1. E.1: gli edifici residenziali devono obbligatoriamente essere dotati dei servizi di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria. Gli immobili censiti nel SIAPE, inoltre, mostrano un'elevata percentuale di casi dotati del servizio della climatizzazione estiva; inoltre, solo una percentuale ridotta di casi, riferibile perlopiù a nuove costruzioni, presenta il servizio di ventilazione meccanica;
2. E.2 ed E.5: oltre ai servizi riscontrati per il settore residenziale (di cui il solo servizio riscaldamento obbligatorio), gli uffici e le attività commerciali sono dotati del servizio di illuminazione. Anche in questo caso, il servizio di ventilazione meccanica è installato solo in un numero limitato di casi.

In ottica di caratterizzare le simulazioni energetiche parametriche, sono stati considerati i seguenti servizi energetici: climatizzazione invernale, climatizzazione estiva, produzione di acqua calda sanitaria e, solo per gli immobili non residenziali, illuminazione artificiale. Tutte le configurazioni con il servizio energetico di ventilazione meccanica sono state considerate come non obbligatorie e da definire in funzione della specificità del caso studio esaminato.

I servizi energetici selezionati sono stati ulteriormente indagati, individuando le tipologie impiantistiche più comuni a livello nazionale secondo le macro-categorie dichiarate nei dati ISTAT [2] e rielaborando dati di Letteratura. Inoltre, sono stati evidenziati i vettori energetici più utilizzati e le effettive ore di accensione degli impianti, dato di estrema importanza per la definizione di profili di utenza più realistici che sono stati oggetto di studio proprio in questo secondo anno di attività.

L'analisi congiunta dei dati di Letteratura con quelli riportati negli APE ha permesso di avere informazioni molto più accurate sulla componente impiantistica e di individuare le tipologie impiantistiche più diffuse per ogni servizio energetico considerato per tutte le destinazioni d'uso. Successivamente, è stato possibile delineare i valori di potenza al variare sia del servizio energetico che della destinazione d'uso dell'immobile. A partire dagli indicatori di prestazione energetica globale rinnovabile ( $EP_{gl,nren}$ ) e non rinnovabile ( $EP_{gl,ren}$ ), è stato inoltre possibile valutare la prestazione energetica media per le diverse destinazione d'uso, fornendo un ulteriore criterio di selezione delle categorie di edificio più significative da analizzare in questo secondo anno di attività.

Sempre sfruttando l'analisi congiunta dei dati disponibili, sono state individuate le località italiane più rappresentative per numero di edifici costruiti e popolazione residente (dati ISTAT), nonché per Gradi Giorno e Zona Climatica (dati ISTAT e SIAPE).

I risultati dell'attività svolta durante il primo anno di ricerca hanno permesso di avere una accurata immagine dello stato di fatto del patrimonio edilizio nazionale, indagando aspetti di dettaglio grazie all'integrazione e correlazione dei dati presenti in Letteratura con quelli contenuti nel SIAPE. In particolare, le informazioni relative al sistema edificio-impianto caratterizzante gli immobili nazionali, hanno permesso la definizione dei principali parametri con cui saranno costruiti i modelli di simulazione parametrica oggetto del presente anno di attività.

## 2.2 Obiettivi e programmazione della seconda annualità

Le attività della seconda annualità rappresentano un punto cruciale all'interno dell'intera linea di ricerca triennale, in quanto permettono di raggiungere l'obiettivo primario del lavoro, ossia l'identificazione delle equazioni di correlazione tra asset rating e tailored rating e del calcolo dei relativi benchmark.

Il lavoro illustrato nel presente report è stato oggetto di una accurata pianificazione finalizzata a definire:

1. alcuni casi studio rappresentativi del parco edilizio italiano delle preminenti categorie di edificio (paragrafo 2.4);
2. le equazioni di correlazione per ciascun servizio energetico tra l'asset rating e il tailored rating (paragrafo 2.5);
3. dei benchmark sempre per ciascun servizio energetico investigato (paragrafo 2.6).

Il processo logico, nonché la pianificazione della seconda annualità di ricerca, è sinteticamente mostrata in Figura 1 in cui si sono distinte, con un differente colore, le fasi in cui è stato suddiviso il lavoro:

1. bianco: è il punto di partenza del secondo anno rappresentando i risultati ottenuti nella prima annualità ossia dell'analisi dello stato dell'arte del patrimonio edilizio italiano;
2. blu: è il primo vero step di questo lavoro in cui attraverso una accurata analisi dei risultati dell'anno precedente, è stata condotta una importante scrematura dei dati che ha permesso di selezionare quelli da parametrizzare e di minimizzare il dispendio, in termini di tempi di calcolo, delle numerose simulazioni energetiche. A completamento di questa fase sono stati definiti alcuni casi studio distinti per categoria edilizia e il conseguente calcolo delle combinazioni al variare dei parametri scelti;
3. giallo: rappresenta il cuore nonché la fase più laboriosa dell'attività della ricerca che ha visto condurre più di un milione di simulazioni energetiche di tipo parametrico per singolo ogni caso studio individuato allo step precedente. A seguito delle simulazioni, sono state condotte le analisi dei risultati distinguendo per servizio energetico;
4. verde: a completamento dell'attività di ricerca sono state definite delle relazioni matematiche di correlazione tra l'asset rating e i profili tailored per i principali servizi energetici, a partire dalle quali sono stati introdotti anche dei benchmark, in termini di energia primaria, vettore energetico consumato e spesa media annua, per tutti i casi studio investigati.

L'attività è stata suddivisa in maniera molto articolata perché si pone l'obiettivo di integrare i risultati derivanti dalla metodologia asset senza introdurre una nuova metodologia di calcolo che comporterebbe un maggior dispendio economico per l'utente finali. L'idea, quindi, è quella di restituire degli indicatori energetici più allineati ai consumi reali del fabbricato e che si basino sugli stessi indicatori asset, lasciando del tutto invariata la metodologia vigente.

In quest'ottica, è stato necessario iniziare con una attenta scrematura dei risultati delineati al termine della prima annualità relativi alle caratteristiche termo-fisiche del fabbricato nonché del sistema impiantistico installato a copertura dei differenti servizi energetici. Questa è stata condotta studiando in dettaglio i parametri che maggiormente influenzano il sistema edificio-impianto, permettendo di scartare quelle combinazioni che avrebbero portato a risultati molto simili o del tutto assimilabili, riducendo quindi sensibilmente i tempi di calcolo.

Partendo dalle destinazioni d'uso selezionate, ovvero abitazioni (E.1), uffici (E.2) e attività commerciali (E.5), sono state scelte le tipologie edilizie ritenute più rappresentative per l'analisi parametrica definendo alcuni casi studio standard a partire dai quali sono state identificate molteplici configurazioni al variare di alcuni parametri, come le dimensioni geometriche, la tipologia edilizia, nonché le condizioni climatiche esterne.

Oltre alle proprietà termofisiche del fabbricato, i casi studio sono stati caratterizzati dai servizi energetici ritenuti più rappresentativi nonché quelli che presentano una significativa variazione di calcolo applicando la metodologia asset o tailored; per questo tutti i casi studio sono stati simulati considerando i tre servizi energetici preminenti (produzione di acqua calda sanitaria, climatizzazione invernale e climatizzazione estiva), per ognuno dei quali sono state adottate diverse tipologie impiantistiche.

Risultati della 1° annualità di ricerca

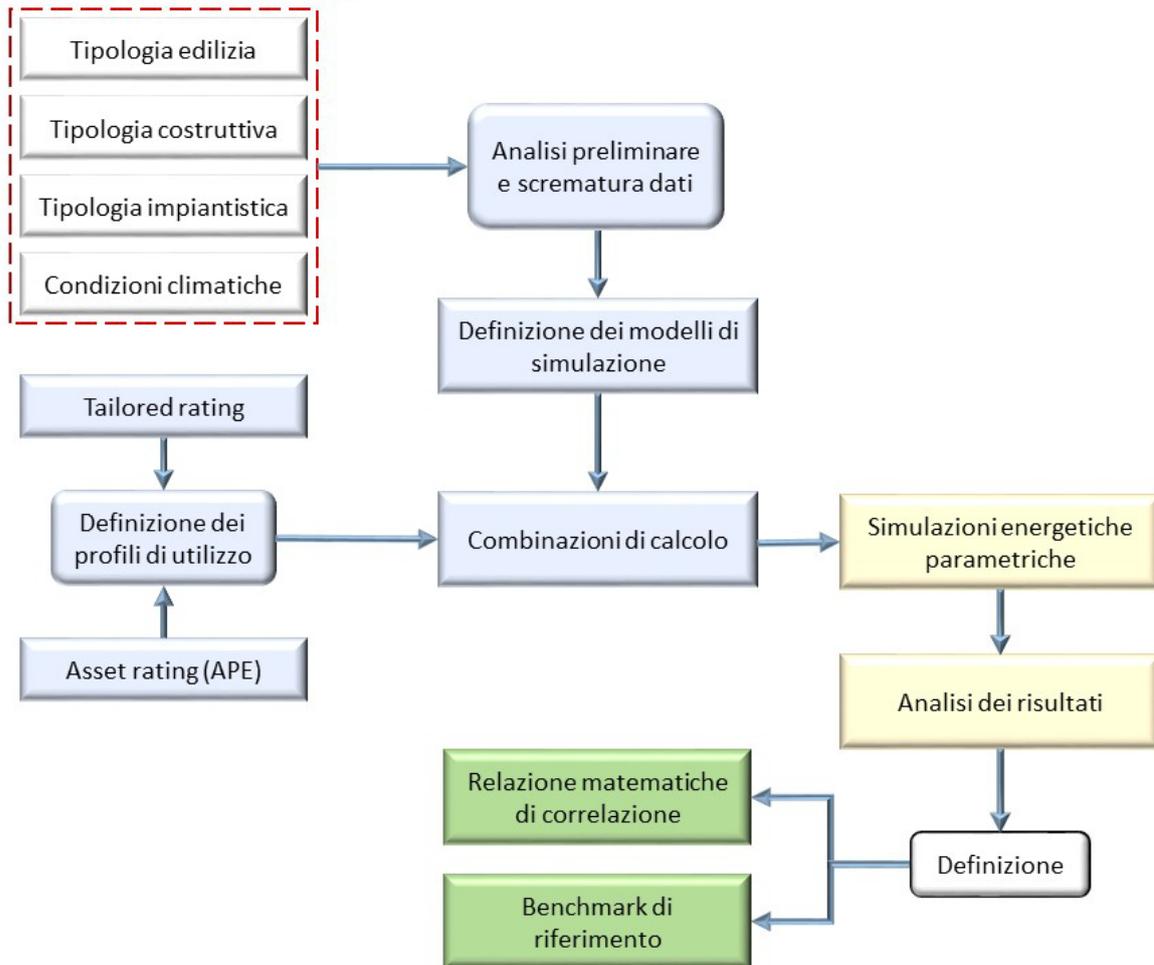


Figura 1 – Programmazione delle fasi di lavoro previste nella seconda annualità di ricerca.

La caratterizzazione dei casi studio è stata completata definendo specifici profili di utilizzo da adottare per il calcolo tailored al variare della categoria di edificio; questi, laddove possibile, sono stati definiti mediante analisi di dati disponibili in Letteratura, in caso contrario sono state effettuate delle assunzioni semplificate adatte allo scopo. Per ciascun servizio energetico considerato si sono delineati tre profili di utilizzo distinti; per la produzione dell'acqua calda sanitaria si è valutato un volume di acqua consumato per usi sanitari più realistico dipendente dal solo numero di persone, mentre per la climatizzazione invernale ed estiva sono stati desunti degli orari di accensione degli impianti in funzione della zona climatica considerata. La definizione dei profili di utilizzo è stato uno degli studi più importanti, in quanto rappresenta la variabile principale di discrepanza tra la metodologia asset da quella tailored.

Tutti questi parametri, scelti in modo tale da rappresentare nella maniera più completa possibile il parco edilizio nazionale, hanno comportato a più di un milione di combinazioni possibili da simulare per ogni singolo caso studio definito.

A seguito delle numerose simulazioni energetiche di tipo parametrico condotte, si è proceduto con l'analisi dei risultati; nell'ottica di estendere le relazioni di correlazione anche a differenti condizioni di quelle indagate (come ad esempio le caratteristiche dell'impianto termico o le condizioni climatiche), si è deciso di analizzare tutti i risultati distinguendo per servizio energetico, adottando una metodologia di analisi standardizzata. In particolare, è stata fatta una normalizzazione dei risultati derivanti dal calcolo tailored per specifici parametri: alcuni sono caratteristici del singolo servizio energetico mentre altri prescindendo da questo.

Ad eccezione di casi particolari, la metodologia di analisi può essere sintetizzata dalle seguenti fasi:

1. analisi dell'energia primaria per lo specifico servizio energetico derivante dall'asset rating e dal tailored rating per ciascun caso studio e in ogni contesto climatico prescelto;
2. confronto dell'energia primaria ottenuta con l'asset rating e con i tre profili di utilizzo tailored;
3. calcolo dell'indicatore energetico normalizzato (IEN), attraverso la normalizzazione dell'energia primaria ottenuta con i profili tailored rispetto a parametri opportunamente selezionati nonché l'energia primaria ottenuta con la valutazione asset;
4. definizione di una o più equazioni di correlazione tra le due metodologie di calcolo;
5. prima verifica delle equazioni di correlazione ed eventuale definizione di fattori correttivi.

Come sarà possibile vedere in seguito, uno degli obiettivi principali del presente lavoro è stato quello di poter identificare delle relazioni tra le due metodologie di calcolo estendibili anche a casi studio non investigati, svincolandosi dalle ipotesi e dalle assunzioni fatte preliminarmente. Per questo motivo, la fase di normalizzazione dei dati ottenuti con i profili di utilizzo tailored è fondamentale nel processo di definizione delle relazioni di correlazione.

Le attività del secondo anno si sono concluse con il calcolo di benchmark attraverso l'applicazione delle equazioni di correlazione a tutti i casi studio analizzati e confrontati con gli stessi calcolati attraverso l'asset rating. In particolare, i benchmark sono stati associati all'energia primaria totale o non rinnovabile richiesta (in funzione della tipologia impiantistica impiegata), ai vettori energetici consumati e alla spesa media annua. I benchmark, inoltre, sono stati restituiti al variare della zona climatica, della tipologia impiantistica della categoria di edificio per il singolo servizio energetico (Appendice A, Appendice B, Appendice C).

I risultati ottenuti dal confronto tra benchmark asset e benchmark tailored hanno evidenziato le carenze dell'asset rating nella valutazione del fabbisogno energetico degli edifici e, al contempo, le potenzialità degli indicatori energetici, identificati in questo secondo anno di attività, nell'integrare i dati provenienti dall'APE e a restituire consumi variabili con il reale utilizzo del fabbricato.

Il completamento dell'attività di definizione del legame tra asset rating e tailored rating avverrà durante il terzo anno di attività, dove le equazioni di correlazione identificate e i benchmark ottenuti saranno verificati attraverso il confronto con analisi su casi studio reali.

Si precisa che tutte le analisi condotte si basano su un campione rappresentativo di simulazioni energetiche, tuttavia qualora si dovesse riscontrare una significativa discrepanza in fase di validazione di questi risultati, nel corso del terzo anno di attività si potrà prevedere di effettuare un affinamento degli stessi o di apportare opportune modifiche nella metodologia di analisi

## 2.3 Indicatori e benchmark in ambito energetico

L'esigenza della sicurezza energetica, gli impatti sociali ed economici dei prezzi elevati dell'energia e la contezza dei cambiamenti climatici hanno portato molti Paesi a porre maggiore attenzione sullo sviluppo di politiche e misure che promuovano l'efficienza energetica [12]. In questo contesto, la consultazione e l'interpretazione dell'enorme varietà di dati relativi agli usi finali di energia è spesso agevolata attraverso l'utilizzo di indicatori, indici o benchmark; in particolare, gli indicatori di prestazione energetica sono elementi di estremo rilievo anche ai fini del monitoraggio della penetrazione delle politiche di efficienza energetica e rappresentano i driver della domanda di energia [13]. Quindi la maggiore utilità degli indicatori è il loro impiego in studi successivi e il loro calcolo non si configura come un punto di arrivo, bensì di partenza per lo sviluppo di ulteriori approfondimenti sul sistema energetico oggetto di indagine. Gli indicatori di prestazione energetica risultano la cartina al tornasole dei consumi energetici del sistema in analisi e consentono valutazioni di performance dello stesso, usualmente, mediante aggiustamenti e normalizzazioni.

Risulta, quindi, importante sviluppare e mantenere validi indicatori per supportare i decision maker nel processo di scelta delle politiche più efficaci, ma anche per aiutare gli utenti finali, ad esempio, nella conoscenza dei consumi del proprio immobile. Per questo motivo, la scelta e lo sviluppo di indicatori appropriati è un lavoro che necessita di analisi elaborate, spesso basate su una notevole mole di dati e informazioni.

Il manuale del progetto Energia e Sostenibilità per la Pubblica Amministrazione (ES-PA) [14] e il documento UNI/TR 11775:2020 [15] forniscono la definizione di indicatore di prestazione energetica come *“valore quantitativo della prestazione energetica così come definito dall'organizzazione ed associato ad una specifica unità di misura (ad esempio consumo per unità di superficie)”*. Come si evince dalla definizione, l'indicatore di prestazione energetica si costruisce, tipicamente, come un rapporto fra il consumo energetico (a numeratore) e il fattore di aggiustamento (a denominatore) e per consentire la comparazione fra i sistemi oggetto di indagine possono prevedere anche fattori di normalizzazione o correttivi.

Le norme [14] e [15], inoltre, restituiscono la definizione di benchmark come *“parametro di riferimento rappresentativo del consumo medio di settore definito dalla destinazione d'uso e dalla tipologia edilizia dell'edificio in esame”*.

Quindi, a livello generale, l'indicatore di prestazione energetica del sistema viene confrontato con il benchmark, di modo da stabilire se la prestazione del sistema indagato, rispetto alla media, è allineata, carente o migliore.

Sulla base dei concetti appena espressi, la trattazione del lavoro è proseguita con un'analisi dettagliata sul concetto di indicatore e di benchmark rispetto alla normativa e alla Letteratura esistenti, con particolare interesse per i precedenti report di Ricerca di Sistema Elettrico (RdS). Inoltre, l'approfondimento si è focalizzato sui possibili livelli di aggregazione che indicatori e benchmark possono presentare e le loro principali formulazioni matematiche, con particolare attenzione agli applicativi ENEA.

Questa disamina ha permesso di evidenziare non solo le metodologie ampiamente validate e utilizzate per lo sviluppo di indicatori energetici, ma soprattutto di evidenziare le importanti novità e potenzialità del lavoro svolto.

### 2.3.1 Stato dell'arte: excursus normativo

Le analisi volte al miglioramento del sistema edificio-impianto sono valutazioni oggettive e funzionali al legislatore nazionale in sede di redazione dei testi di recepimento delle norme internazionali e/o europee sugli usi finali dell'energia.

Gli indicatori di prestazione energetica, oltre alla ricchezza di informazioni e il valore che hanno autonomamente, presentano anche delle enormi potenzialità quando sono abbinate a ulteriori indagini di approfondimento, quali l'espletamento di servizi di efficienza energetica, l'applicazione di metodologie di calcolo dei risparmi o di benchmarking, la conduzione di diagnosi energetiche e l'implementazione di sistemi di gestione dell'energia (SGE).

Risulta quindi di interesse analizzare il contesto legislativo, facendo riferimento al catalogo di norme UNI, al fine di approfondire l'utilizzo e l'importanza di indicatori e degli benchmark per il miglioramento dell'efficienza energetica.

La norma UNI CEI EN 15900:2010 [16] fornisce le caratteristiche di un servizio di miglioramento dell'efficienza energetica risultante da cambiamenti tecnologici, comportamentali o economici. La norma evidenzia i requisiti fondamentali e descrive le principali fasi del processo di fornitura del servizio, quali ad esempio la redazione di una diagnosi energetica la realizzazione di interventi di miglioramento dell'efficienza energetica e la misura e verifica delle prestazioni dell'edificio indagato, per l'espletamento delle quali il calcolo degli indicatori di prestazione energetica risulta cruciale, ai fini della verifica del conseguimento del miglioramento dell'efficienza energetica.

La norma UNI CEI EN 16212:2012 [17] si riferisce all'indagine di approfondimento relativa al calcolo dei risparmi impiegando metodologie top-down (discendenti) e bottom-up (ascendenti). L'approccio generale consente l'applicazione ai risparmi energetici degli edifici e fa riferimento al consumo energetico in tutti gli usi finali. La norma può essere adottata sia per la valutazione di risparmi reali che previsti. La metodologia top-down implica, in prima battuta, la definizione e il calcolo degli indicatori di prestazione energetica e, conseguentemente, la valutazione dei risparmi. Mentre la metodologia bottom-up analizza gli effetti degli interventi di efficientamento a partire dalle componenti individuali del sistema.

La norma UNI CEI EN 16231:2012 [18] verte sull'applicazione di una metodologia di benchmarking in tema di efficienza energetica. L'approccio al benchmarking può essere interno (relativo ad una specifica organizzazione) o esterno (tra organizzazioni), volto a fissare dati chiave e indicatori del consumo energetico, sia qualitativi che quantitativi, di natura tecnica e comportamentale, ai fini della comparazione delle prestazioni. In linea di massima, la metodologia di benchmarking si applica ai consumi specifici, mentre possono essere considerati altri aspetti relativi alle prestazioni, come le tecnologie e le modalità operative. Inoltre, per ottimizzare il processo di benchmarking, risulta necessario l'impiego di modelli per la delicata fase di raccolta dati nei quali siano chiari la tipologia, il formato e l'accuratezza dei dati da inserire. I fattori correttivi devono essere esplicitati e occorre valutare la pertinenza degli stessi.

In relazione alla conduzione di diagnosi energetiche, l'argomento è normato dal pacchetto UNI CEI EN 16247 e dal documento UNI/TR 11775:2020 [15]. Quest'ultimo costituisce una linea guida per l'applicazione della UNI CEI EN 16247-2 [19] sulle diagnosi energetiche degli edifici, in particolare, ad uso residenziale, terziario o altri assimilabili. Ai fini del calcolo degli indicatori di prestazione energetica, il rapporto tecnico fornisce indicazioni e modalità operative per la raccolta e l'analisi delle spese energetiche e delle documentazioni tecniche disponibili, la determinazione dei fattori di aggiustamento e correttivi, l'analisi dei servizi energetici e la costruzione dell'inventario energetico inteso come la descrizione analitica dei consumi relativi ai diversi vettori energetici del sistema indagato.

Oltre alla definizione generale di indicatore di prestazione energetica e di benchmark, il rapporto [15] distingue l'indicatore in effettivo, obiettivo ed operativo determinati rispettivamente a mezzo di misure (effettivo), stabilito dalla committenza (obiettivo) e scaturito dall'implementazione di un modello di simulazione del comportamento del sistema edificio-impianto (operativo).

A livello internazionale, ai fini dell'implementazione di sistemi di gestione dell'energia, il tema degli indicatori di prestazione energetica è trattato dal pacchetto di norme ISO 50000. In particolare, la norma UNI CEI EN ISO 50001:2018 [20], stabilisce che gli Indicatori di Prestazione Energetica (EnPI) debbano essere appropriati ai fini della misura e del monitoraggio della prestazione energetica e fornire la dimostrazione del miglioramento della stessa. Viene introdotta, inoltre, la differenza fra EnPI ed EnB, ossia indicatori di prestazione energetica di riferimento (Baseline - EnB) quale misura della variazione della prestazione energetica. Qualora sussistano variabili che influenzano la prestazione energetica, deve essere eseguita la procedura di normalizzazione degli EnB e degli EnPI corrispondenti. Il metodo per la determinazione e l'aggiornamento degli EnPI deve essere tracciato come informazione documentata.

La norma UNI ISO 50004:2015 [21] si configura come un compendio della [20]. Infatti, i contenuti di quest'ultima vengono esplicitati con il supporto di esempi, liste di controllo e integrazioni, in accordo con l'approccio sistemico della stessa.

La norma UNI ISO 50006:2015 [22] risulta focalizzata sul tema degli EnB e degli EnPI e come parte del processo di misura della prestazione energetica. Sussistono indicazioni circa la modalità di selezione degli EnPI, lo scopo e il campo di applicazione degli stessi e i fattori influenzanti la determinazione. Viene trattato il rapporto tra gli EnB e gli EnPI al variare delle condizioni al contorno e vengono esplicitate la procedura di normalizzazione, le criticità nella raccolta dati e la modalità di gestione di valori anomali. Sono presenti appendici di approfondimento sui confini degli EnPI, la normalizzazione dei consumi e la redazione della reportistica.

La norma UNI ISO 50015:2015 [23] fornisce le linee guida per il processo di misura e verifica (M&V) della prestazione energetica di una organizzazione o di una sua componente. Le azioni di M&V perseguono gli obiettivi di determinare, normalizzare e confrontare i consumi energetici. I requisiti prevalenti del processo di M&V sono: accuratezza nella gestione dell'incertezza, trasparenza e riproducibilità, gestione dei dati e pianificazione della misurazione e impiego di metodi appropriati.

### 2.3.2 Stato dell'arte: Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale

Gli studi mirati all'ottimizzazione del sistema edificio-impianto costituiscono elementi di indirizzo delle scelte programmatiche e strategiche per il raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni dei gas climalteranti; in tale contesto, si colloca una parte dell'attività di Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale (RdS), con particolare attenzione alla definizione di indicatori atti a stabilire i livelli di domanda di energia degli edifici italiani.

Il tema in oggetto è piuttosto ricorrente nelle attività di RdS, in particolare attraverso analisi volte a determinare indicatori e benchmark di consumo degli edifici in base alla loro destinazione d'uso (Tabella 1). Le analisi incentrate alla definizione di indicatori di prestazione per il settore residenziale, trattate in [24], sono state basate su una campagna di monitoraggio effettuata su 110 abitazioni italiane. Per questa specifica categoria, sono stati individuati i principali indicatori e benchmark di consumo medi in riferimento ai servizi energetici di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione e ad altri usi finali dell'energia, quali impiego di elettrodomestici e degli apparecchi elettronici.

In [25] sono invece studiati gli edifici adibiti ad uso alberghiero per differenti geometrie, numero di camere e carichi interni sfruttando la simulazione dinamica al variare del contesto geografico (Milano, Roma e Palermo). In questo caso gli indici dei fabbisogni di energia primaria sono stati valutati nel periodo invernale, estivo e complessivo restituendo indici dei fabbisogni di energia utile.

Altra destinazione d'uso approfondita è quella degli uffici. Una prima caratterizzazione dei consumi nazionali per questa categoria è stata affrontata in [26], dove sono stati calcolati e verificati degli indicatori di consumo, per ogni zona climatica, in funzione della superficie, sia in termini di energia termica che di energia elettrica. L'analisi è stata condotta confrontando dati provenienti da edifici esistenti con dati di strutture simulate, di modo da determinare la numerosità di edifici reali occorrenti ai fini di una rappresentazione attendibile dei risultati che si differenziassero per zona climatica, dimensioni ed assorbimenti di energia.

Le successive indagini nazionali sugli uffici, si sono sviluppate, quasi esclusivamente, a mezzo di simulazioni.

Tabella 1 – Reportistica di Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale (RdS) sugli indicatori di prestazione energetica in funzione della destinazione d'uso, indagata nel presente lavoro.

Target	Anno di pubblicazione							
	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018
abitazioni	[24]							
alberghi	[25]							
uffici	[26-27]	[28]			[29]			
ospedali	[30]				[31]			
grandi magazzini	[32]	[33]						
centri sportivi			[34]	[35]	[36]	[37]		
scuole e università	[38]	[39, 40, 41, 44]		[42, 53]	[29, 43, 47]	[45]	[46, 48, 50]	[49, 51, 52]

Infatti, in [27] sono stati definiti degli indicatori e dei livelli di fabbisogno per i servizi energetici di riscaldamento e raffrescamento attraverso analisi svolte per due uffici tipo, simulati in tre contesti climatici (Milano, Roma e Palermo) variandone le caratteristiche geometriche e termiche dell'involucro edilizio e i carichi interni. L'approccio dell'edificio-tipo adottato in [27] ha evidenziato la possibilità di utilizzare la simulazione parametrica per restituire risultati di carattere nazionale. Lo stesso approccio è stato adottato in [28] dove sono state eseguite delle simulazioni energetiche al fine di rappresentare l'intero parco immobiliare nazionale ad uso ufficio sfruttando una serie di edifici-tipo. Lo studio dei dati geometrici ha permesso di identificare edifici distinti per elementi dimensionali, parametri costruttivi e impiantistici per ciascuna area geografica e per le diverse epoche di costruzione. A partire dalle simulazioni energetiche, si sono calcolati i fabbisogni energetici e gli indicatori degli edifici-tipo, sia nel periodo invernale che in quello estivo, in considerazione delle caratteristiche termo-fisiche dell'involucro e delle condizioni climatiche del sito. In aggiunta, i fabbisogni e quindi gli indicatori sono stati desunti considerando anche potenziali interventi sull'involucro edilizio.

Gli studi condotti hanno consentito la costruzione di banche dati dedicate all'efficienza energetica per la categoria uffici. In particolare, in [29] risiede il sistema informativo sui consumi energetici degli edifici pubblici del Centro Ricerche Economiche Sociali di Mercato per l'Edilizia e il territorio (CRESME), contenente anche gli indicatori di prestazione energetica termici ed elettrici per gli uffici.

Altra categoria indagata risulta essere quella degli ospedali; ad esempio in [30] sono state condotte le simulazioni dinamiche di due edifici ospedalieri da cui sono stati desunti gli indici di prestazione energetica per il riscaldamento e il raffrescamento. I modelli sono stati validati confrontando i dati simulati con quelli storici dei consumi di combustibile e di energia elettrica, permettendo di eseguire anche le analisi parametriche impiegate per la definizione di benchmark di consumo dell'edilizia sanitaria.

Anche in questo caso, le analisi condotte hanno permesso la costruzione di banche dati dedicate all'efficienza energetica; in particolare, in [31] risiede il sistema informativo sui consumi energetici degli edifici pubblici del CRESME con focus ospedali. L'archivio informatico contiene, quindi, gli indicatori di prestazione energetica termici ed elettrici per gli ospedali.

In [32] viene, invece, posta l'attenzione al processo metodologico per calcolare gli indicatori prestazionali energetici di attività legate al terziario; in particolare, sono presentate le principali metodologie di benchmarking applicate ai centri commerciali. Le scale prestazionali di confronto sono state definite sulla base dei consumi storici di centri commerciali esistenti e dei risultati di simulazioni dinamiche. Ai fini delle analisi sono stati considerati i seguenti parametri: fabbisogno di energia primaria utilizzata in fase operativa per la climatizzazione invernale e per quella estiva, energia elettrica di picco richiesta in fase operativa, energia rinnovabile prodotta all'interno ed all'esterno del sito.

Lo stesso target viene analizzato in [33], dove la trattazione si basa sui dati reali raccolti per un numero rappresentativo di edifici ad uso grande distribuzione commerciale dell'intero scenario nazionale. In questo caso, sono stati calcolati gli indicatori di consumo termico ed elettrico in funzione delle zone climatiche.

I lavori [34, 35] sono finalizzati al miglioramento della struttura delle attività di diagnosi e benchmarking degli edifici dedicati allo sport. In questi studi sono stati valutati i consumi energetici, elettrici e termici, di una struttura comprendente tutti i principali tipi di impianti sportivi [34] e di impianti natatori privati [35] definendo degli indicatori di consumo di energia elettrica e termica suddivisi per servizio energetico e destinazione d'uso degli ambienti. In [36] e in [37], invece, sono stati fissati degli indicatori di consumo del settore sportivo in modo tale da definire un metodo matematico di previsione dei consumi valido per tutti i centri sportivi, indipendentemente dalle dimensioni, in funzione della zona climatica e del livello qualitativo di ottimizzazione dell'impianto.

Infine, scuole ed università sono le destinazioni d'uso maggiormente indagate, a partire dall'analisi svolta in [38] che rappresenta un primo censimento dello stato energetico degli edifici scolastici sul territorio nazionale comprendente gli indici di prestazione energetica termici ed elettrici per le diverse tipologie di scuole in base al livello di istruzione.

Anche per gli edifici scolastici l'approccio generale è stato quello dell'edificio-tipo. Infatti, in [39] è stato considerato un edificio campione adibito a scuola media superiore che per caratteristiche geometriche e per tipologia di spazi e funzioni ospitate fosse rappresentativo dello stock edilizio scolastico in Italia. A mezzo di

simulazioni, sono stati calcolati gli indici di prestazione energetica per il riscaldamento e il raffrescamento del caso studio (stato dell'arte), nonché quelli risultanti da azioni per il miglioramento delle prestazioni energetiche. Le simulazioni sono state eseguite in tre località (Milano, Roma e Palermo) ritenute rappresentative delle principali condizioni climatiche del territorio Italiano.

L'attività condotta in [40] ha avuto come obiettivo la definizione di benchmark di consumo energetico per edifici a destinazione scolastica, con particolare riferimento alle scuole secondarie superiori, sviluppando due indagini complementari: la campagna di monitoraggio dei consumi energetici effettuata su un campione di edifici scolastici considerato rappresentativo e la conduzione delle simulazioni dinamiche su edifici-tipo identificati nel corso delle campagne.

In relazione all'ambito universitario, in [41-43] sono state svolte delle analisi delle prestazioni energetiche degli edifici del Politecnico di Milano. In [41] sono state eseguite simulazioni dinamiche di edifici-tipo, al fine di determinare benchmark ai quali riferire il potenziale costituito dagli interventi di contenimento dei consumi energetici; mentre in [42] e [43], attraverso l'acquisizione dei dati con sistema di lettura da remoto dei consumi elettrici, sono stati definiti un set di benchmark di consumo elettrico reale per edifici-tipo del terziario pubblico. In tutti i lavori, le elaborazioni condotte, pur non pretendendo di dare una visione esaustiva del comportamento energetico di edifici del terziario del parco nazionale, possono costituire un punto di partenza da cui muovere ulteriori approfondimenti. In particolare, le indagini basate sui dati reali hanno permesso di validare i benchmark identificati come rappresentativi delle destinazioni d'uso prevalenti degli ambienti interni di un edificio riconducibile ai caratteri convenzionali dell'edilizia del terziario.

Oltre all'ambito nazionale, descritto nei precedenti report, l'analisi di indicatori e benchmark è stata applicata anche a studi a carattere regionale; ad esempio, l'indagine in [44] si propone una metodologia di rilievo semplificato da riproporre in situazioni simili attraverso la quale è stato monitorato un campione di edifici scolastici ritenuto rappresentativo dell'intero patrimonio della regione Veneto e per cui è stato valutato il valore medio dell'indice di prestazione energetica per il riscaldamento.

Gli obiettivi generali dell'attività condotta in [45] hanno invece riguardato la caratterizzazione del patrimonio scolastico pubblico della Regione Sardegna, sulla base di una campagna di raccolta dati da cui sono stati determinati gli indicatori di consumo termico ed elettrico in funzione della tipologia di scuola (primaria e secondaria di primo e secondo grado) del territorio di Sulcis Iglesiente.

Analogamente in [46] è stato approfondito lo stato del patrimonio scolastico della Regione Lazio, costruendo una banca dati composta dagli indicatori descrittivi degli edifici scolastici, tra cui quelli di consumo specifico termico ed elettrico in funzione della zona climatica.

In ultimo, in [47] è stato individuato un ristretto campione di edifici scolastici rappresentativo del patrimonio edilizio siciliano, simulando dinamicamente tre edifici di differenti gradi di istruzione (scuole elementare, media e superiore). Le prestazioni energetiche dei tre edifici sono state analizzate attraverso un set di indicatori di consumo specifico per il riscaldamento, al fine di ottenere valori di benchmark per il patrimonio edilizio scolastico della Regione Sicilia.

Oltre a studi di carattere nazionale e regionale, sussistono ulteriori studi di carattere trasversale, ossia indipendenti dalla collocazione geografica e volti a fornire riferimenti metodologici. Risulta un esempio il lavoro in [48] dove sono stati definiti gli indicatori prestazionali per caratterizzare le performance energetico-ambientali sempre di edifici scolastici. Per ciascun indicatore sono state fornite indicazioni utili per le misure e il monitoraggio con lo scopo di valutare le prestazioni dell'edificio nello stato di fatto e quelle a seguito di interventi di riqualificazione energetica sui componenti di involucro o di impianto.

In [49] si propone, invece, un quadro metodologico semplificato per la valutazione dei risparmi energetici delle scuole, tenendo in considerazione i fattori di normalizzazione dei consumi che incidono sugli indicatori di prestazione energetica, quali il contesto climatico, la variabilità di occupazione degli ambienti e la modalità di gestione e conduzione degli impianti.

Lo studio in [50], invece, proseguito e ampliato in [51] e [52], assolve il compito di validare sul campo la funzionalità della scheda di censimento ENEA per la valutazione energetica semplificata delle scuole e denominata "PELL Edifici Scolastici". Con i dati acquisiti, a mezzo scheda, si perviene al calcolo degli indicatori di consumo termico, elettrico ed idrico, in funzione della geometria degli edifici e della numerosità di aule ed allievi per diversi edifici scolastici della provincia di Roma.

Le analisi eseguite conducono alla costruzione di banche dati dedicate all'efficienza energetica delle scuole. In particolare, in [53] risiede il sistema informativo sui consumi energetici del CRESME che contiene la banca dati sui consumi energetici annuali (elettrici e termici) e sulle caratteristiche degli edifici scolastici (scuole pubbliche dell'infanzia, primarie, secondarie di primo e secondo grado).

Dalla disamina presentata sull'impiego di indicatori e benchmark in ambito energetico, emerge come questo tema sia fortemente necessario nell'individuazione e confronto delle prestazioni energetiche di varie categorie di edifici. Si evidenzia, inoltre, in queste analisi l'importanza di delineare degli indicatori in base a parametri chiave, tra quelli che maggiormente influenzano il comportamento energetico dei vari casi studio. Tra questi, quelli maggiormente utilizzati sono i parametri climatici e geometrici.

Tuttavia, dai precedenti report di Ricerca di Sistema Elettrico, la tematica degli indicatori energetici non è stata particolarmente approfondita per le destinazioni d'uso maggiormente ricorrenti sul territorio nazionale emerse in [1], quali le abitazioni, gli uffici e le attività commerciali. Inoltre, gli indicatori analizzati sono spesso identificati con una metodologia di tipo tailored, quindi lontana da quella più largamente utilizzata nell'APE, ovvero l'asset rating.

Lo stato dell'arte ha evidenziato come lo sviluppo di appositi benchmark necessiti di un campione di dati rappresentativo che generalmente è valutato con la metodologia tailored richiedendo un dispendio di tempo e di calcolo non trascurabile; questa importante conclusione che è emersa dall'analisi, conferma ancora di più le potenzialità del lavoro svolto, in quanto qualora si riuscisse a trovare un legame tra l'asset rating (APE) e il tailored rating, risultato raggiunto nella presente linea di ricerca, si aprirebbero scenari applicativi di notevole interesse.

### 2.3.3 Livelli di disaggregazione degli indicatori

Come visto dalla precedente analisi dello stato dell'arte, gli indicatori permettono sostanzialmente di restituire informazioni sui tre elementi del modello Determinanti, Stato e Risposte (DSR) dell'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE) che rappresenta uno strumento di supporto al fine di identificare le criticità, valutare gli impatti e comprendere i meccanismi di causa-effetto [12].

In accordo con quanto detto, risulta possibile individuare una gerarchia degli indicatori, quindi una modalità di espressione degli stessi in funzione del grado di approfondimento, ossia del livello di aggregazione.

Gli indicatori aggregati restituiscono informazioni di massima che, in linea generale, non consentono l'individuazione di misure politiche e di interventi di miglioramento dell'efficienza energetica. Informazioni di maggiore dettaglio sono necessarie per comprendere i fattori chiave del consumo energetico e fornire gli indirizzi politici che possano influenzare gli andamenti decisionali. Gli indicatori disaggregati, invece, forniscono una misura calzante dell'efficienza energetica riferita ai settori e agli usi finali dell'energia.

Ad ogni modo, la scelta del livello di aggregazione nel calcolo degli indicatori risulta funzione delle priorità politiche, delle caratteristiche del contesto indagato, delle risorse impiegabili e, soprattutto, della disponibilità di dati. È quindi necessario avere presenti gli obiettivi per capire, oltre la tipologia dell'indicatore desiderato, il suo livello di aggregazione da adottare.

È stata condotta un'analisi ad hoc finalizzata a determinare i possibili livelli di disaggregazione che può presentare un indicatore energetico con lo scopo di individuare quelli che potrebbero essere idonei ed efficaci per il raggiungimento degli obiettivi del presente lavoro.

Nel primo livello di disaggregazione (Figura 2), l'indicatore può essere suddiviso in quattro ambiti (forma di energia, dimensione del sistema, settore della domanda di energia, usi finali della stessa) rappresentanti le principali tematiche di cui è funzione l'indicatore che si vuole identificare.

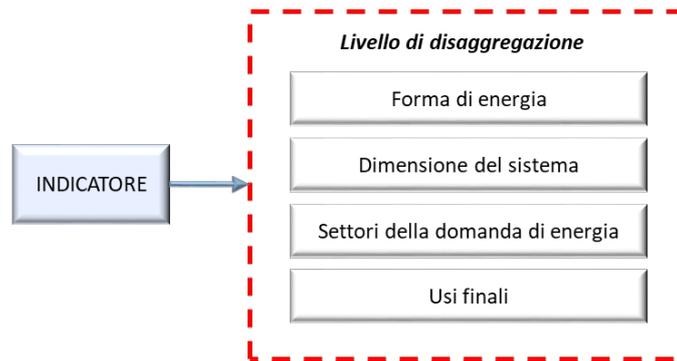


Figura 2 – Primo livello di disaggregazione dell'indicatore.

Ogni ambito del primo livello di disaggregazione può essere ulteriormente disaggregato, in modo tale da identificare e associare quei parametri che saranno poi le effettive componenti dell'indicatore. La forma di energia (primo ambito) può essere espressa come energia primaria o energia finale (Figura 3), la quale a sua volta si può distinguere in energia termica o elettrica.

La dimensione del sistema oggetto di indagine può essere estremamente variabile e disaggregata in un secondo livello composto da dimensioni "macro" e dimensioni "micro" come mostrato in Figura 4. Nel primo caso, si persegue l'approccio di determinazione del consumo energetico scegliendo una o più scale che vanno da quella mondiale fino a quella cittadina; nel secondo caso, la valutazione può essere riferita al singolo edificio, all'unità immobiliare o al solo impianto utilizzato per la copertura di uno specifico servizio energetico.

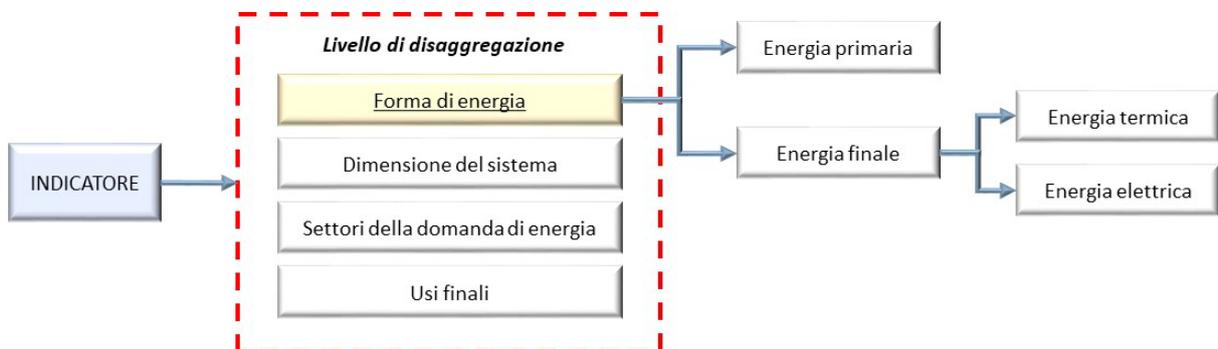


Figura 3 – Secondo livello di disaggregazione dell'indicatore: forma di energia.

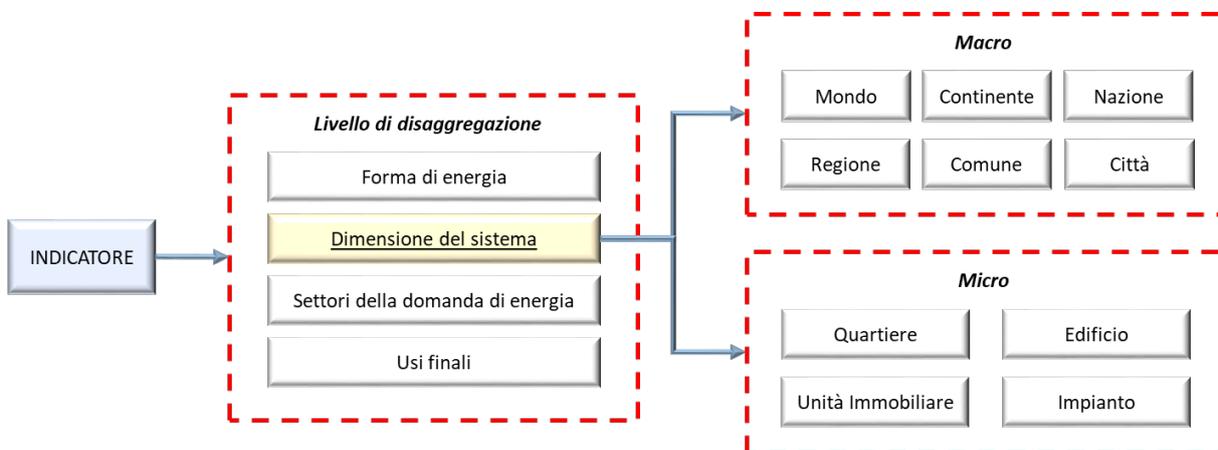


Figura 4 – Secondo livello di disaggregazione dell'indicatore: dimensione del sistema.

Per ogni dimensione macro o micro, quindi, gli indicatori possono consentire il confronto su più scale di dettaglio delle performance energetiche, il popolamento delle banche dati che si configurano come basi statistiche conoscitive, la determinazione dei valori limite di consumo, energetico da inserire nell'apparato normativo, l'ammissione a programmi per la ricerca e la sostenibilità e a fondi di finanziamento per l'efficienza energetica e l'accesso a sistemi incentivanti per l'efficienza energetica basati su criteri prestazionali minimi.

In riferimento all'ambito dei settori della domanda di energia si può operare la segmentazione mostrata in Figura 5 rappresentativi delle destinazioni d'uso come da categorie normate in [4].

Nel calcolo dell'indicatore per l'ambito del livello di disaggregazione collegato agli usi finali dell'energia (Figura 6), si è fatto riferimento ai servizi energetici potenzialmente installabili nell'immobile, sulla base del D.M. 26/06/2015 [11]: produzione di acqua calda sanitaria, riscaldamento, raffrescamento, ventilazione meccanica, illuminazione artificiale e trasporto di persone o cose (ossia a mezzo impianti ascensori e scale mobili). Si tiene a precisare che la suddivisione mostrata in Figura 6 può essere anche variata includendo o escludendo specifici servizi energetici, come ad esempio il consumo elettrico legato ad apparecchiature, in funzione degli obiettivi da raggiungere. Nel presente lavoro, in considerazione dell'obiettivo primario dell'attività di ricerca, la scelta dei servizi energetici è ricaduta su quelli che possono essere considerati nell'APE, ossia quelli indicati in [11].

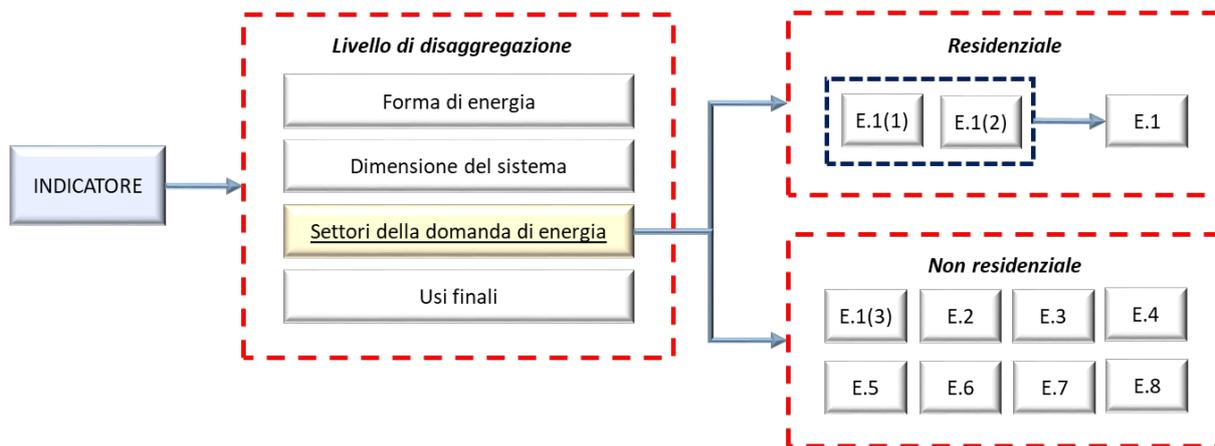


Figura 5 – Secondo livello di disaggregazione dell'indicatore: settori della domanda di energia.

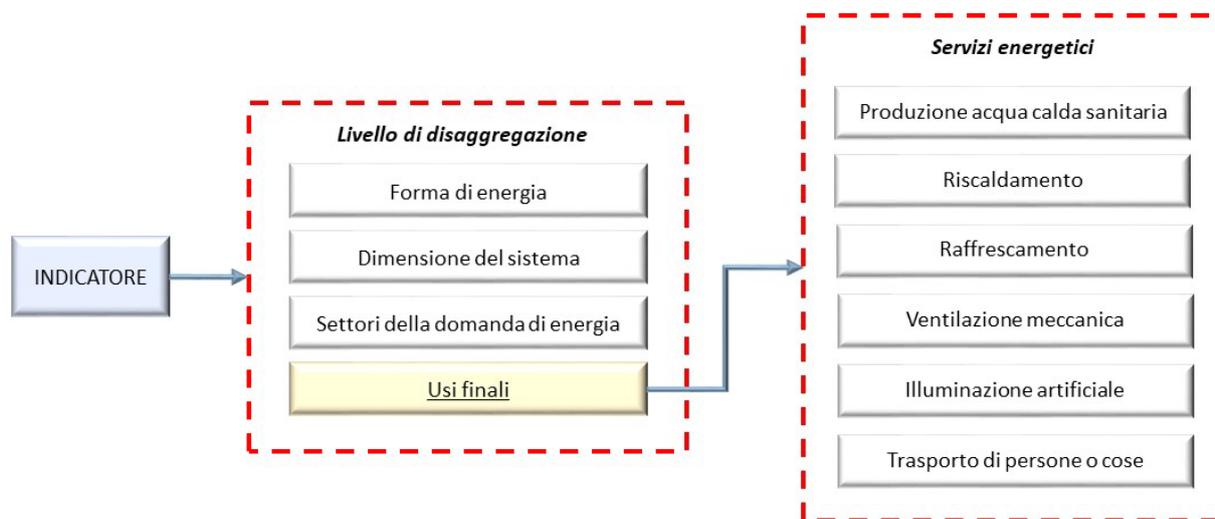


Figura 6 – Secondo livello di disaggregazione dell'indicatore: usi finali.

Una volta fornita una prima possibile disaggregazione dell'indicatore, l'analisi è proseguita andando a identificare quei livelli che possono essere più adatti per definire correttamente l'indicatore tailored in funzione di quello derivante dal calcolo asset.

In considerazione del campo di applicazione oggetto di studio (edifici), la ricerca delle equazioni di correlazione (paragrafo 2.5) si baserà su un'unica forma di energia (energia primaria) mentre per la definizione dei benchmark (paragrafo 2.6) si farà riferimento anche a forme di energia finale.

L'analisi presenterà una dimensione del sistema sia macro che micro; infatti, se da un lato permette di correlare informazioni su base nazionale, descrivendo le caratteristiche specifiche di diverse zone climatiche (quindi rappresentanti regioni, comuni e città), dall'altro restituirà informazioni dettagliate sul comportamento del sistema edificio-impianto, ovvero le dimensioni della singola unità immobiliare e dell'impianto.

Come ampiamente discusso in [1], le destinazioni d'uso preminenti sul territorio nazionale sono le abitazioni (E.1), gli uffici (E.2) e le attività commerciali (E.5); pertanto, questi saranno i settori di indagine.

Infine, in merito al livello degli usi finali, come motivato in 2.2, l'analisi prenderà in considerazione i servizi preminenti nonché quelli che presentano una significativa variazione di valutazione dell'energia applicando i due approcci di calcolo (asset rating e tailored rating); questi sono i servizi di produzione di acqua calda sanitaria, di riscaldamento e di raffrescamento.

I livelli delineati e adottati nel presente lavoro per il raggiungimento degli obiettivi preposti sono schematizzati Figura 7; in particolare, una volta definito l'indicatore in considerazione dei livelli di aggregazione scelti, si proseguirà con il calcolo quantitativo dei benchmark che saranno legati all'energia primaria, alle dimensioni del sistema, ai settori della domanda di energia e agli usi finali precedentemente selezionati. Infine, i benchmark associati all'energia primaria saranno correlati a parametri quali il vettore energetico e il costo unitario dello stesso, al fine di ottenere benchmark di consumo del vettore energetico e di spesa media annua.

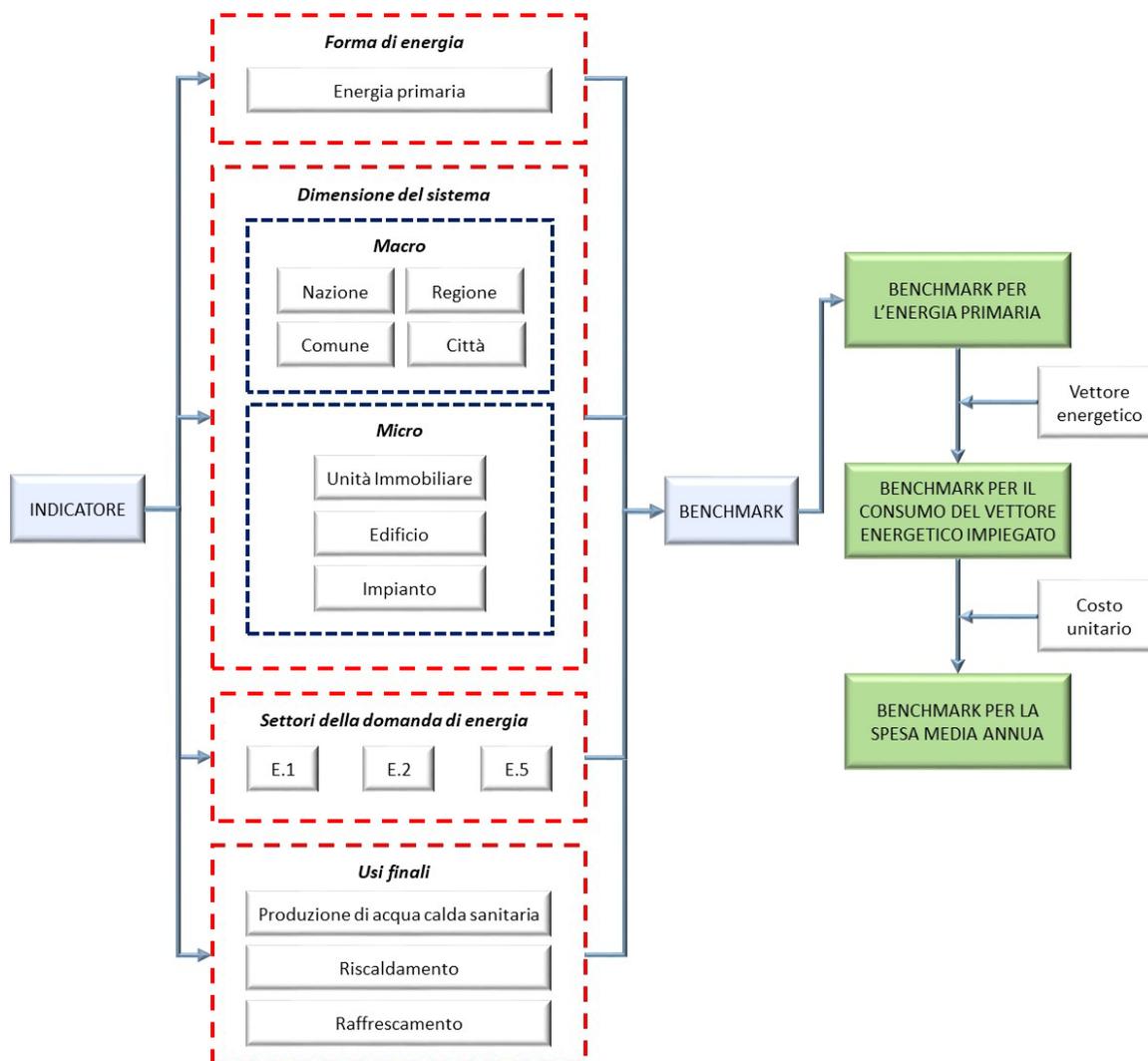


Figura 7 – Livelli di disaggregazione dell'indicatore adottati e benchmark risultanti.

Si precisa che l'indagine per livelli di disaggregazione è stata svolta per macro-ambiti, non valutando i numerosi parametri che influenzano la composizione di un indicatore in ambito energetico. Gli indici di prestazione energetica, infatti, devono tenere conto, ad esempio, del contesto di ogni destinazione d'uso, i cui consumi variano secondo parametri diversi. A titolo esemplificativo, nel settore residenziale sugli usi finali di energia pesano i miglioramenti dell'efficienza energetica complessiva, i cambiamenti nella popolazione, il mix energetico, i tassi di urbanizzazione, il numero di abitazioni occupate, gli abitanti per famiglia, le dimensioni e la tipologia dell'abitazione, le caratteristiche dell'edificio e l'anno di costruzione, il livello di reddito, le preferenze e il comportamento dei consumatori, la disponibilità di energia, le condizioni climatiche, le caratteristiche degli elettrodomestici e il tasso di penetrazione degli impianti [12].

Invece, il principale fattore che influenza il consumo di energia nel settore terziario è il livello di attività economica che si esprime, usualmente, attraverso il parametro del valore aggiunto del settore. Inoltre, altri parametri di influenza per questo settore sono anche la superficie utile, la tipologia di edificio, l'anno di costruzione, la maturità dell'economia, la gestione dell'energia dell'edificio, il reddito pro-capite, le condizioni climatiche e i miglioramenti dell'efficienza energetica. Inoltre, il profilo economico e demografico ha un impatto sulla struttura del settore [12].

Dei suddetti parametri, però, si è tenuto conto di quelli ritenuti più rilevanti all'interno sia della definizione dei casi studio (paragrafo 2.4) e dei profili di utilizzo, che nella definizione delle equazioni di correlazione tra asset rating e tailored rating (paragrafo 2.5). Quest'ultime, in particolare, si svilupperanno a partire dagli indicatori di prestazione energetica dell'APE, che intrinsecamente considerano già tutti questi parametri.

Inoltre, per permettere la possibilità di confrontare i benchmark calcolati attraverso l'indicatore per edifici diversi, questo è stato integrato con fattori di normalizzazione. Ad esempio, il confronto tra immobili ubicati in zone climatiche diverse è permesso attraverso l'integrazione dei Gradi Giorno nel calcolo dell'indicatore di prestazione energetica per il riscaldamento.

### 2.3.4 Applicativi ENEA

L'ENEA ha sviluppato due applicazioni (SafeSchool 4.0 e Condomini+ 4.0) il cui impiego è riservato a tecnici specializzati nell'ambito dell'art.13 del D. Lgs. 102/2014 [56], normativa che fa riferimento al piano di informazione e formazione rivolto alla Pubblica Amministrazione, alle Piccole e Medie Imprese, agli Istituti bancari, alle famiglie e agli studenti, avente come obiettivo principale quello di promuovere l'efficienza energetica e fornire gli strumenti per implementarla.

Entrambi gli applicativi sono un esempio di applicazione degli indicatori nell'ambito energetico per l'analisi delle categorie di edificio afferenti alle scuole e ai condomini. In particolare, SafeSchool 4.0 può essere utilizzata per le scuole aventi, esclusivamente, un impianto di riscaldamento di tipo centralizzato e per l'esame di tutte le utenze elettriche, mentre Condomini+ 4.0, può essere impiegata per gli edifici condominiali caratterizzati da un impianto di riscaldamento centralizzato e per l'analisi delle utenze elettriche condivise (quali, ad esempio, l'illuminazione delle parti comuni ed, eventualmente, gli impianti ascensori).

Uno degli output più interessanti restituiti dagli applicativi e pertinente con l'obiettivo del presente lavoro, è sicuramente quello degli indicatori espressi come classi di merito per il riscaldamento e l'energia elettrica, riportate, sinteticamente, in Tabella 2 per SafeSchool 4.0 e in Tabella 3 per Condomini+ 4.0.

Le due classi attribuite rispettivamente al riscaldamento all'energia elettrica sono stabilite sulla base del valore assunto dall'indicatore energetico normalizzato stesso, assumendo tre possibili valori sulla scala semaforica: buona, sufficiente e insufficiente.

La determinazione dei valori estremi degli intervalli delle scale è stata eseguita attraverso l'analisi di molteplici dati riferiti alle scuole o agli edifici condominiali su tutto il territorio nazionale. Per gli edifici scolastici, tali valori estremi cambiano in funzione della tipologia di scuola. Infatti, in riferimento al riscaldamento per le scuole materne, si evince l'aspetto per il quale, fisiologicamente, il fabbisogno energetico aumenta al diminuire dell'età degli alunni, mentre, per l'energia elettrica, il fabbisogno aumenta al crescere della numerosità e dell'assorbimento delle apparecchiature impiegate.

L'individuazione della classe di merito si esegue automaticamente inserendo nella scala semaforica l'indicatore di prestazione energetica normalizzato calcolato in entrambi gli applicativi; solo per Condomini+ 4.0 non è stata applicata una differenziazione della scala per tipologia di condominio.

Il calcolo automatico degli indicatori di prestazione energetica per il riscaldamento e l'energia elettrica delle scuole e dei condomini scaturisce dall'implementazione negli applicativi delle formule matematiche riportate, rispettivamente, in Tabella 4 e in Tabella 5. Esse rispondono alla definizione di base dell'indicatore intesa come il rapporto fra il consumo energetico e il fattore di aggiustamento (in tal caso, trattasi del dato geometrico) e, in aggiunta, contengono i fattori di normalizzazione e correttivi per consentire la comparazione delle scuole o dei condomini, su tutto il territorio nazionale.

Tabella 2 – SafeSchool 4.0: classi di merito per il riscaldamento e per l'energia elettrica.

Tipologia di scuola	Indice di prestazione energetica normalizzato	Classe di Merito		
		BUONA	SUFFICIENTE	INSUFFICIENTE
Materna	Riscaldamento [Wh/(m <sup>3</sup> GGanno)]	<13.5	13.5÷18.5	>18.5
Elementare		<4.5	4.5÷11	>11
Media, Secondaria superiore		<7	7÷11.5	>11.5
Materna	Energia elettrica [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]	<11	11÷16.5	>16.5
Elementare, Media, Secondaria superiore (eccetto *)		<9	9÷12	>12
Istituti Professionali e Tecnici Industriali (*)		<12.5	12.5÷15.5	>15.5

Tabella 3 – Condomini+ 4.0: classi di merito per il riscaldamento e per l’energia elettrica.

Indicatore di prestazione energetica normalizzato	Classe di merito		
	BUONA	SUFFICIENTE	INSUFFICIENTE
Riscaldamento [Wh/(m <sup>3</sup> GGanno)]	≤13	13÷16	≥16
Energia elettrica [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]	≤1.5	1.5÷2.5	≥2.5

Tabella 4 – SafeSchool 4.0: formulazioni matematiche degli indicatori di prestazione energetica normalizzati per il riscaldamento e l’energia elettrica.

Servizio energetico	Indicatore normalizzato	Grandezze
Riscaldamento	$I_{ENR} = \frac{CxFexFh}{VxGG}$	I <sub>ENR</sub> Indicatore di prestazione energetica normalizzato [Wh/(m <sup>3</sup> GGanno)]
		C Consumo medio annuo di energia termica [Wh]
		V Volume lordo riscaldato [m <sup>3</sup> ]
		GG Gradi Giorno [GG]
		Fe Fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell’edificio [-]
		Fh Fattore di normalizzazione legato al regime di funzionamento dell’impianto termico/elettrico (ore di accensione giornaliere) [-]
Energia elettrica	$I_{ENE} = \frac{ExFh}{Su}$	I <sub>ENE</sub> Indicatore di prestazione energetica normalizzato [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		E Consumo medio annuo di energia elettrica [kWh]
		Su Superficie utile netta [m <sup>2</sup> ]
		Fh Fattore di normalizzazione legato al regime di funzionamento dell’impianto termico/elettrico (ore di accensione giornaliere) [-]

Tabella 5 – Condomini+ 4.0: formulazioni matematiche degli indicatori di prestazione energetica normalizzati per il riscaldamento e l’energia elettrica.

Servizio energetico	Indicatore normalizzato	Grandezze
Riscaldamento	$I_{ENR} = \frac{CxFexFhxFTA}{VxGGxFmr}$	I <sub>ENR</sub> Indicatore di prestazione energetica normalizzato [Wh/(m <sup>3</sup> GGanno)]
		C Consumo medio annuo di energia termica [Wh]
		V Volume lordo riscaldato [m <sup>3</sup> ]
		GG Gradi Giorno [GG]
		Fe Fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell’edificio [-]
		Fh Fattore di normalizzazione legato al regime di funzionamento dell’impianto termico/elettrico (ore di accensione giornaliere) [-]
		Fta Fattore correttivo relativo al comfort indoor invernale [-]
		Fmr Fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell’impianto termico (mesi di attivazione annuali) [-]
Energia elettrica	$I_{ENE} = \frac{ExFhxFus}{SuxFme}$	I <sub>ENE</sub> Indicatore di prestazione energetica normalizzato [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		E Consumo medio annuo di energia elettrica [kWh]
		Su Superficie utile netta [m <sup>2</sup> ]
		Fh Fattore di normalizzazione legato al regime di funzionamento dell’impianto termico/elettrico (ore di accensione giornaliere) [-]
		Fus Fattore correttivo connesso alla presenza di utenze speciali [-]
		Fme Fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell’impianto elettrico (mesi di attivazione annuali) [-]

Per le scuole, nell’equazione dell’indicatore di prestazione energetica normalizzato per il riscaldamento si tiene conto degli effetti di:

- geometria dell’edificio: attraverso il fattore Fe (Tabella 6) che varia in funzione della tipologia di scuola e del rapporto di forma, ossia il rapporto tra la superficie disperdente e il volume lordo riscaldato dell’edificio;

- regime di funzionamento dell’impianto di riscaldamento: il fattore  $F_h$  (Tabella 7) considera il numero di ore di accensione giornaliera (h/giorno) che possono essere inserite dall’utente oppure impostate automaticamente in funzione della zona climatica del Comune di appartenenza dell’edificio come prescritto dal D.P.R. 74/2013 [54].

L’adozione di tali fattori di normalizzazione permette la comparazione fra scuole con diverse specifiche di involucro e impianti. Nella formula matematica dell’indicatore di prestazione energetica normalizzato per l’energia elettrica si considerano, invece, i soli effetti del regime di funzionamento dell’impianto elettrico, attraverso il fattore  $F_h$  (Tabella 7). L’impiego di tale fattore di normalizzazione consente il confronto fra scuole caratterizzate da un diverso orario di funzionamento degli impianti.

Lo sviluppo successivo di Condomini+ 4.0 rispetto a Safeschool 4.0 ha consentito di eseguire approfondimenti che hanno condotto all’affinamento del fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell’edificio, esplicitando la dipendenza dello stesso dai parametri climatici e all’introduzione di ulteriori fattori correttivi legati al comfort indoor, al regime di funzionamento degli impianti e alla presenza di utenze speciali nel condominio.

In particolare, nella formula matematica dell’indicatore di prestazione energetica normalizzato per il riscaldamento dei condomini si tiene conto degli effetti di:

- geometria dell’edificio: attraverso il fattore  $F_e$  (Tabella 8) derivante dalla combinazione del rapporto di forma dell’edificio e dei Gradi Giorno del Comune di appartenenza. Ai valori non acquisibili direttamente dalla Tabella 8, si perviene per interpolazione lineare;
- regime di funzionamento dell’impianto di riscaldamento: in questo caso si determinano due fattori,  $F_h$  e  $F_{mr}$ , dove il primo (Tabella 7) considera il numero di ore di accensione giornaliera (h/giorno) che possono essere inserite dall’utente oppure impostate automaticamente in funzione della zona climatica del Comune di appartenenza dell’edificio come prescritto dal D.P.R. 74/2013 [54], mentre il secondo (Tabella 9) è legato al regime di funzionamento dell’impianto termico in termini di numero di mesi di attivazione annuali anch’esso fornito dall’utente o determinato sulla base di [54]. Nel caso in cui il numero di mesi coincida esattamente con quello fornito da [54] si assume un valore di  $F_{mr}$  unitario;
- condizioni di comfort indoor: mediante il fattore  $F_{ta}$  si tiene conto della differenza della temperatura ambiente impostata dagli occupanti rispetto a quello di garanzia del comfort indoor invernale pari a 20° C ai sensi di [54]. Il fattore  $F_{ta}$  (Tabella 10) aumenta con l’aumentare di questa differenza (maggiorazione del 6% per ogni grado di differenza).

Tabella 6 – SafeSchool 4.0: fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell’edificio ( $F_e$ ) in funzione del valore assunto dal rapporto di forma dell’edificio.

<b>Rapporto di forma (S/V) [1/m] per tipologia di scuola</b>			<b>Fattore di normalizzazione (<math>F_e</math>)</b>
<b>Materna</b>	<b>Elementare</b>	<b>Media e Secondaria superiore</b>	
$\leq 0.4$	$\leq 0.3$	-	1.2
$0.41 \div 0.5$	$0.31 \div 0.35$	$\leq 0.25$	1.1
$0.51 \div 0.6$	$0.36 \div 0.4$	$0.26 \div 0.3$	1
$> 0.6$	$0.41 \div 0.45$	$0.31 \div 0.4$	0.9
	$> 0.45$	$> 0.4$	0.8

Tabella 7 – SafeSchool 4.0 e Condomini+ 4.0: fattore di normalizzazione legato al regime di funzionamento dell'impianto termico/elettrico (ore di accensione giornaliere)

Ore di accensione giornaliere [h/giorno]	Fattore di normalizzazione (Fh)
≤6	1.2
7	1.1
8÷9	1
10÷11	0.9
>11	0.8

L'impiego di tali fattori di normalizzazione e correttivi consente il confronto fra condomini con differenti caratteristiche di involucro, impianti e comportamento degli occupanti.

Nella formula matematica dell'indicatore di prestazione energetica normalizzato per l'energia elettrica si considerano invece gli effetti di:

- regime di funzionamento dell'impianto elettrico: attraverso due fattori che permettono di tener conto delle ore di accensione giornaliere (Fh - Tabella 7) e dei mesi di funzionamento (Fme ) al quale si perviene eseguendo il rapporto tra il numero di mesi di funzionamento e il numero di mesi dell'anno (Tabella 9). Il numero di mesi di attivazione viene accertato o considerato pari a quello dell'intera annualità, nell'ultimo caso, il fattore correttivo risulta unitario;
- presenza di utenze speciali: queste generalmente comportano un assorbimento di energia elettrica non trascurabile e sono tipiche in destinazioni quali piscina, sauna, palestra, nonché tipiche per la gestione del verde (impianti di irrigazione automatica). In funzione dell'utenza si associa il fattore correttivo (Fus) mostrato in Tabella 11. Nel caso di presenza contemporanea di più utenze speciali, il fattore correttivo da utilizzare è quello restituito dal prodotto dei rispettivi fattori, mentre in caso di assenza di utenze speciali si assume un fattore correttivo unitario.

L'impiego di tali fattori di normalizzazione e correttivi consente il confronto fra condomini con differenti caratteristiche di impianti e utenze esistenti.

Tabella 8 – Condomini + 4.0: fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell'edificio (Fe).

Rapporto di forma [1/m]	Fattore di normalizzazione (Fe) al variare dei Gradi Giorno									
	≤600	601÷900	901÷1400	1401÷2100	2101÷3000	> 3000				
≤0.3	1.4	1.4	1.35	1.35	1.3	1.3	1.25	1.25	1.25	1.25
0.31÷0.35	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.15	1.15	1.15	1.15
0.36÷0.4	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
0.41÷0.45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.46÷0.5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
0.51÷0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85
>0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.65	0.65	0.7	0.7	0.7	0.7

Tabella 9 – Condomini + 4.0: fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell'impianto termico (mesi di attivazione annuali).

Zona climatica	Stagione di riscaldamento [54]	Inverso numero di mesi stagione di riscaldamento	Fattore correttivo (Fmr)
A	1 dicembre ÷ 15 marzo	$1/3.5 = 0.286$	$0.286 \cdot n. \text{ mesi}$
B	1 dicembre ÷ 31 marzo	$1/4 = 0.250$	$0.250 \cdot n. \text{ mesi}$
C	15 novembre ÷ 31 marzo	$1/4.5 = 0.222$	$0.222 \cdot n. \text{ mesi}$
D	1 novembre ÷ 15 aprile	$1/5.5 = 0.182$	$0.182 \cdot n. \text{ mesi}$
E	15 ottobre ÷ 15 aprile	$1/6 = 0.167$	$0.167 \cdot n. \text{ mesi}$
F	Nessuna limitazione	$1/7 = 0.143$	$0.143 \cdot n. \text{ mesi}$

Tabella 10 – Condomini +4.0: fattore correttivo relativo alle condizioni di temperatura interna dell’ambiente

<i>Temperatura dell’aria interna [°C]</i>	<i>Fattore di correttivo (Fta)</i>
19	1.06
18	1.12
17	1.18
16	1.24

Tabella 11 – Condomini+4.0: fattore correttivo connesso alla presenza di utenze speciali.

<i>Utenze speciali [-]</i>	<i>Fattore correttivo (Fus)</i>
<i>Piscina</i>	0.98
<i>Sauna</i>	0.97
<i>Palestra</i>	0.99
<i>Gestione del verde</i>	0.98
<i>Nessuna</i>	1

### 2.3.5 Estensione dell’applicativo ENEA

Come descritto, l’approccio degli applicativi ENEA è relativo al solo servizio di riscaldamento; per questo motivo, nel presente lavoro è stata effettuata un’ulteriore indagine per estendere tale approccio anche al servizio energetico di raffrescamento. In analogia al riscaldamento, nella formula matematica dell’indicatore di prestazione energetica normalizzato per il raffrescamento si tiene conto degli effetti di:

- regime di funzionamento dell’impianto di raffrescamento: attraverso un fattore correttivo  $F_h$  che tenga conto delle ore di accensione giornaliere (h/g) e di un altro ( $F_{mc}$ ) che consideri il numero di mesi di attivazione annuali. In analogia con l’applicativo ENEA, il fattore  $F_h$  può essere desunto dalla Tabella 7 a partire dalle ore giornaliere di accensione. Diversamente dal riscaldamento, non esistendo riferimenti normativi circa le zone climatiche estive e i relativi periodi di raffrescamento; si è deciso, quindi, di considerare una zonizzazione del territorio italiano in zone climatiche estive con durata delle stagioni di raffrescamento coerenti con [57]. Il fattore  $F_{mc}$ , quindi, è ricavato dalla Tabella 12 in considerazione del numero di mesi di accensione effettivo rispetto a quello previsto per la stagione di raffrescamento. Anche per il raffrescamento, in caso di coincidenza del numero dei mesi con quelli previsti nella stagione estiva, si assume un fattore correttivo unitario;
- condizioni di comfort indoor estivo: si considera un fattore correttivo ( $F_{tc}$ ) in funzione della differenza di temperatura interna dell’ambiente impostata dagli occupanti con quella ai sensi di [54] per garantire le condizioni di comfort (per le abitazioni pari a 26°C). Analogamente al riscaldamento, si assume una maggiorazione del 6% per ogni grado di differenza (Tabella 13).

Tabella 12 – Fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell’impianto di raffrescamento (mesi di attivazione annuali).

<i>Zona climatica</i>	<i>Stagione di raffrescamento [57]</i>		<i>Inverso numero di mesi stagione di raffrescamento</i>	<i>Fattore correttivo (Fmr)</i>
	<i>Fine della settimana</i>	<i>Inizio della settimana</i>		
<i>A</i>	3 <sup>a</sup> di giugno	4 <sup>a</sup> di agosto	$1/2 = 0.500$	$0.500 \cdot n. \text{ mesi}$
<i>B</i>	1 <sup>a</sup> di giugno	1 <sup>a</sup> di settembre	$1/2.75 = 0.364$	$0.364 \cdot n. \text{ mesi}$
<i>C</i>	3 <sup>a</sup> di maggio	1 <sup>a</sup> di settembre	$1/3.25 = 0.308$	$0.308 \cdot n. \text{ mesi}$
<i>D</i>	3 <sup>a</sup> di maggio	1 <sup>a</sup> di settembre	$1/3.25 = 0.308$	$0.308 \cdot n. \text{ mesi}$
<i>E</i>	3 <sup>a</sup> di maggio	2 <sup>a</sup> di settembre	$1/3.5 = 0.286$	$0.286 \cdot n. \text{ mesi}$

Tabella 13 – fattore correttivo relativo alle condizioni di temperatura interna dell’ambiente

<i>Temperatura dell’aria interna [°C]</i>	<i>Fattore correttivo (Ftc)</i>
27	1.06
28	1.12
29	1.18
30	1.24

### 2.3.6 Progetto ExcEED

Il progetto European Energy Efficient building district Database (ExcEED) fornisce una risposta alle esigenze di trasparenza, valutazione dell’attendibilità delle stime sulle prestazioni energetiche degli edifici e comparazione delle stesse. Per avere una panoramica immediata del progetto è possibile fruire del contributo video [58].

I risultati di ExcEED sono strutturati in una banca dati che raccoglie informazioni quantitative e qualitative sugli edifici e sui distretti urbani di ultima generazione, gestite attraverso una piattaforma web. ExcEED, infatti, si configura come il primo esempio di piattaforma web europea completa sulla gestione dei dati anagrafici e prestazionali degli edifici. La piattaforma risulta un efficace strumento di caratterizzazione e benchmarking delle performance degli edifici. Infatti, l’impiego di strumenti avanzati, il calcolo degli indicatori di prestazione energetica e la connessione con altri archivi dati dell’Unione Europea consentono l’analisi della performance energetica sia nell’ambito del singolo edificio, che del quartiere, garantendo il monitoraggio a diversa scala: europea, nazionale e regionale.

Il progetto innesca un processo virtuoso, nel quale le informazioni generano conoscenza attraverso un’analisi puntuale del costruito. Di conseguenza, ExcEED risulta un elemento di supporto ai soggetti chiave operanti nel settore edilizio, come progettisti, energy manager e legislatori.

La carenza di uniformità nel raccogliere e registrare i dati energetici ottenuti per l’edificio rende tali informazioni difficoltose da rintracciare e analizzare in prospettiva futura. La piattaforma ExcEED restituisce una soluzione a tale criticità, in quanto integrata di una procedura standardizzata di raccolta, etichettatura e registrazione dei dati energetici dell’edificio e di altre informazioni all’interno della banca dati [59].

La piattaforma contiene 27 indicatori di prestazione energetica (Key Performance Indicators - KPI) classificati in 6 categorie, quali energia termica, energia elettrica, tecnologia, ambiente, fonti rinnovabili e qualità dell’ambiente indoor.

I 27 KPI, raggruppati per servizio energetico in Tabella 14 e in Tabella 15, si possono applicare all’intero ciclo di vita dell’edificio e vengono prima calcolati attraverso modelli di simulazione, mentre in una seconda fase si procede alla misura. L’adozione dei KPI permette il confronto fra le performance energetiche simulate e quelle reali dell’edificio. Inoltre, le prestazioni reali si possono raffrontare con gli indicatori, di modo da consentire l’individuazione delle aree di intervento per l’edificio. Considerate l’utilità e la versatilità dell’impiego dei KPI, essi si configurano come elementi di supporto al processo decisionale sia nella fase di progettazione che in quella operativa.

A ottobre 2019, la piattaforma è stata rinominata Enbuibench (ENergy and comfort BUilding performance characterization and BENCHmarking platform). Tale piattaforma viene gestita dall’Accademia Europea di Bolzano (EURAC) ed è caratterizzata dalla fruizione gratuita fino all’autunno 2020.

Tabella 14 – Indicatori di Prestazione Energetica KPI del progetto ExcEED: riscaldamento e raffrescamento.

<i>Ambito e numero dei KPI</i>	<i>Descrizione dei KPI</i>
<i>Riscaldamento</i>	1 Consumo complessivo riferito all'unità di superficie riscaldata
	2 Consumo riferito all'unità di superficie riscaldata ed ai Gradi Giorno
	3 Potenza massima del generatore normalizzata rispetto alla superficie riscaldata
	4 Numero di ore di surriscaldamento (numero di ore nelle quali la temperatura indoor risulta > 21°C e l'impianto di riscaldamento è funzionante)
	5 Efficienza stagionale della pompa di calore (COP)
<i>Raffrescamento</i>	1 Consumo totale riferito all'unità di superficie raffrescata
	2 Consumo totale riferito all'unità di superficie raffrescata ed ai Gradi Giorno estivi
	3 Potenza massima del generatore normalizzata rispetto alla superficie raffrescata
	4 Numero di ore di surriscaldamento durante la stagione di raffrescamento (numero di ore nelle quali la temperatura indoor risulta > 27°C)
	5 Numero di ore di sovra-raffrescamento (numero di ore nelle quali la temperatura indoor risulta < 25,5°C e l'impianto di raffrescamento è funzionante)

Tabella 15 – Indicatori di Prestazione Energetica KPI del progetto ExcEED: energia elettrica e altri campi di applicazione.

<i>Ambito e numero dei KPI</i>	<i>Descrizione dei KPI</i>
<i>Energia elettrica</i>	1 Consumo complessivo dell'edificio riferito all'unità di superficie netta
	2 Consumo complessivo per l'illuminazione riferito all'unità di superficie netta
	3 Consumo per l'illuminazione indoor riferito all'unità di superficie netta
	4 Consumo complessivo delle apparecchiature riferito all'unità di superficie netta
	5 Consumo dei sistemi di ventilazione meccanica normalizzato rispetto alla superficie ventilata
	6 Produzione dell'impianto fotovoltaico rispetto al consumo elettrico complessivo dell'edificio
	7 Produzione degli impianti a fonti rinnovabili rispetto al consumo energetico complessivo dell'edificio
	8 Energia primaria generata dagli impianti a fonti rinnovabili rispetto all'energia primaria consumata dall'edificio
<i>Altri campi</i>	1 Portata di fluido della ventilazione meccanica normalizzata rispetto alla superficie ventilata
	2 Livello di concentrazione dell'anidride carbonica (livello di anidride carbonica registrato nello spazio monitorato)
	3 Percentuale di tempo nel quale l'anidride carbonica eccede il valore limite (numero di ore nelle quali il livello di anidride carbonica risulta > 1000 ppm considerando la concentrazione di anidride carbonica all'esterno pari a 400 ppm)
	4 Produzione di energia dell'impianto solare-termico rispetto al consumo di energia termica dell'edificio
	5 Firma energetica (rappresentazione grafica della correlazione fra il consumo di calore e la temperatura dell'aria esterna)
	6 Comfort visivo (Indice di comfort visivo unitario, se illuminamento > 500 lux, altrimenti nullo)
	7 Profilo di temperatura (profilo della temperatura indoor dello spazio monitorato durante le ore di occupazione o di apertura/chiusura)
	8 Profilo di umidità (profilo di umidità dello spazio monitorato durante le ore di occupazione o di apertura/chiusura)
	9 Classe di prestazione energetica (valore acquisito dall'Attestato di Prestazione Energetica - APE dell'edificio)

### 2.3.7 Criticità e considerazioni finali sui indicatori e benchmark

Sulla base della trattazione su indici e benchmark in campo di prestazione energetica fin qui svolta, ovvero l'analisi dello stato dell'arte secondo la normativa esistente e i precedenti report di Ricerca di Sistema Elettrico nazionale sul tema in oggetto, nonché gli applicativi ENEA e il progetto ExCEED e conducendo elaborazioni specifiche, è stata effettuata una sintesi delle formulazioni matematiche degli indicatori di prestazione energetica valutati, in funzione della forma di energia (Tabella 16) e del servizio energetico erogato (Tabella 17 e Tabella 18).

In linea generale, la notazione delle grandezze viene riportata fedele alle fonti; nel caso di grandezze in comune, prevale la notazione a livello europeo del progetto ExCEED. Le minime variazioni apportate sui simboli delle grandezze scaturiscono dall'esigenza di maggiore chiarezza rispetto a tutte le casistiche rappresentate.

In base alla ricerca condotta e descritta in questo paragrafo, emerge come per calcolare gli indicatori con specifiche relazioni matematiche sia necessario procedere con una fase preliminare di raccolta dati. Affinché il processo non diventi troppo dispendioso, è auspicabile selezionare accuratamente la relazione matematica più adatta all'obiettivo e procedere con la raccolta dei soli dati necessari, e possibilmente, più agevoli da reperire.

Come descritto in [60], i dati possono essere reperiti in quattro diversi modi, a partire da fonti amministrative per arrivare a indagini statistiche, misure o modelli di calcolo. Ognuno di questi presenta sia punti di forza che di debolezza, per questo motivo si predilige la combinazione di più metodologie.

Tabella 16 – Sintesi degli indicatori di prestazione energetica in funzione della forma di energia valutata.

<b>Forma di Energia</b>	<b>Formulazione matematica</b>	<b>Definizione parametri</b>	
<i>Energia termica</i>	$Q' = \frac{Q_h}{A(orV)}$	Q'	Indicatore di prestazione termico [Wh/(m <sup>2</sup> anno)] o [kWh/(m <sup>3</sup> anno)]
		Q <sub>h</sub>	Consumo medio annuo di energia termica [kWh]
		A	Superficie utile netta [m <sup>2</sup> ]
		V	Volume lordo riscaldato [m <sup>3</sup> ]
<i>Energia elettrica</i>	$E' = \frac{E}{A}$	E'	Indicatore di prestazione elettrico (kWh/(m <sup>2</sup> anno))
		E	Consumo medio annuo di energia elettrica (kWh)
<i>Energia primaria</i>	$EP = \frac{C}{A(orV)}$	EP	Indicatore di prestazione di energia primaria [tep/(m <sup>2</sup> anno)] o [tep/(m <sup>3</sup> anno)]
		C	Consumo medio annuo di energia primaria [tep]
<i>Fonti rinnovabili</i>	$ESS = \frac{P_{RES}}{C}$	ESS	Autosufficienza energetica da fonti rinnovabili [%]
		P <sub>RES</sub>	Produzione media annua di energia da fonti rinnovabili [tep]

Tabella 17 – Sintesi degli indicatori di prestazione energetica in funzione del servizio energetico erogato (riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria).

<b>Servizio Energetico</b>	<b>Formulazione matematica</b>	<b>Definizione parametri</b>
<b>Riscaldamento</b>	$Q'_h = \frac{Q_h}{A(orV)}$ $Q_h^{norm} = \frac{Q_h}{A(orV)xHDD}$ $Q_h^{norm} = \frac{Q_h x F_e x F_h x F_{ta}}{V x HDD x F_{mr}}$	$Q'_h$ Indicatore di prestazione energetica per il riscaldamento [kWh/(m <sup>2</sup> anno)] o [kWh/(m <sup>3</sup> anno)]
		$Q$ Consumo medio annuo di energia termica per il riscaldamento [kWh]
		$Q'_h^{norm}$ Indicatore di prestazione energetica normalizzato per il riscaldamento [kWh/(m <sup>2</sup> anno)] o [kWh/(m <sup>3</sup> anno)]
		$HDD$ Gradi Giorno per il riscaldamento (GG)
		$F_e$ Fattore di normalizzazione connesso alla geometria dell'edificio [-]
		$F_h$ Fattore di normalizzazione legato al regime di funzionamento dell'impianto (ore di accensione giornaliere) [-]
		$F_{ta}$ Fattore correttivo relativo al comfort indoor invernale [-]
		$F_{mr}$ Fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell'impianto (mesi di attivazione annuali) [-]
<b>Produzione acqua calda sanitaria</b>	$Q'_{hw} = \frac{Q_{hw}}{A}$ $E'_{hw} = \frac{E_{hw}}{A}$	$Q'_{hw}$ Indicatore di prestazione termico per la produzione di ACS [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		$Q_{hw}$ Consumo medio annuo di energia termica per la produzione di ACS [kWh]
		$E'_{hw}$ Indicatore di prestazione elettrico per la produzione di ACS [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		$E_{hw}$ Consumo medio annuo di energia elettrica per la produzione di ACS [kWh]

Tra quelle citate, le fonti amministrative sono quelle con frequenza più regolare che includono dati nazionali quali ad esempio censimenti, Ministeri, servizi pubblici, aziende, università e centri di ricerca, e possono essere adoperati anche per la procedura di validazione dei risultati di una campagna di misura o di un modello matematico. L'indagine statistica, si basa generalmente sull'accurata analisi dei dati raccolti mediante apposite campagne sperimentali (misure) attentamente pianificate e controllate. La misura rappresenta, quindi, lo strumento migliore per la raccolta dei dati nonché il metodo più adatto su cui effettuare valutazioni anche di risparmio energetico. I modelli matematici, invece, possono essere intesi come il collante tra le fonti amministrative, le indagini e le misure. Questi possono essere adoperati per molteplici scopi ma necessitano di una accurata procedura di validazione per poter essere considerati attendibili.

Ovviamente, per tutte le metodologie esposte, la qualità e l'accuratezza dei dati sono degli elementi di fondamentale importanza influenzando significativamente l'output [51].

In accordo con questa breve premessa, in considerazione delle indagini effettuate, la reportistica analizzata di RdS restituisce indicatori, per lo più, basati su campagne di misurazione e implementazione di modelli, gli applicativi ENEA, invece, si basano su fonti amministrative (bollette energetiche e documentazione tecnica), mentre il progetto ExcEED risulta incentrato su modelli e misure.

In considerazione di quanto emerso nello stato dell'arte, la ricerca pianificata e oggetto di questa seconda annualità presenta aspetti estremamente innovativi coniugando sia dati reperiti da fonti amministrative, che dalla modellizzazione. Come anticipato, essa è finalizzata alla definizione di equazioni di correlazione tra l'asset rating e il tailored rating e conseguentemente al calcolo di specifici benchmark per diverse categorie di edificio.

Per il loro sviluppo si è fatto utilizzo di simulazioni parametriche (modelli) basati su edifici di riferimento costruiti a partire da dati disponibili nell'archivio Istat e più in generale in Letteratura (fonti amministrative) nonché dall'analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE) presenti nel Sistema Informativo sugli Attestati di Prestazione Energetica (SIAPE).

Aspetto innovativo rispetto alle attività descritte, è sicuramente quello di correlare un indicatore energetico determinato con un approccio di calcolo tailored (adattato all'utenza) con quelli restituiti dall'asset rating. Nessuno degli indicatori trovati in letteratura, infatti, coniuga gli indicatori dell'APE con indicatori energetici più accurati.

Inoltre, l'utilizzo di potenziali equazioni di correlazione tra asset rating e tailored rating e conseguentemente di benchmark così calcolati, risulterebbe poco dispendioso per l'utente finale in quanto richiederebbe gli stessi dati della metodologia di calcolo semplificata attualmente utilizzata per la redazione degli APE.

Al fini della presente trattazione, in accordo con quanto descritto nel presente paragrafo, si procederà con il calcolo sia di indicatori che di benchmark, e nello specifico:

1. indicatori: intesi come restituzione matematica della correlazione tra la metodologia asset e quella tailored (si veda il paragrafo 2.5);
2. benchmark: inteso come risultato quantitativo dell'indicatore energetico che serve da riferimento per ciascun caso studio (si veda il paragrafo 2.6).

Tabella 18 – Sintesi degli indicatori di prestazione energetica in funzione del servizio energetico erogato (raffrescamento, illuminazione, ventilazione e apparecchiature).

Servizio Energetico	Formulazione matematica	Definizione parametri
Raffrescamento	$E'_c = \frac{E_c}{A}$ $E_c^{norm} = \frac{E_c \times Fh \times Ftc}{Ax CDD \times Fmc}$	$E'_c$ Indicatore di prestazione energetica per il raffrescamento [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		$E_c$ Consumo medio annuo di energia elettrica per il raffrescamento [kWh]
		$E'_c^{norm}$ Indicatore di prestazione energetica normalizzato per il raffrescamento [kWh/(m <sup>2</sup> GGanno)]
		$Ftc$ Fattore correttivo relativo al comfort indoor estivo [-]
		$CDD$ Gradi Giorno per il raffrescamento [GG]
		$Fmc$ Fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell'impianto di raffrescamento (mesi di attivazione annuali) [-]
Illuminazione	$E'_{light} = \frac{E_{light}}{A}$ $E'_{light}^{norm} = \frac{E_{light} \times Fh}{Ax Fme}$	$E'_{light}$ Indicatore di prestazione energetica per l'illuminazione [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		$E_{light}$ Consumo medio annuo di energia elettrica per l'illuminazione [kWh]
		$E'_{light}^{norm}$ Indicatore di prestazione energetica normalizzato per l'illuminazione [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		$Fme$ Fattore correttivo legato al regime di funzionamento dell'impianto di illuminazione (mesi di attivazione annuali) [-]
Ventilazione	$E'_{fan} = \frac{E_{fan}}{A}$	$E'_{fan}$ Indicatore di prestazione energetica per la ventilazione meccanica [kWh/(m <sup>2</sup> anno)]
		$E_{fan}$ Consumo medio annuo di energia elettrica per la ventilazione meccanica [kWh]
Apparecchiature	$E'_{app} = \frac{E_{app}}{A}$	$E'_{app}$ Indicatore di prestazione energetica per le apparecchiature (kWh/(m <sup>2</sup> anno) )
		$E_{app}$ Consumo medio annuo di energia elettrica per le apparecchiature (kWh)

## 2.4 Definizione dei casi studio

Come brevemente riportato nel paragrafo 2.1 l'attività di ricerca condotta nel primo anno [1] ha permesso di individuare le principali caratteristiche tipiche degli immobili del patrimonio edilizio italiano. A partire da questo risultato, sono stati definiti dei casi studio di riferimento con destinazioni d'uso e tipologia edilizia specifiche e ne sono stati variati diversi parametri, come le dimensioni e la tipologia edilizia e impiantistica. Le diverse combinazioni sono state effettuate in modo tale da rappresentare nella maniera più completa possibile il parco edilizio nazionale.

Per l'analisi energetica si è tenuto conto anche dell'effettiva influenza di ciascun parametro sulla prestazione energetica degli edifici in accordo con la normativa vigente [61-66]. Al fine di svolgere simulazioni parametriche di ciascun modello sono stati definiti dei range all'interno dei quali far variare i parametri di input mediante una procedura step by step.

Le ipotesi progettuali adottate nelle diverse combinazioni dei parametri dei casi studio sono discusse nei successivi paragrafi partendo dalla caratterizzazione geometrica e dimensionale fino ad arrivare alla definizione di opportuni profili di utilizzo per il calcolo tailored.

### 2.4.1 Condizioni climatiche e località di simulazione

La località dei casi studio è stata oggetto di parametrizzazione attraverso la selezione di diversi comuni italiani, a partire da quelli forniti nel primo anno di attività di ricerca [1]. L'analisi dei comuni è stata approfondita, cercando di comprendere la grande variabilità climatica che caratterizza la penisola italiana, con particolare attenzione per la zona climatica E, essendo quella più diffusa sul territorio nazionale nonché quella che presenta la maggior parte degli edifici.

Oltre ai Gradi Giorno, ulteriori criteri di scelta hanno riguardato la distribuzione geografica sul territorio italiano, i parametri climatici di riferimento (come la temperatura invernale ed estiva di progetto, l'escursione giornaliera estiva e la velocità dell'aria) nonché la popolazione e numero di edifici degli stessi comuni.

Bisogna inoltre evidenziare che i Gradi Giorno sono un parametro che caratterizza le condizioni climatiche invernali. Per questo motivo, come sarà discusso in seguito, nel presente lavoro si è cercato di definire un parametro equivalente per la stagione estiva che possa essere considerato per le successive normalizzazioni. In particolare, a partire dai dati climatici delle località che si sceglieranno, si fornirà una metodologia per la definizione di Gradi Giorno Estivi del tutto equivalenti a quelli invernali; per questo, si rimanda al paragrafo 2.5.

In accordo con quanto detto, sono stati selezionati venticinque comuni ritenuti rappresentativi del panorama italiano; la loro distribuzione geografica è mostrata in Figura 8 mentre i loro principali parametri climatici sono riportati in Tabella 19.

Le condizioni climatiche di progetto dei venticinque Comuni italiani rappresentano approssimativamente tutte le possibili variazioni sul territorio nazionale; ad esempio, la temperatura esterna invernale oscilla da +5°C a quasi -16°C, la temperatura esterna estiva tra i 24°C e i 34°C con escursione media giornaliera compresa tra i 6°C e i 13°C, mentre la velocità media dell'aria oscilla tra 0.8 m/s ai 6.9 m/s. Si precisa che quasi il 45% dei Comuni prescelti (undici su venticinque) ricade all'interno della zona climatica E essendo questa la più rappresentativa.

Qualora dalla successiva analisi e verifica delle metodologie sviluppate dovesse emergere una minor affidabilità dei risultati, sarà comunque possibile prevedere e selezionare ulteriori Comuni nonché contesti climatici così da integrare e raffinare ulteriormente i benchmark e le relazioni matematiche di correlazione ottenute.

In accordo con quanto riportato al paragrafo 2.3 uno dei parametri per il quale è necessario normalizzare i risultati sarà sicuramente quello dei Gradi Giorno sia invernali che estivi con l'obiettivo di poter estendere le relazioni di correlazioni anche ad altri contesti climatici non oggetto di simulazione.

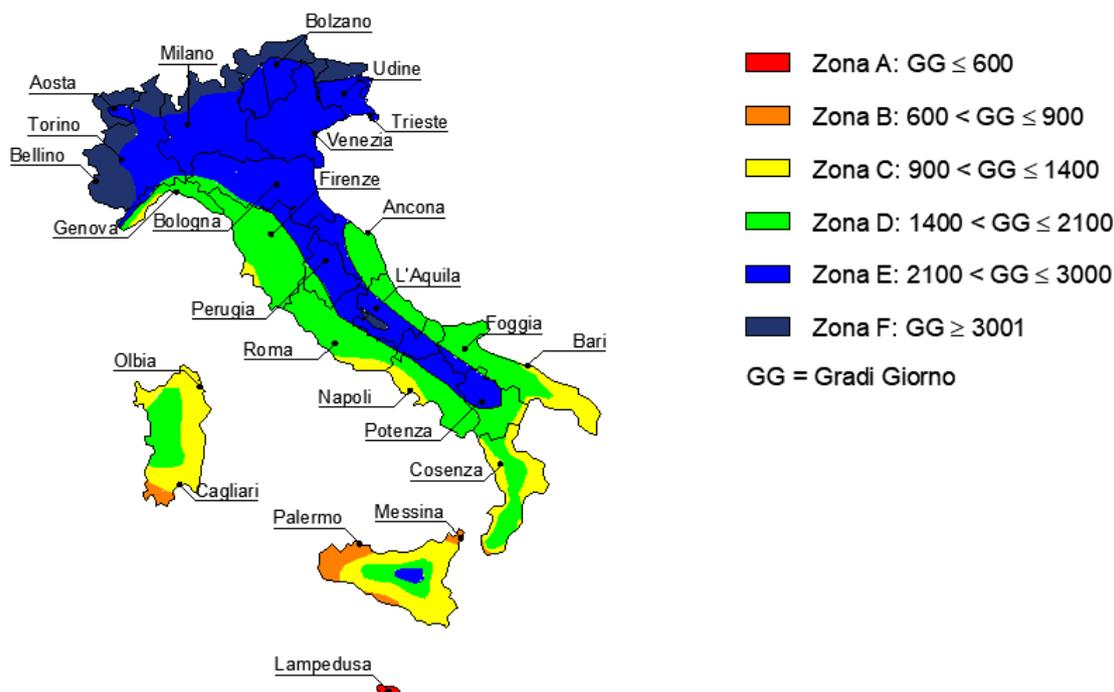


Figura 8 – Località selezionate per l’analisi energetica parametrica.

Tabella 19 – Principali parametri climatici dei venticinque Comuni prescelti.

id	Comune	Zona Climatica	Gradi Giorno	Temperatura esterna [°C]			Velocità dell’aria [m/s]			
				Invernale	Estiva	Escursione giornaliera	Media	Massima	Direzione	Zona
1	Lampedusa	A	568	4.2	34	10	1.02	2.05	NO	C
2	Messina	B	707	5	32.3	6	2.3	4.6	N	C
3	Palermo	B	751	5	32.6	6.5	0.9	1.8	SO	C
4	Cagliari	C	990	3	32.1	9	0.9	1.8	NO	D
5	Napoli	C	1034	2	32.4	10.5	3.59	7.18	O	C
6	Olbia	C	1142	2.8	33	9	6.91	13.82	-	E
7	Bari	C	1185	0	32.3	8	2.7	5.4	SO	C
8	Cosenza	C	1317	-3	33.6	8	1.4	2.8	O	C
9	Roma	D	1415	0	34	11	1.7	3.4	SO	C
10	Genova	D	1435	0	29.9	6	0.8	1.6	NE	A
11	Foggia	D	1530	0	33.9	13	3.6	7.2	NO	B
12	Ancona	D	1688	-2	30.1	5.5	1.8	3.6	O	B
13	Firenze	D	1821	0	33.6	13	1.4	2.8	NE	C
14	Trieste	E	2102	-5	31	8	6.4	12.79	NO	C
15	Bologna	E	2259	-5	33	12	2	4	SO	B
16	Perugia	E	2289	-2	28.6	10	2.1	4.2	NE	C
17	Udine	E	2323	-5	31	11	3.74	7.48	E	A
18	Venezia	E	2345	-5	31	9	6.12	12.23	SE	B
19	Milano	E	2404	-5	31.9	12	1.7	3.4	SO	A
20	Potenza	E	2472	-3	28.7	9.5	1.6	3.2	NO	C
21	L’Aquila	E	2514	-5	29.1	10	1.4	2.8	SE	C
22	Torino	E	2617	-8	31	11	1.4	2.8	NE	A
23	Bolzano	E	2791	-15	31.4	13	2.1	4.2	N	A
24	Aosta	E	2850	-10	28.7	13	2.2	4.4	N	A
25	Bellino	F	4264	-15.8	24	12	1.56	3.12	NE	A

A tale riguardo si ritiene necessario effettuare alcune precisazioni legate al parametro dei Gradi Giorno; ai fini della presente analisi si è deciso di fare riferimento ai valori forniti dal [4] per ogni comune italiano, il quale però si discosta leggermente rispetto al valore ricalcolato a partire dai dati climatici forniti dalla [67] soprattutto per le località che presentano un valore di Gradi Giorno più basso (Figura 9). Questa discrepanza, sebbene non comporti alcuna variazione nelle analisi che si sono condotte, determina però un trend dell'energia primaria che potrebbe sembrare in controtendenza con l'approccio teorico, ossia l'energia richiesta dall'edificio dovrebbe aumentare con la gravità delle condizioni climatiche esterne e quindi con l'aumento dei Gradi Giorno. Dall'analisi del confronto (Figura 10) si osserva che se si rapporta l'energia primaria media di tutti i casi studio rispetto i Gradi Giorno forniti da [4], si ottiene un trend che presenta un leggero decremento nelle alcune località tra i 1800-2100 GG. Apparentemente quindi sembrerebbe che in queste città caratterizzate da Gradi Giorno superiori si abbia una medesima richiesta di energia primaria. Tuttavia, se si mette a confronto l'energia con i Gradi Giorno ricalcolati, si osserva come la richiesta energetica sia perfettamente crescente all'aumentare di questo parametro.

In accordo con i risultati ottenuti, quindi, i risultati andrebbero messi in relazione con i Gradi Giorno ricalcolati a partire dalla [67]; tuttavia, in considerazione degli obiettivi del presente lavoro, è stato deciso di fare riferimento comunque ai Gradi Giorno del [4] sia perché sono quelli riportati negli APE sia perché faciliterebbe l'utilizzo delle equazioni di correlazione oggetto di approfondimento nei prossimi paragrafi. Pertanto il trend dell'energia che si osserverà nei paragrafi successivi in funzione dei Gradi Giorno forniti da [4] presenteranno tutti un andamento come quello mostrato Figura 10 che è da considerarsi corretto in virtù di quanto appena detto.

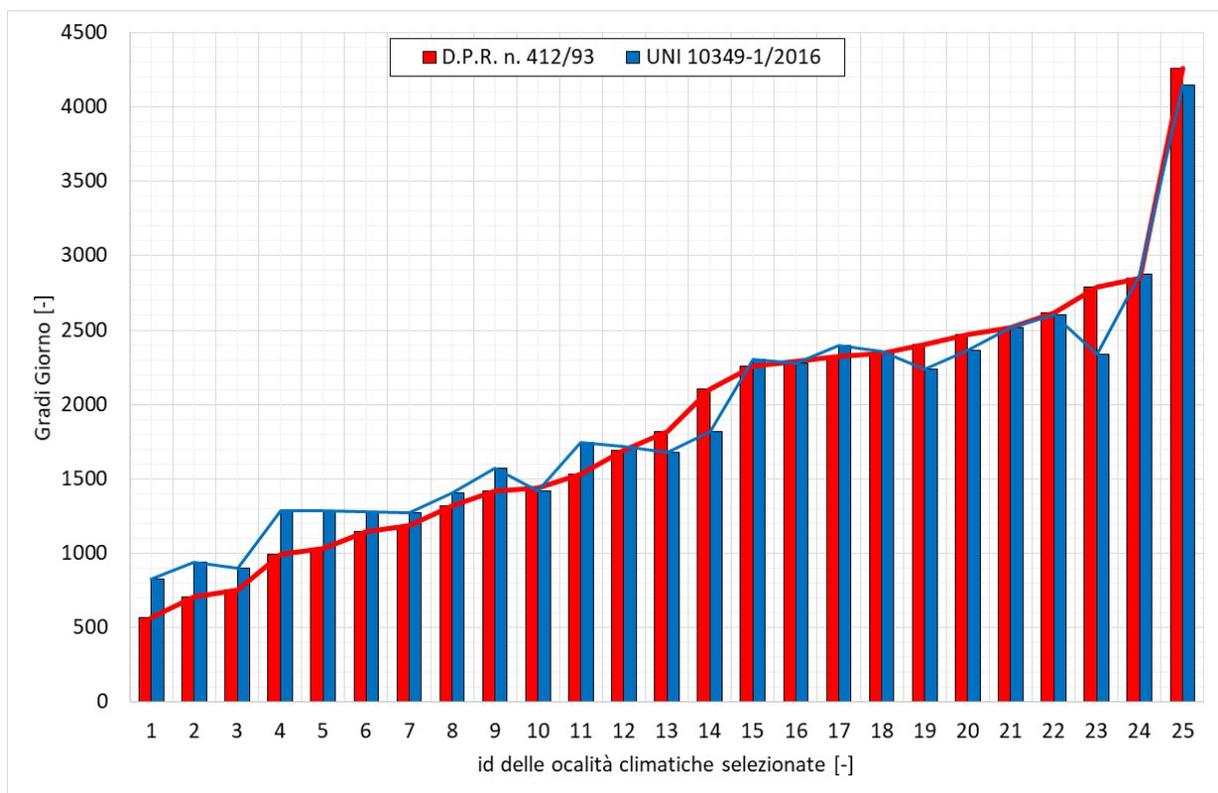


Figura 9 – Confronto tra i Gradi Giorno forniti dal D.P.R. n. 412/93 [4] e quelli ricalcolati a partire dai dati climatici di [67].



Figura 10 – Trend dell’energia primaria totale media rispetto i Gradi Giorno forniti dal D.P.R. n. 412/93 [4] e quelli ricalcolati a partire dai dati climatici di [67].

#### 2.4.2 Caratteristiche geometriche e dimensionali

Le tre destinazioni d’uso selezionate (E.1, E.2 ed E.5) di cui al [4], sono state analizzate in funzione delle quattro tipologie edilizie in cui è stato distinto il patrimonio edilizio italiano [1]: casa isolata (unifamiliare), a schiera, in linea e a torre.

Come detto nel paragrafo 2.2 la variazione dei parametri è stata oggetto di alcune semplificazioni, volte a scartare configurazioni assimilabili con comportamenti equivalenti o molto simili. Per quanto riguarda la tipologia edilizia, in considerazione dell’attuale normativa vigente per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici [61-66], a parità di condizioni al contorno e di caratterizzazione geometrica e termofisica del modello, unità immobiliari che ricadono in diverse tipologie edilizie possono essere caratterizzate da una prestazione energetica del tutto analoga. Ad esempio, le prestazioni energetiche di un’unità immobiliare situata al piano terra di un edificio in linea sono del tutto analoghe ad una equivalente unità immobiliare posta al piano terra di un edificio a torre, considerando che la differenza maggiore tra le due tipologie edilizie potrebbe essere l’altezza complessiva dell’edificio. Discorso analogo potrebbe essere fatto per edifici la cui unica discriminante risulta essere la variazione di una o due condizioni al contorno, come ad esempio il caso in cui si confina verso zone riscaldate o non riscaldate piuttosto che verso l’esterno. Questa condizione è tipica nelle unità facenti parte dell’edificio a torre, in linea e a schiera.

In virtù di queste considerazioni preliminari, i casi studio sono stati identificati nelle sole tipologie edilizie isolata e a torre, definendoli come mostrato in Tabella 20. Per le dimensioni considerate, la tipologia edilizia isolata è stata considerata per la sola destinazione d’uso E.1 afferente al settore residenziale.

Ad ogni caso studio sono state assegnate diverse caratteristiche dimensionali (Tabella 21), scelte secondo i risultati ottenuti nel primo anno di attività [1]. Inoltre, i casi studio la cui tipologia edilizia è a torre, sono stati ipotizzati come unità immobiliari locate in tre diversi piani dell’edificio (terra, intermedio e ultimo).

Anche le geometrie sono state oggetto di semplificazioni, senza però inficiare la qualità dei risultati e delle analisi.

In accordo con la Tabella 21, la superficie minima dei componenti vetrati deve essere pari ad almeno 1/8 della superficie utile; pertanto, sono stati definiti dei moduli standard (riportati in Tabella 22) che sono stati tra loro combinati fino a garantire il limite di legge per ogni caso studio.

Come mostrato in Tabella 21, i casi studio sono caratterizzati da superficie utile e volume lordo variabili rispetto a un valore medio riscontrato. Il caso studio E1.i.U rappresenta un edificio isolato con destinazione d'uso E.1, la cui geometria (di forma rettangolare) e i cui componenti finestrati sono stati variati come riportato in Tabella 23. Si precisa inoltre, che per ciascuna componente finestrata si è ipotizzata anche una chiusura oscurante esterna in legno che verrà quindi considerata nei calcoli della prestazione energetica del modello. Le configurazioni del caso studio E1.i.U sono visibili in Figura 9-Figura 12.

Tabella 20 – Definizione della tipologia edilizia dei casi studio e della rispettiva nomenclatura.

Destinazione d'uso	Tipologia edilizia	Codice caso studio di riferimento
E.1	isolato (i)	E1.i
E.1	torre (t)	E1.t
E.2	torre (t)	E2.t
E.5	torre (t)	E5.t

Tabella 21 – Caratteristiche dimensionali dei casi studio di riferimento.

Codice caso studio di riferimento	Piano [-]	H media [m]	Sup. utile [m <sup>2</sup> ]	Vol. lordo [m <sup>3</sup> ]	Sup. vetrata/ sup. utile [-]	Codice identificato
E1.i	Piano Unico (U)	2.7-3.5	100-200	300-800	1/8	E1.i.U
E1.t	Piano Terra (PT)	2.7	60-120	200-450	1/8	E1.t.PT
E1.t	Piano Intermedio (PI)	2.7	60-120	200-450	1/8	E1.t.PI
E1.t	Piano Ultimo (PU)	2.7	60-120	200-450	1/8	E1.t.PU
E2.t	Piano Terra (PT)	3.0	60-120	200-500	1/8	E2.t.PT
E2.t	Piano Intermedio (PI)	3.0	60-120	200-500	1/8	E2.t.PI
E2.t	Piano Ultimo (PU)	3.0	60-120	200-500	1/8	E2.t.PU
E5.t	Piano Terra (PT)	3.0	60-120	200-500	1/8	E5.t.PT

Tabella 22 – Caratteristiche dimensionali dei moduli standard delle finestre adottate.

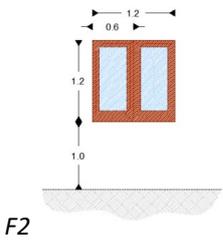
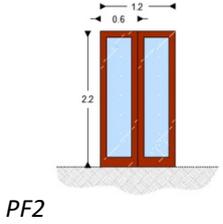
Modulo	Dimensioni geometriche [m]			
 F2	Larghezza modulo	1.20	Spessore del telaio laterale	0.10
	Altezza modulo	1.20	n. divisori verticali	1
	Spessore del telaio inferiore	0.16	Spessore divisorio verticale	0.10
	Spessore del telaio superiore	0.10	Altezza del parapetto	1.00
 PF2	Larghezza modulo	1.20	Spessore del telaio laterale	0.10
	Altezza modulo	2.20	n. divisori verticali	1
	Spessore del telaio inferiore	0.16	Spessore divisorio verticale	0.10
	Spessore del telaio superiore	0.10	Altezza del parapetto	-

Tabella 23 – Caratteristiche del caso studio E1.i.U.

Casi studio	Altezza [m]		Superficie utile [m <sup>2</sup> ]	Finestre			Riferimento
	min	max		Modulo	Numero	Superficie [m <sup>2</sup> ]	
E1.i.U.1	2.7	3.5	100	PF02-F02	8	15.2	Figura 11 - Figura 12
E1.i.U.2	2.7	3.5	135	PF02-F02	10	18	Figura 13
E1.i.U.3	2.7	3.5	168	PF02-F02	11	24.5	Figura 14

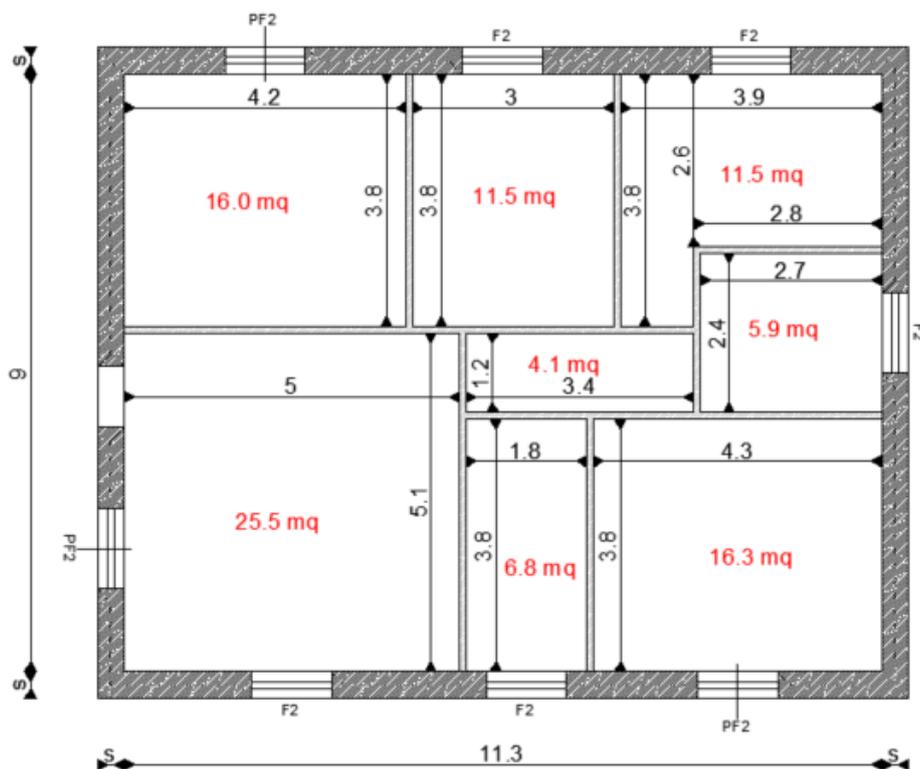


Figura 11 – Pianta geometrica del caso studio E1.i.U.1: edificio isolato unifamiliare di superficie di circa 100 m<sup>2</sup>.

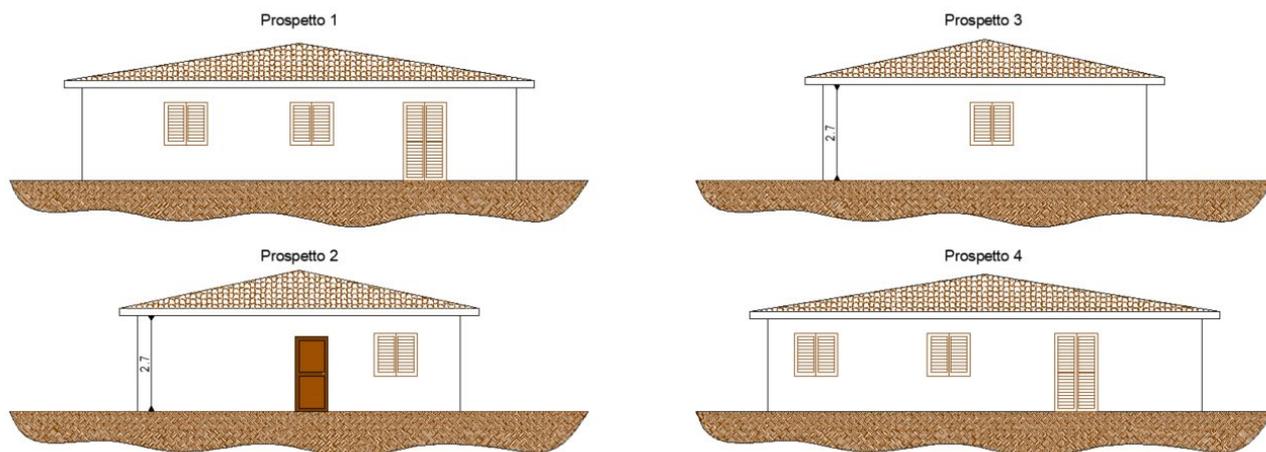


Figura 12 – Prospetti del caso studio E1.i.U.1: edificio isolato unifamiliare.

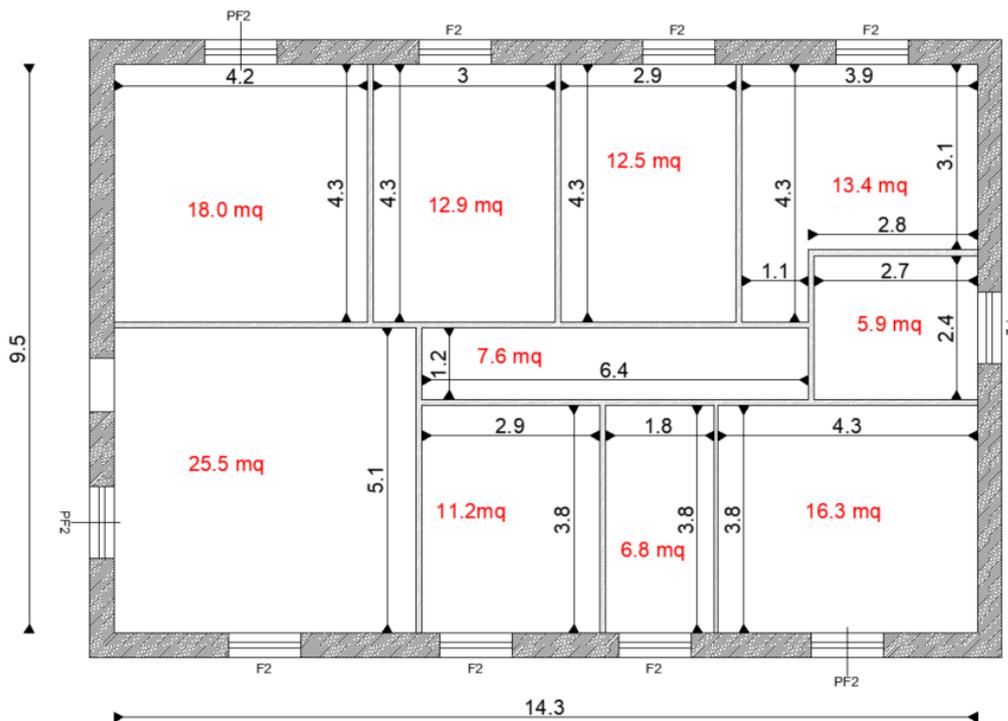


Figura 13 – Pianta geometrica del caso studio E1.i.U.2: edificio isolato unifamiliare di superficie di circa 136 m<sup>2</sup>.

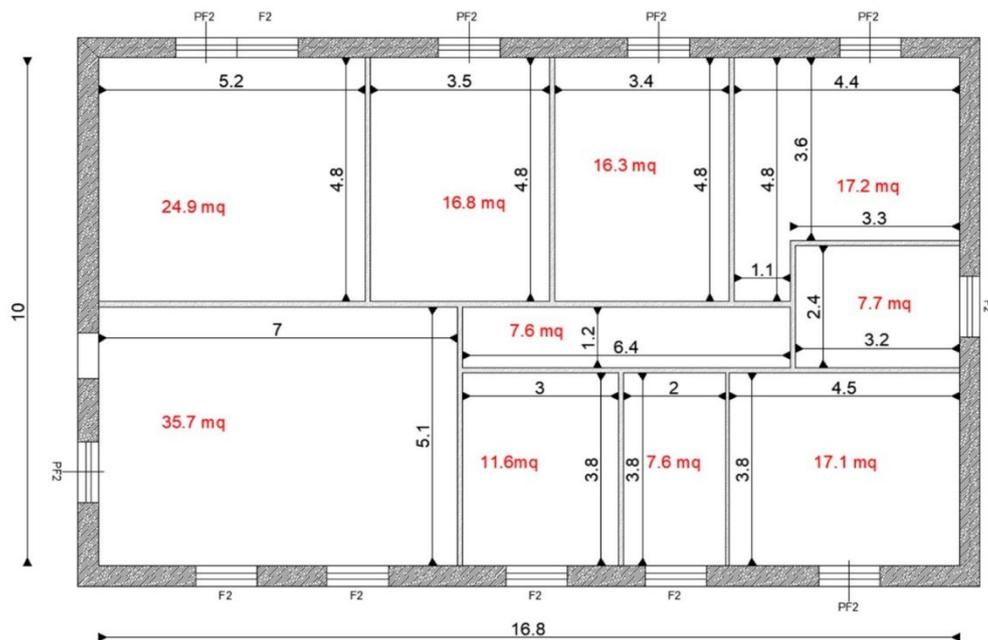


Figura 14 – Pianta geometrica del caso studio E1.i.U.3: edificio isolato unifamiliare di superficie di 168 m<sup>2</sup>.

I casi studio E1.t.PT, E1.t.PI e E1.t.PU rappresentano un'unità immobiliare di destinazione d'uso E.1 posta rispettivamente al piano terra, piano intermedio e piano ultimo di un edificio a torre. Analogamente a quanto fatto per il caso unifamiliare E1.i.U, le geometrie e i componenti finestrati di questi casi studio sono stati variati come riportato in Tabella 24.

I tre casi studio, a parità di dimensioni, hanno la stessa planimetria prevalentemente rettangolare. Le variazioni dimensionali sono mostrate in Figura 15, Figura 16 e Figura 17, in cui sono evidenziate anche le condizioni al contorno tipiche che si possono riscontrare in questa tipologia edilizia (una parete confinante verso un vano riscaldato e una verso un vano non riscaldato), mentre in Figura 18 si riportano due prospetti dei casi studio E1.t.PT.1, E1.t.PI.1 e E1.t.PU.1.

Le chiusure esterne dei componenti vetrati sono delle tapparelle, essendo queste quelle più diffuse e comuni per questa tipologia edilizia.

Tabella 24 – Caratteristiche dei casi studio E1.t.PT, E1.t.PI e E1.t.PU.

Casi studio	Altezza [m]	Superficie utile [m <sup>2</sup> ]	Finestre			Riferimento
			Modulo	Numero	Superficie [m <sup>2</sup> ]	
E1.t.PT.1	2.7	80	PF02-F02	6	11.0	Figura 15-Figura 18
E1.t.PT.2	2.7	100	PF02-F02	7	13.7	Figura 16
E1.t.PT.3	2.7	120	PF02-F02	7	17.5	Figura 17
E1.t.PI.1	2.7	80	PF02-F02	6	11.0	Figura 15-Figura 18
E1.t.PI.2	2.7	100	PF02-F02	7	13.7	Figura 16
E1.t.PI.3	2.7	120	PF02-F02	7	17.5	Figura 17
E1.t.PU.1	2.7	80	PF02-F02	6	11.0	Figura 15-Figura 18
E1.t.PU.2	2.7	100	PF02-F02	7	13.7	Figura 17
E1.t.PU.3	2.7	120	PF02-F02	7	17.5	Figura 17

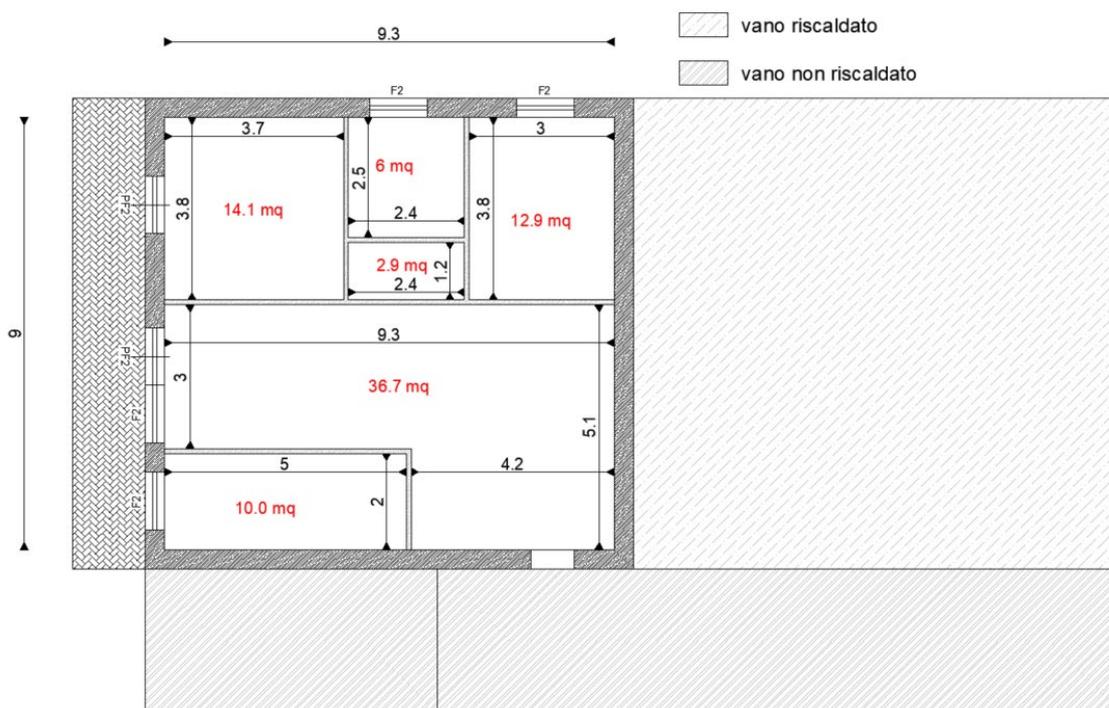


Figura 15 – Pianta geometrica dei casi studio E1.t.PT.1, E1.t.PI.1 ed E1.t.PU.1: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare di superficie pari a 80 m<sup>2</sup>.

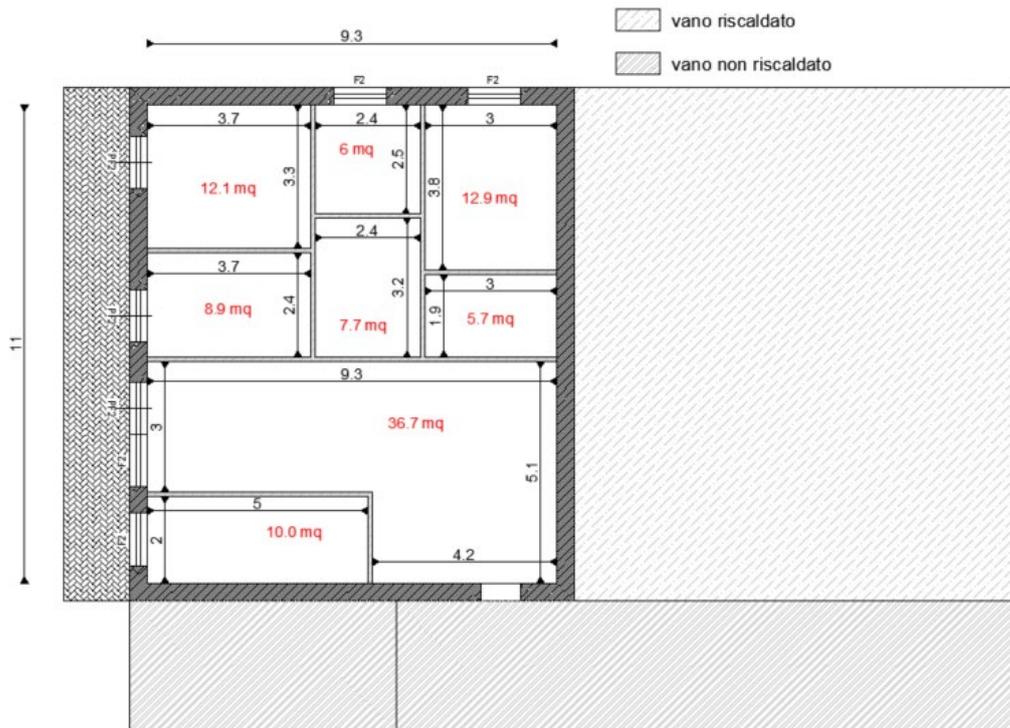


Figura 16 – Pianta geometrica dei casi studio E1.t.PT.2, E1.t.PI.2 ed E1.t.PU.2: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare di superficie pari a 100 m<sup>2</sup>.

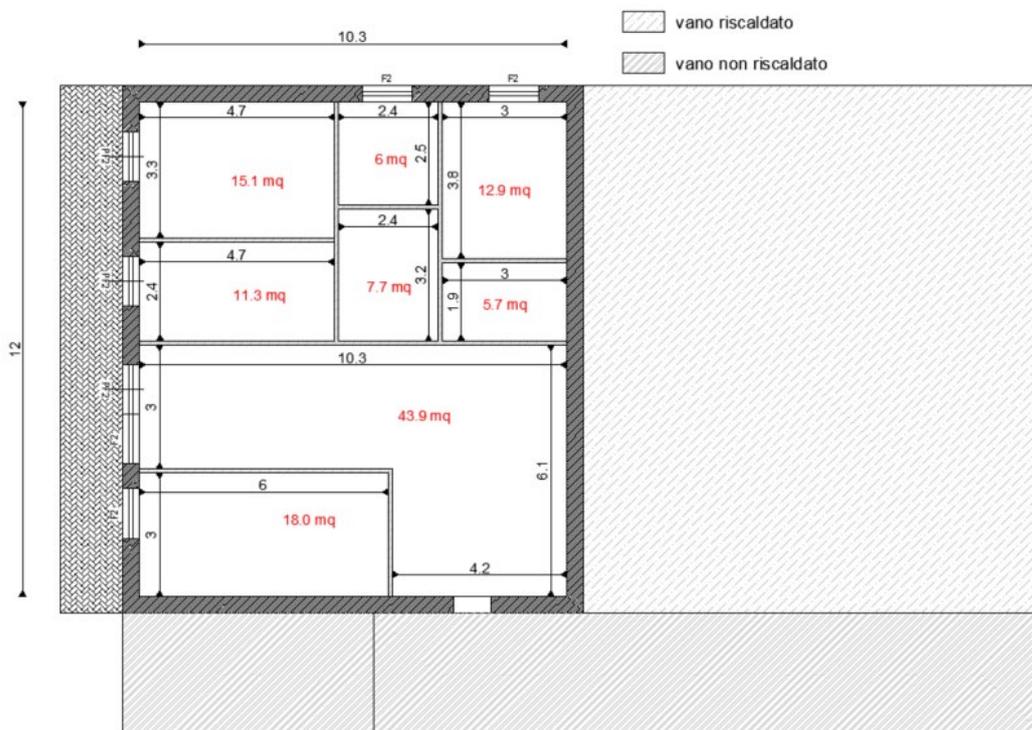


Figura 17 – Pianta geometrica dei casi studio E1.t.PT.3, E1.t.PI.3 ed E1.t.PU.3: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare di superficie pari a 120 m<sup>2</sup>.

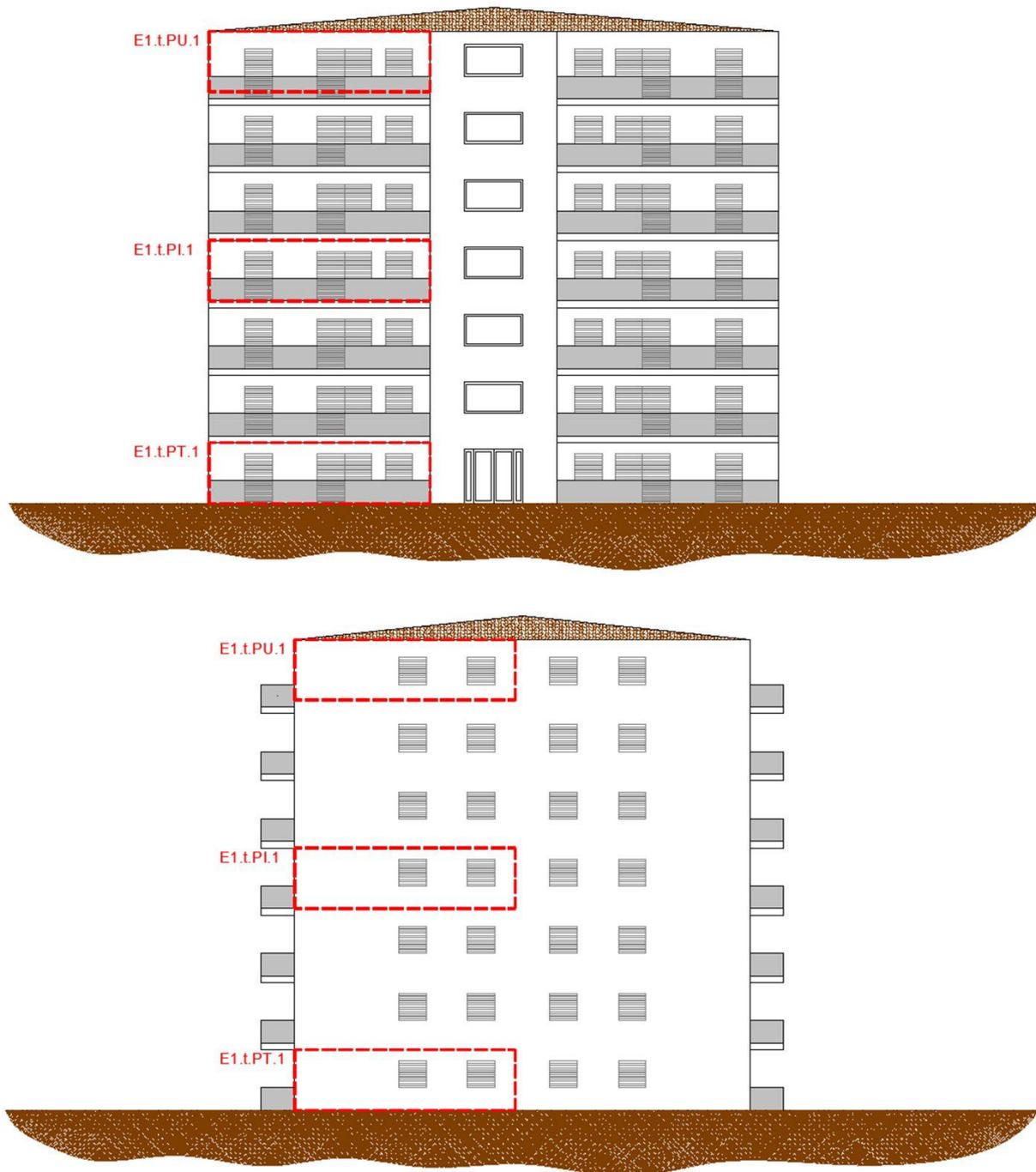


Figura 18 – Prospetti dei casi studio E1.t.PT.1, E1.t.PI.1 ed E1.t.PU.1: unità immobiliari in un edificio a torre plurifamiliare: individuazione delle diverse condizioni al contorno considerate

Infine, sono stati analizzati dimensioni e componenti dei casi studio afferenti alle destinazioni d’uso E.2 (E2.t.PT, E2.t.PI ed E2.t.PU) e E.5 (E5.t.PT), entrambi rappresentati da unità immobiliari prevalentemente di forma rettangolare di un edificio a torre in virtù delle superfici adottate. Se per la destinazione d’uso E.2, le unità immobiliari sono poste a tre piani diversi dell’edificio (piano terra, piano intermedio e piano ultimo), la destinazione d’uso E.5, invece, è locata solo al piano terra essendo la configurazione più diffusa e plausibile per le attività commerciali di queste dimensioni. Anche in questo caso le chiusure esterne delle componenti vetrate sono delle tapparelle.

Le varianti dimensionali dei casi studio sono riportate in Tabella 25 e in Figura 19-Figura 21 per E2.t.PT, E2.t.PI ed E2.t.PU e in Tabella 26 e in Figura 22-Figura 24 per E5.t.PT.

Tabella 25 – Caratteristiche dimensionali dei casi studio E2.t.PT, E2.t.PI e E2.t.PU.

Casi studio	Altezza [m]	Superficie utile [m <sup>2</sup> ]	Modulo	Finestre		Riferimento
				Numero	Superficie [m <sup>2</sup> ]	
E2.t.PT.1	2.7	80	PF02-F02	6	11.0	Figura 19
E2.t.PT.2	2.7	100	PF02-F02	7	13.7	Figura 20
E2.t.PT.3	2.7	120	PF02-F02	8	17.5	Figura 21
E2.t.PI.1	2.7	80	PF02-F02	6	11.0	Figura 19
E2.t.PI.2	2.7	100	PF02-F02	7	13.7	Figura 20
E2.t.PI.3	2.7	120	PF02-F02	8	17.5	Figura 21
E2.t.PU.1	2.7	80	PF02-F02	6	11.0	Figura 19
E2.t.PU.2	2.7	100	PF02-F02	7	13.7	Figura 20
E2.t.PU.3	2.7	120	PF02-F02	8	17.5	Figura 21

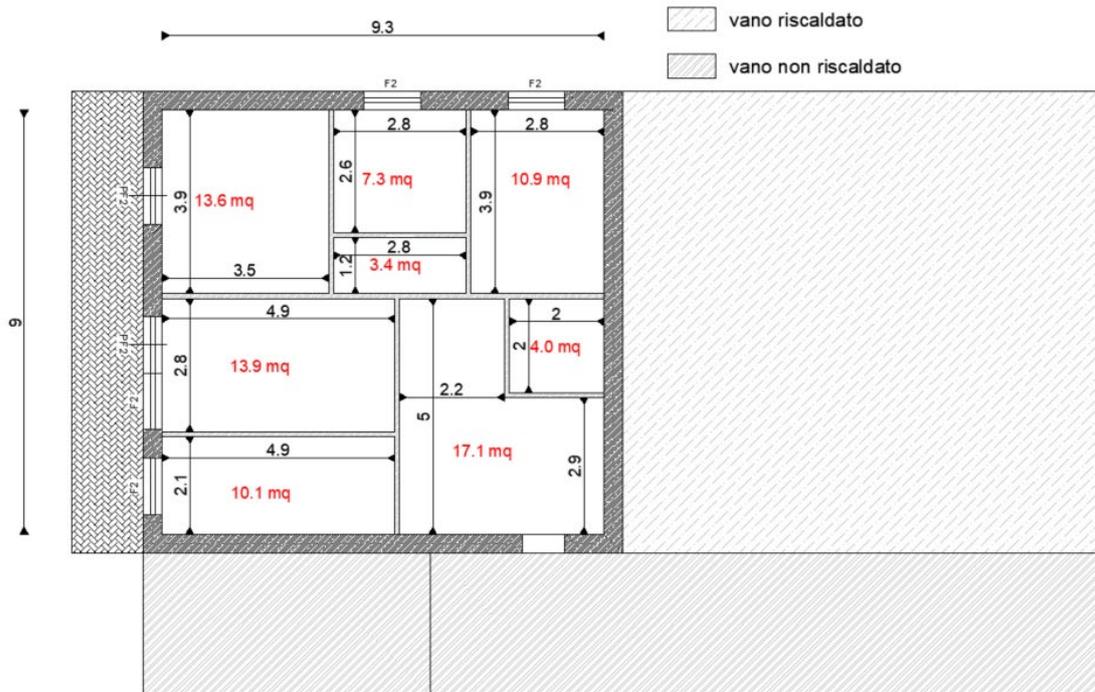


Figura 19 – Pianta geometrica dei casi studio E2.t.PT.1, E2.t.PI.1 ed E2.t.PU.1: unità immobiliari in un edificio a torre di superficie pari 80 m<sup>2</sup>.

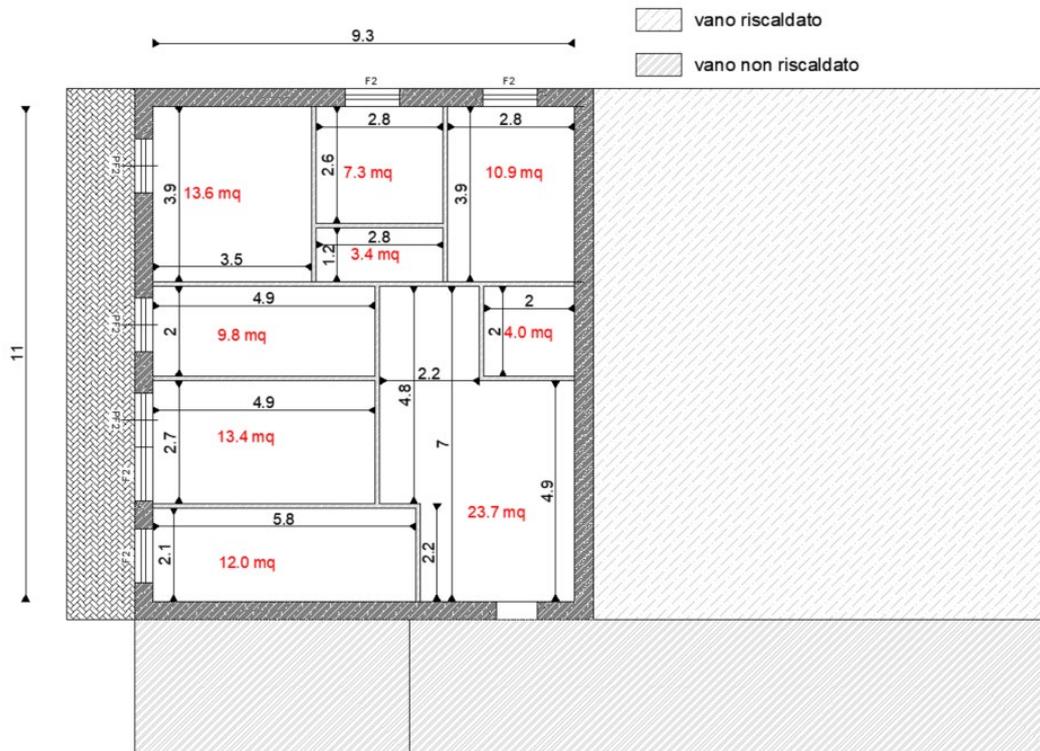


Figura 20 – Pianta geometrica dei casi studio E2.t.PT.2, E2.t.PI.2 ed E2.t.PU.2: unità immobiliari in un edificio a torre di superficie pari 100 m<sup>2</sup>.

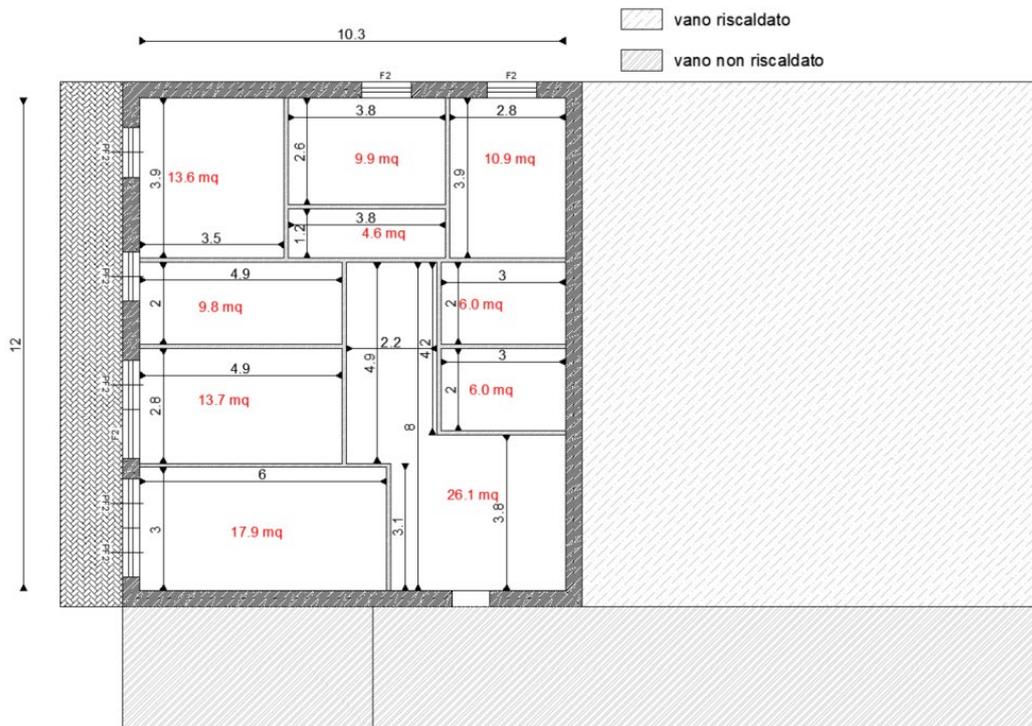


Figura 21 – Pianta geometrica dei casi studio E2.t.PT.3, E2.t.PI.3 ed E2.t.PU.3: unità immobiliari in un edificio a torre di superficie pari 120 m<sup>2</sup>.

Tabella 26 – Caratteristiche dimensionali dei casi studio E5.t.PT.

Casi studio	Altezza [m]	Superficie utile [m <sup>2</sup> ]	Finestre			Riferimento
			Modulo	Numero	Superficie [m <sup>2</sup> ]	
E5.t.PT.1	2.7	80	PF02-F02	6	11.0	Figura 22
E5.t.PT.2	2.7	100	PF02-F02	7	13.7	Figura 23
E5.t.PT.3	2.7	120	PF02-F02	8	17.5	Figura 24

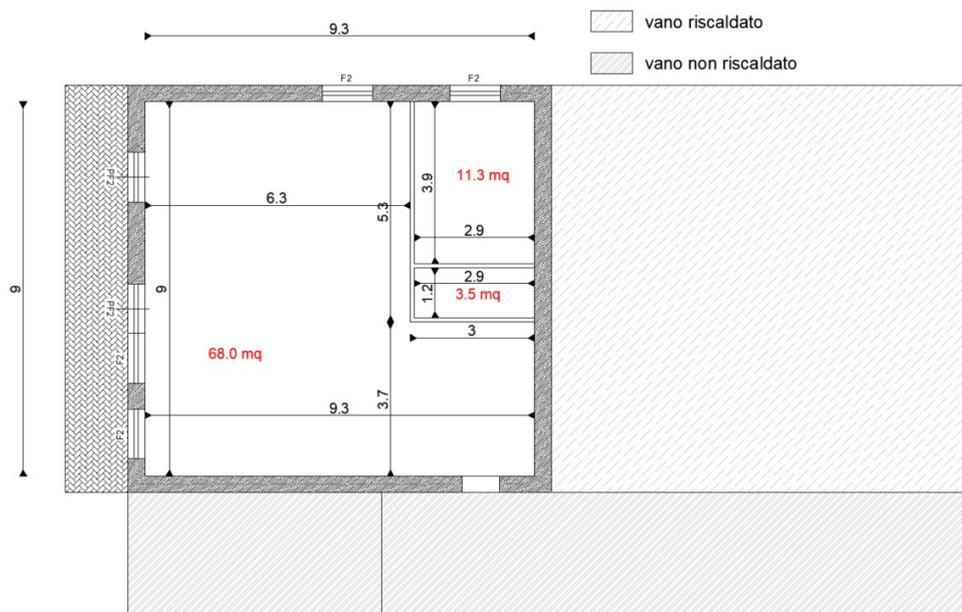


Figura 22 – Pianta geometrica del caso studio E5.t.PT.1: unità immobiliare in un edificio a torre di superficie pari 80 m<sup>2</sup>.

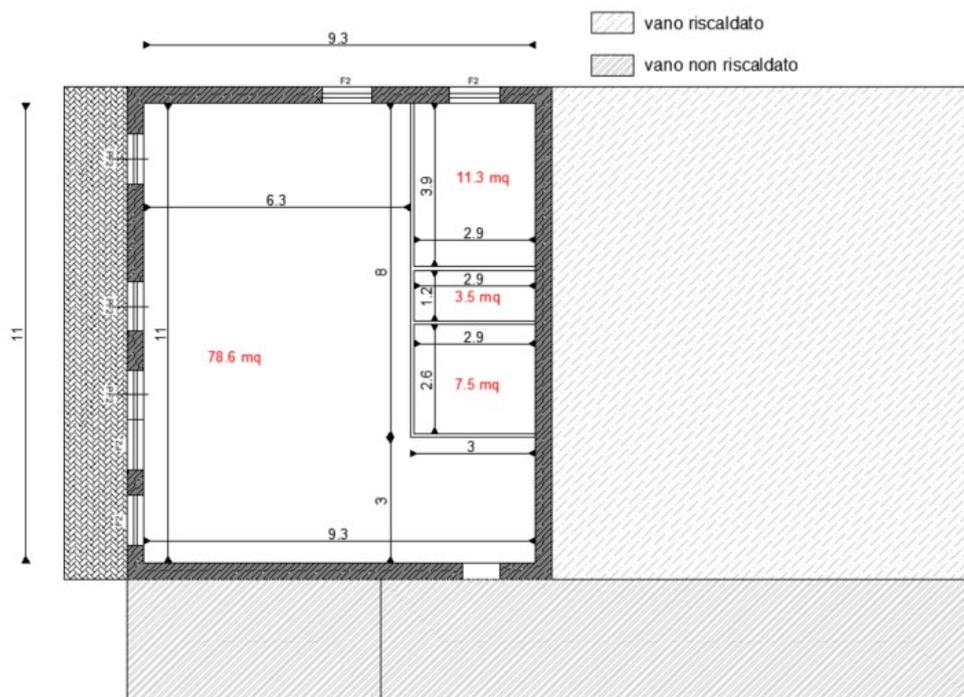


Figura 23 – Pianta geometrica del caso studio E5.t.PT.2: unità immobiliare in un edificio a torre di superficie pari 100 m<sup>2</sup>.

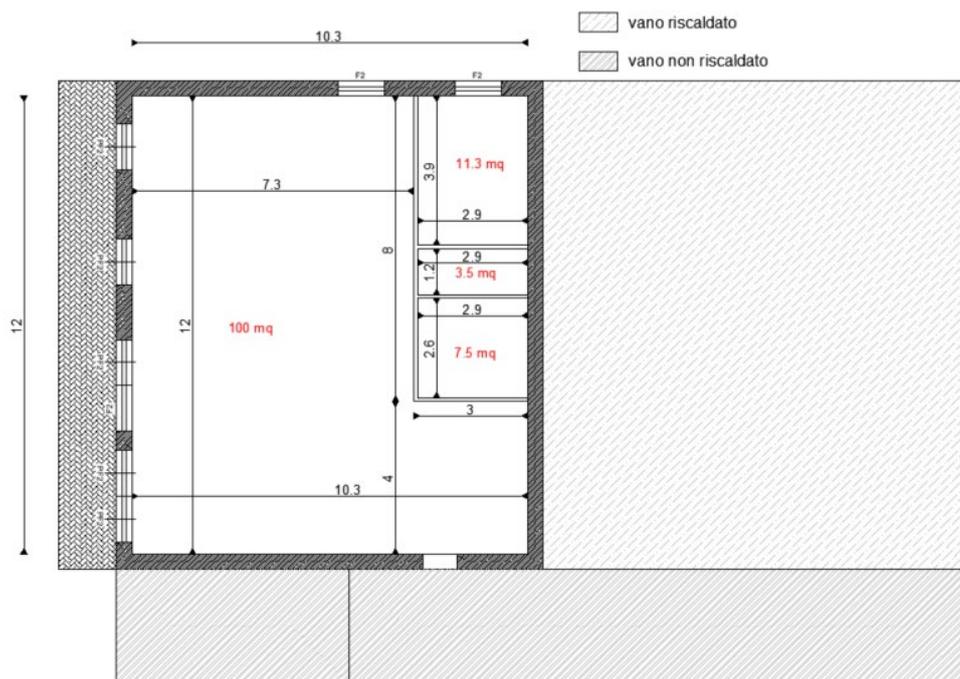


Figura 24 – Pianta geometrica del caso studio E5.t.PT.3: unità immobiliare in un edificio a torre di superficie pari 120 m<sup>2</sup>.

Nonostante i risultati ottenuti nel primo anno di attività [1] mostrino che negli edifici a torre la superficie utile media sia compresa tra i 60-120 m<sup>2</sup> a prescindere dalla destinazione d’uso, è evidente che le destinazioni d’uso non residenziali possano avere dimensioni anche molto più elevate, sebbene, in questi casi, presenterebbero una configurazione edilizia probabilmente diversa se non uniche (si pensi ad esempio ai centri commerciali)

Come detto al paragrafo 2.2 le analisi che si condurranno e che sono approfondite nel paragrafo 2.5, saranno normalizzate rispetto alcuni parametri con lo scopo di estendere le relazioni di correlazione anche a casistiche differenti da quelle indagate. Pertanto l’obiettivo della definizione dei casi studio deve essere quella di individuare dei modelli geometrici che possano coprire una ampia casistica degli edifici presenti nel panorama nazionali nonché permettere di far variare i parametri in oggetto all’interno di specifici range.

### 2.4.3 Caratteristiche termofisiche dell’involucro edilizio

#### 2.4.3.1 Componenti opache

Nel primo anno di attività [1] erano state selezionate le tipologie costruttive tipiche del territorio nazionale per le componenti opache verticali e orizzontali dell’involucro edilizio che per brevità di trattazione vengono riassunte in Tabella 27; in particolare, le componenti verticali sono state raggruppate in costruzioni in muratura, in cemento armato e in strutture di nuova concezione (ad esempio strutture in acciaio e legno) per ognuna delle quali sono state considerate differenti materiali da costruzione. Per le componenti opache orizzontali, queste sono state raggruppate semplicemente in solai superiori ed inferiori per le quali si sono considerate prevalentemente tipologie in legno, laterocemento e acciaio, solo per il solaio inferiore sono state considerate anche strutture in calcestruzzo e con igloo.

Ciascuna tipologia individuata è stata poi caratterizzata da diversi livelli di isolamento; questo è stato fatto in quanto molte tipologie costruttive esistenti sono state oggetto di ristrutturazione nel corso degli anni presentando quindi livelli di isolamento differenti dipendenti dall’epoca dell’intervento stesso e quindi dalla normativa vigente. Ipotizzando diversi livelli di isolamento, quindi, si è tenuto conto anche di questi aspetti. I livelli di isolamento individuati in [1] per ciascuna tipologia di edificio, sono riassunti in Tabella 28 dei quali però solo alcuni saranno considerati nelle analisi parametriche, come di seguito spiegato.

Tabella 27 – Tipologie costruttive selezionate in [1] per le diverse componenti opache.

<i>Componente</i>	<i>Tipologia Costruttiva</i>	<i>Caratteristiche</i>
<i>Parete verticale</i>	Muratura portante	Pietra
		Mattoni
		Calcestruzzo
		A sacco
		A cassa vuota
	Telaio in cemento armato con tamponatura esterna	Parete con monoblocco in laterizio
		Parete in calcestruzzo
		Parete a cassetta
	Nuove costruzioni	Parete con rivestimento faccia a vista
		Parete con blocco termico
<i>Solaio orizzontale</i>	Superiore	Parete leggera
		Legno
		Laterocemento
	Inferiore	Acciaio
		Igloo
		Legno
		Laterocemento
		Calcestruzzo
		Acciaio

Tabella 28 – Livelli di isolamento selezionati in [1] per le componenti opache.

<i>Livello di isolamento del componente</i>	<i>Edificio prevalente [-]</i>	<i>Spessore di isolante [cm]</i>	<i>Riferimento normativo</i>	<i>Codice livello di isolamento</i>
<i>Non isolata</i>	Esistente	0	-	l <sub>1</sub>
<i>Scarsamente isolata</i>	Esistente	2	Legge 373/76 [68]	l <sub>2</sub>
			Legge 10/90 [69]	
<i>Mediamente isolata</i>	Esistente/ristrutturato	5	Legge 10/90	l <sub>3</sub>
<i>Isolata</i>	Esistente/ristrutturato	10	D.Lgs 192/2005 [70]	l <sub>4</sub>
			D.Lgs 311/2006 [71]	
<i>Altamente isolata</i>	Nuova costruzione	>10	D.M. 26/06/2015 [11]	l <sub>5</sub>

Per ogni componente opaca erano state considerate caratteristiche fisiche e termiche coerenti con tipologia, materiale e livello di isolamento, definendo un totale di circa settecento combinazioni per le componenti verticali e circa duecento per quelle orizzontali.

Tutte le combinazioni di componenti opache selezionate in [1] sono state analizzate dal punto di vista termofisico, al fine di valutare il trend dei principali parametri termici e capire se alcune configurazioni siano sovrapponibili e quindi non considerabili ai fini dell'analisi parametrica.

In accordo con la normativa vigente [61], il parametro principale da considerare nelle analisi è la trasmittanza termica (U) la quale è il parametro che determina l'entità dello scambio termico attraverso l'involucro edilizio. In aggiunta, al fine di tener conto anche del diverso comportamento termico delle strutture massive, le analisi condotte hanno preso in considerazione anche altri parametri quali lo spessore e la massa superficiale della componente opaca.

Parametri quali ad esempio la trasmittanza termica periodica, invece, non concorrono direttamente al calcolo del fabbisogno energetico pur essendo un parametro che caratterizza il comportamento estivo del fabbricato.

Sulla base di queste considerazioni, si è studiato l'andamento della trasmittanza termica al variare dello spessore di tutte le tipologie costruttive selezionate in [1] in funzione del diverso livello di isolamento; il risultato è globalmente mostrato in Figura 25 e in Figura 26 rispettivamente per le componenti opache

verticali e quelle orizzontali superiori. In particolare, relativamente alle strutture verticali in virtù dell'elevato campione esaminato, sono stati riportati i valori di trasmittanza termica medi rispettivamente delle componenti non isolate (indicate con NI) e delle strutture isolate (indicati globalmente con I); quest'ultimo è stato calcolato considerando le configurazioni  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$  e  $I_5$  mostrate in Tabella 28. Al contrario, lo stesso trend ottenuto per le componenti orizzontali superiori è stato riscontrato anche per quelli inferiori che, quindi, per brevità di trattazione non è stato riportato.

I risultati ottenuti per entrambe le tipologie di componenti opache evidenziano come un elevato numero di combinazioni siano tra loro assimilabili. In particolare i valori di trasmittanza termica delle componenti opache oscillano all'interno di due curve limite (evidenziate in giallo in Figura 25-Figura 26):

1. la curva limite superiore è ben approssimata da una funzione esponenziale con valori di trasmittanza termica che decrescono da 3.5 W/m<sup>2</sup>K per uno spessore di circa 20 cm a 1.7 W/m<sup>2</sup>K per spessori di circa 80 cm per le componenti verticali e da 2.8 W/m<sup>2</sup>K per uno spessore di circa 20 cm a 1.6 W/m<sup>2</sup>K per spessori di circa 35 cm per quelle orizzontali;
2. la curva limite inferiore è praticamente una retta orizzontale corrispondente a un valore di trasmittanza termica di circa 0.14 W/m<sup>2</sup>K per le componenti verticali e 0.18 W/m<sup>2</sup>K per quelle orizzontali di copertura.

In base a queste considerazioni, quindi, implementare tutte le tipologie costruttive selezionate nel primo anno di attività potrebbe risultare ridondante.

Il numero di strutture opache da simulare è stato quindi ridotto in accordo con i trend ottenuti, selezionando 152 componenti verticali e 52 componenti orizzontali che presentassero caratteristiche termiche tali da coprire il range di valori delimitati dalle due curve in giallo. Le caratteristiche delle componenti scelte sono riportate in forma aggregata in Figura 27 e in Figura 28 rispettivamente per le componenti opache verticali e quelle orizzontali, al variare della tipologia costruttiva; si precisa che ai fini delle analisi parametriche il livello indicato con  $I_2$  non è stato considerato perché perfettamente ben rappresentato sia dalle componenti non isolate che da quelle caratterizzate dal livello  $I_3$ .

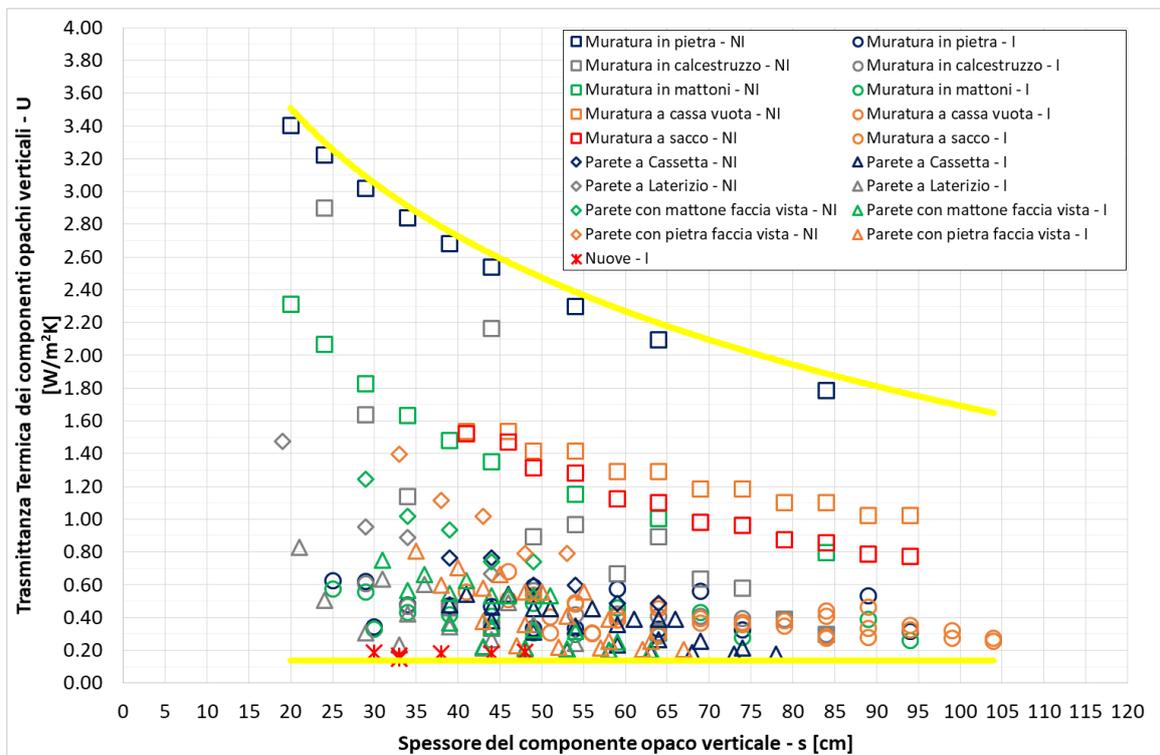


Figura 25 – Analisi delle caratteristiche termiche medie delle componenti opache verticali selezionate in [1].

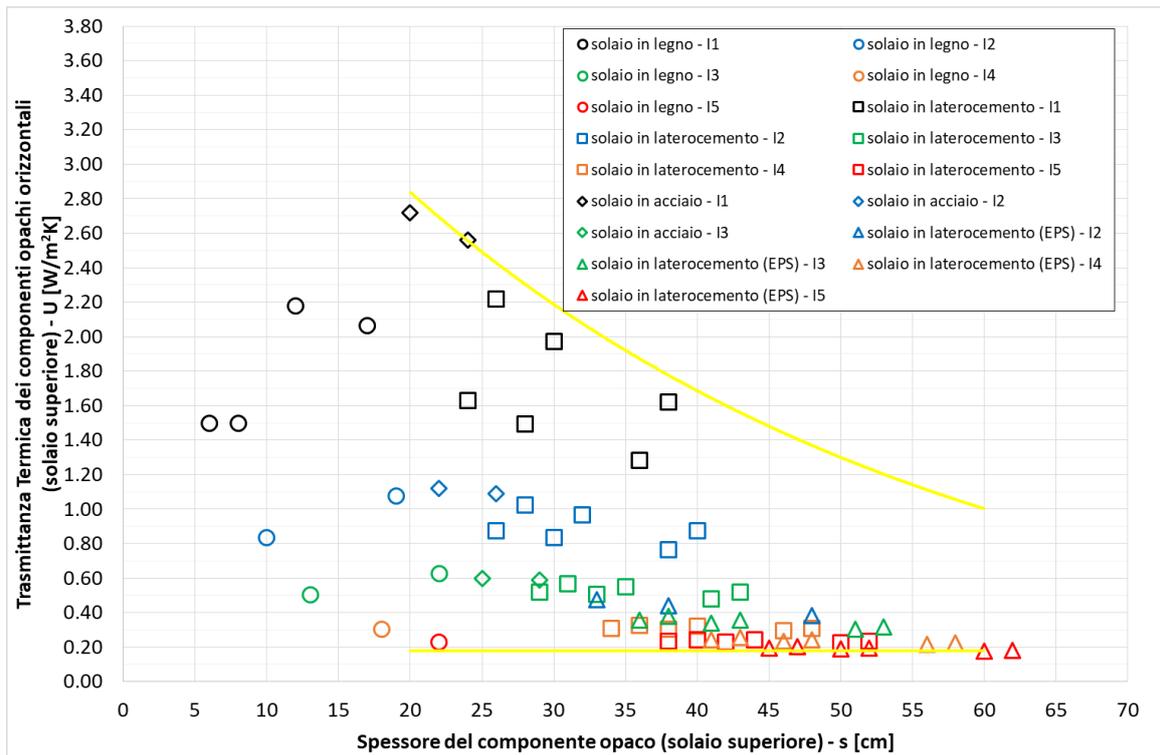


Figura 26 – Analisi delle caratteristiche termiche medie delle componenti opache orizzontali superiori selezionate in [1].

In particolare, per una maggiore chiarezza dei risultati in Figura 27 sono mostrate le caratteristiche delle componenti verticali per il diverso livello di isolamento termico (I<sub>1</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> e I<sub>5</sub>), mentre la stessa cosa non è stata necessaria in Figura 28 in virtù del minor campione selezionato.

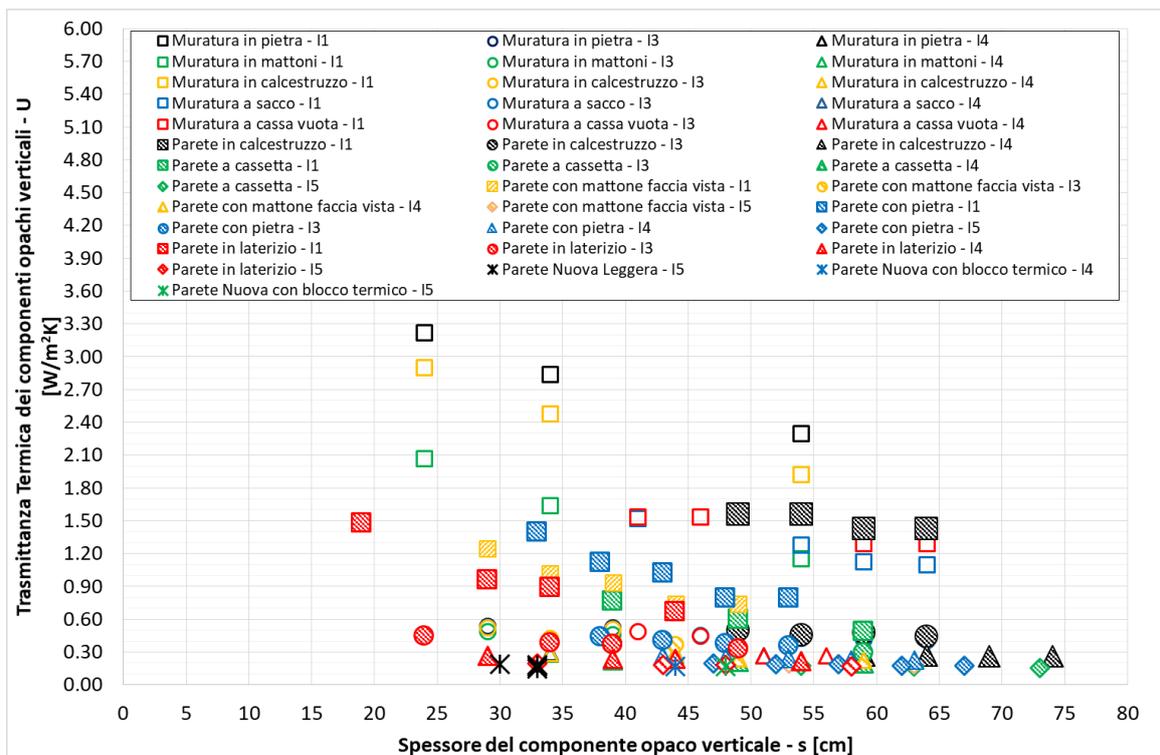


Figura 27 – Caratteristiche termiche delle componenti opache verticali selezionate per l'analisi parametrica.

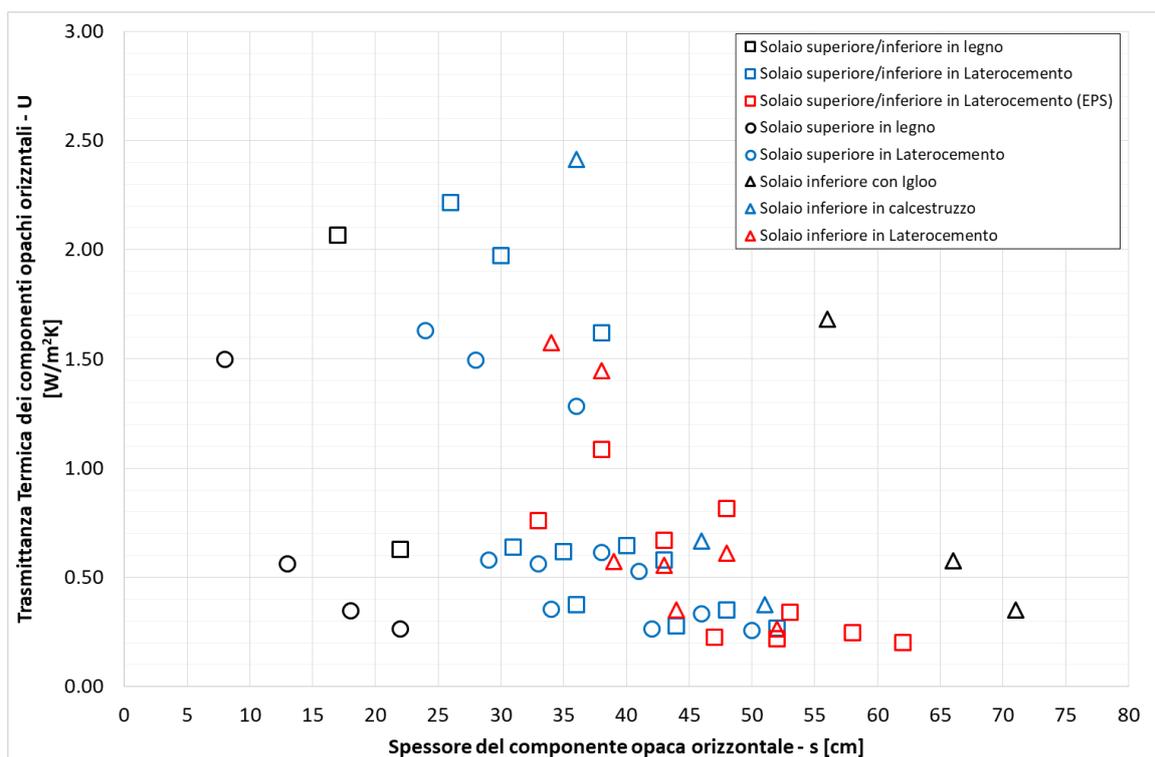


Figura 28 – Caratteristiche termiche delle componenti opache orizzontali selezionate per l’analisi parametrica.

Ai fini del presente lavoro, quindi, sono state considerate delle componenti che possono presentare diversi centimetri di isolamento termico variabile tra zero e più di dieci. Per una maggiore chiarezza della trattazione, alle componenti selezionate è stata associata una nuova nomenclatura in funzione del livello di isolamento adottato; questa è sinteticamente riportata in Tabella 29 messa in relazione con quella precedentemente adottata.

Tabella 29 – Codice identificativo dei quattro livelli di isolamento adottati per le componenti opache.

<b>Livello di isolamento del componente</b>	<b>Spessore di isolante [cm]</b>	<b>Codice livello di isolamento [1]</b>	<b>Nuovo codice del Livello di isolamento</b>
Non isolata	0	I1	Liv-Iso-0
Scarsamente isolata	2	I2	-
Mediamente isolata	5	I3	Liv-Iso-1
Isolata	10	I4	Liv-Iso-2
Altamente isolata	>10	I5	Liv-Iso-3

### 2.4.3.2 Componenti trasparenti

Le caratteristiche geometriche della componente trasparente sono state già parzialmente definite nel paragrafo 2.4.2, ossia per ogni caso studio è stato definito il numero e la tipologia di infisso tale da garantire il limite di normativa di 1/8.

Note le dimensioni geometriche, sono state definite le caratteristiche termiche degli infissi; sulla base delle ricerche condotte in [1], si sono adottate tre tipologie coerenti con il periodo di costruzione degli edifici e con le normative vigenti riportate schematicamente in Tabella 30, dove il fattore di riduzione  $g_{gl+sh}/g_{gl}$  considerato è legato alla presenza di tende interne.

Trascurando il contributo del ponte termico, le tre configurazioni degli infissi sarebbero caratterizzate da valori di trasmittanza termica compresi tra circa 2.7 e 1.3 W/m²K. Tuttavia, all’interno delle analisi parametriche sarebbe necessario determinare anche il ponte termico tra il telaio e la parete su cui è installato che varierà per ogni tipologia di parate verticale selezionata (152 componenti); pertanto, da un punto di vista

prettamente teorico, considerando tre tipologie di infisso per ogni componente opaco, si avrebbero per la componente vetrata 456 valori diversi di trasmittanza termica.

Tabella 30 – Tipologie di infisso selezionate in [1].

Tipologia componente trasparente	Trattamento vetro	Infisso		Fattore di riduzione $g_{gl+sh}/g_{gl}$
		Materiale	Spessore	
Vetro singolo	-	Legno	5 cm	0.57
Vetrocamera 4/16/4	-	Legno	5 cm	0.57
Vetrocamera 4/16/4	Basso emissivo	Legno	5 cm	0.57

### 2.4.3.3 Semplificazioni adottate per l'analisi parametrica

Durante le analisi termofisiche delle componenti dell'involucro sono state adottate alcune semplificazioni. Una di queste riguarda l'effetto di ostruzioni esterne, aggetti verticali e orizzontali, che ridurrebbero il contributo degli apporti solari incidenti sulle sole componenti su cui gravano, specialmente nella stagione estiva. Tale contributo non è stato considerato nelle simulazioni parametriche, in quanto il costo nella parte di modellazione e di analisi sarebbe stato estremamente elevato.

Eventuali discrepanze dovute a questa semplificazione saranno valutate in fase di validazione dei risultati con i casi studio reali, prevista nel terzo anno di attività, nel quale caso sarà valutata la possibilità di simulare ulteriori modelli comprendendo sia aggetti che ostruzioni esterne.

La seconda semplificazione riguarda la porta di ingresso all'unità immobiliare, per la quale sono state considerate delle dimensioni geometriche (90 x 210 cm) e caratteristiche termiche ( $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) standard in tutte le simulazioni. Questa assunzione, in virtù del fatto che, la porta d'ingresso rappresenta mediamente circa lo 0.1-0.6% delle dispersioni totali di un edificio, è stata considerata come una approssimazione accettabile e non influente ai fini degli obiettivi del presente lavoro.

Ultima semplificazione riguarda i ponti termici, che andrebbero valutati mediante un'analisi agli elementi finiti (FEM) per ogni configurazione edilizia e costruttiva ipotizzata, con conseguente aumento del costo delle simulazioni in termini di tempo e performance. A tal proposito, sono state svolte alcune analisi preliminari attraverso un codice di calcolo agli elementi finiti, disponibile nello stesso programma impiegato per le analisi parametriche energetiche, al fine di determinare l'influenza dei ponti termici sulle dispersioni totali dell'edificio e capire se fosse possibile adottare qualche semplificazione.

In virtù dei casi studio definiti nel presente paragrafo, per l'analisi sono state considerate le cinque configurazioni dei ponti termici mostrate in Tabella 31, essendo quelle che hanno un maggiore impatto sulle dispersione attraverso il fabbricato.

Come era logico aspettarsi, i risultati dell'analisi (Figura 29) mostrano come l'influenza del ponte termico vari notevolmente rispetto alla variazione dell'energia dispersa dall'edificio in funzione delle caratteristiche termiche delle diverse componenti. Il ponte termico dell'infisso è quello che presenta un maggiore impatto (2%-15%), mentre il  $PT_{\text{interpiano}}$  risulta essere quello meno influente (1%-6%).

In tutti i casi, i valori percentuali più elevati si riscontrano per combinazioni di elementi con elevate differenze di trasmittanza termica, come ad esempio infisso altamente disperdente combinato con involucro dotato di cappotto termico oppure solaio di copertura altamente isolato con parete non isolata o leggermente isolata. Queste soluzioni sono tecnicamente realizzabili, ma inusuali e improbabili, in quanto si ritiene che chiunque realizzi un intervento di ristrutturazione dell'edificio, verosimilmente interverrà sia sulla componente trasparente che opaca. Queste soluzioni, inoltre, non sono compatibili con gli edifici di nuova costruzione, che, in virtù del rispetto dei requisiti di normativa [11], presenteranno delle caratteristiche termiche di tutto l'involucro molto basse.

Tabella 31 – Ponti termici considerati per l’analisi preliminare e valutati con analisi FEM.

Codice del ponte termico	Combinazioni tra le componenti
$PT_{pareti}$	Angolo tra componente opaca verticale (parete)
$PT_{copertura}$	Collegamento tra il solaio di copertura e la componente opaca verticale
$PT_{interpiano}$	Collegamento tra il solaio di interpiano e la componente opaca verticale
$PT_{fondazione}$	Collegamento tra il solaio di fondazione e la componente opaca verticale
$PT_{infixo}$	Attacco del telaio sul componente opaco verticale

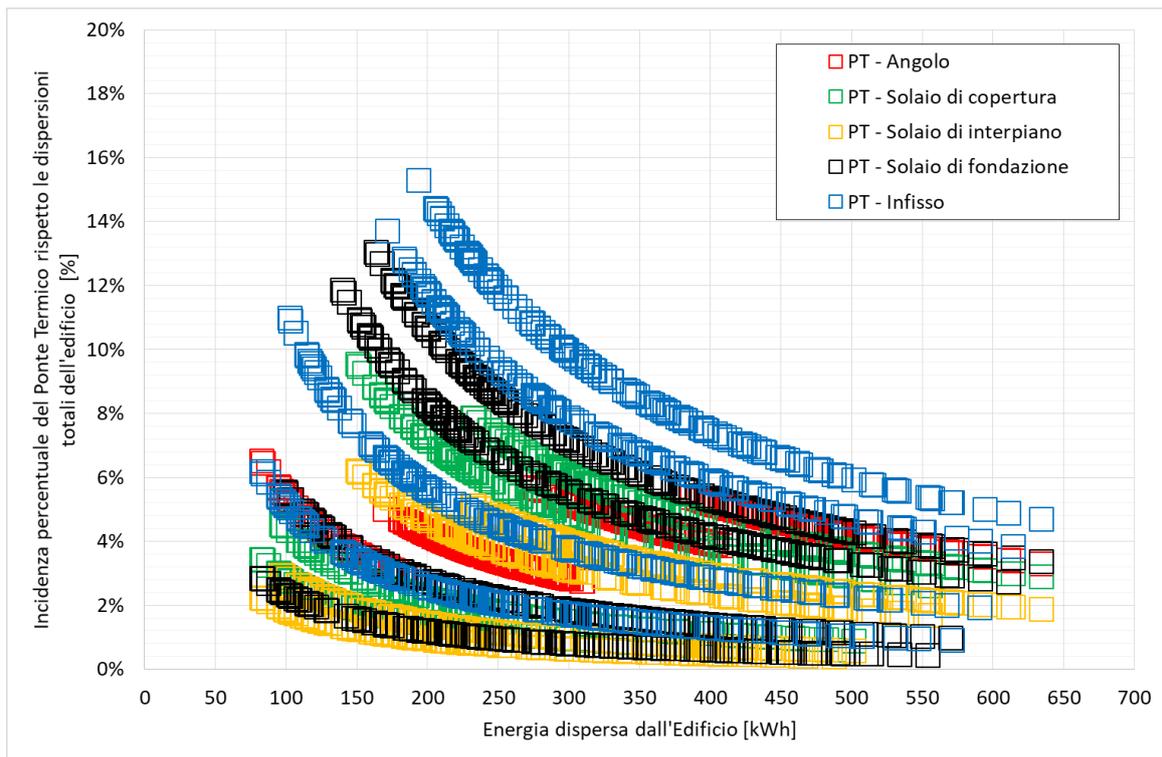


Figura 29 – Incidenza percentuale dei ponti termici analizzati al variare dell’energia dispersa.

Al variare della tipologia costruttiva, si sono quindi desunti dei valori percentuali medi per ciascun ponte termico considerato, osservando una differenza percentuale più o meno marcata in funzione del ponte termico stesso. Nello specifico, l’incidenza dei ponti termici oscilla da un valore minimo medio del 2.0% ( $PT_{interpiano}$ ) a un valore massimo medio dell’8.1% ( $PT_{infixo}$ ), confermando quanto emerso in altri e precedenti studi: il ponte termico più influente risulta essere quello dell’infixo (mediamente pesa circa il 7-8%) seguito dai ponti termici del solaio di copertura e del solaio di fondazione (entrambi compresi tra il 3.5% e il 5%), mentre il ponte termico del solaio di interpiano, previsto solo per i casi studio dell’edificio a torre, presenta valori che oscillano intorno al valore medio del 2.3%.

In accordo con questi risultati, si è quindi studiata l’incidenza al variare del livello di isolamento termico del componente opaco e solo per  $PT_{infixo}$  in funzione delle caratteristiche termiche dell’infixo (Tabella 32); risulta evidente che per alcuni ponti termici ( $PT_{interpiano}$  e  $PT_{pareti}$ ) presentino una variazione poco marcata dell’incidenza del ponte termico con il livello di isolamento della struttura la quale è stata riportata in tabella sia con la vecchia codifica (da  $I_1$  a  $I_5$ ) che con quella nuova (da Liv-Iso- a Liv-Iso-3 nelle parentesi quadre) in considerazione delle componenti effettivamente usate per l’analisi parametrica. Nel caso del  $PT_{pareti}$  la differenza percentuale tra una struttura non isolata ( $I_1$  o Liv-Iso-0) e una altamente isolata ( $I_5$  o Liv-Iso-3) è dello 0.8%, così come per il  $PT_{interpiano}$  che presenta una discrepanza dello 0.6%. Variazioni leggermente superiori sono invece riscontrabili per il  $PT_{copertura}$  e  $PT_{fondazione}$  dell’ordine dell’1%. Differenze più marcate, invece, sono riscontrabili per il  $PT_{infixo}$  variando significativamente da un minimo di 5.8% ad un massimo del’8.1%.

Nell'ottica di semplificare il calcolo dei ponti termici nelle analisi parametriche, le precedenti valutazioni sono state ulteriormente investigate per i casi con maggiori variazioni, analizzando la distribuzione percentuale del campione rispetto alla percentuale di incidenza.

I risultati ottenuti per  $PT_{\text{copertura}}$  e  $PT_{\text{fondazione}}$ , riportati in Figura 30, mostrano una variazione percentuale ben approssimata da una curva gaussiana incentrata tra il 3-5% di influenza del ponte termico, percentuale che includerebbe più del 75% del campione esaminato e circa il 95% ammettendo una sovrastima del ponte termico di circa l'1%. Pertanto, potrebbe essere plausibile considerare un valore medio di influenza percentuale sulle dispersioni di questi due ponti termici.

Gli approfondimenti sul caso del ponte termico creato dall'infisso, invece, sono state ulteriormente disaggregate per le quattro tipologie di infisso evidenziate in Tabella 32. I risultati (Figura 31) mostrano delle curve molto più schiacciate che tendono a crescere al miglioramento delle prestazioni termiche dell'infisso. Si tiene a precisare che un'analisi più approfondita ha permesso di far emergere come valori di influenza del ponte termico superiori al 13-14%, riscontrati prevalentemente con la tipologia di infisso 1 (trasmissanza maggiore  $4.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  – barra in nero), sia il risultato della combinazione dell'infisso con una componente opaca isolata. Come nei casi precedenti, questa soluzione, sebbene sia tecnicamente realizzabile, risulta essere una combinazione comunque poco probabile in quanto si ritiene che chiunque realizzi un intervento di ristrutturazione dell'edificio con un capotto termico, verosimilmente interverrà anche sulla sostituzione degli infissi, allo stesso modo, un edificio che presenta un infisso dalle prestazioni termiche scadenti difficilmente sarà caratterizzato da un cappotto termico.

Escludendo questo caso, quindi, anche per questo ponte termico potrebbe essere possibile considerare un valore medio compreso tra il 7% e il 9%, comprendo oltre il 70% del campione esaminato e commettendo un errore di circa il 2% nel calcolo delle dispersioni totali. Solo per la tipologia di infisso 4 (trasmissanza maggiore di  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  ma minore di  $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) si commetterebbe un errore relativo superiore al 2%; tuttavia, questa casistica è tipica di edifici con un consumo già molto basso, quindi in termini assoluti l'errore che si commetterebbe sarebbe comunque piccolo.

Tabella 32 – Incidenza percentuale dei ponti termici analizzati al variare del livello di isolamento delle componenti opache.

Codice Ponte Termico	Livello di isolamento delle componenti opache					
	$I_1$ [Liv-Iso-0]	$I_2$ [-]	$I_3$ [Liv-Iso-1]	$I_4$ [Liv-Iso-2]	$I_5$ [Liv-Iso-3]	
$PT_{\text{pareti}}$	3.2%	3.5%	3.7%	3.8%	4.0%	
$PT_{\text{copertura}}$	3.6%	3.7%	4.1%	4.4%	4.7%	
$PT_{\text{interpiano}}$	2.0%	2.1%	2.3%	2.4%	2.6%	
$PT_{\text{fondazione}}$	3.4%	3.9%	4.3%	4.7%	5.0%	
PT - Infisso	$U \geq 4.0 \text{ W/m}^2\text{K}$	5.8%	6.2%	6.7%	7.2%	7.8%
	$U \geq 3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$	6.0%	6.3%	6.7%	7.3%	7.9%
	$U \geq 2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$	6.0%	6.3%	6.8%	7.4%	8.0%
	$U \geq 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$	6.0%	6.3%	6.8%	7.4%	8.1%

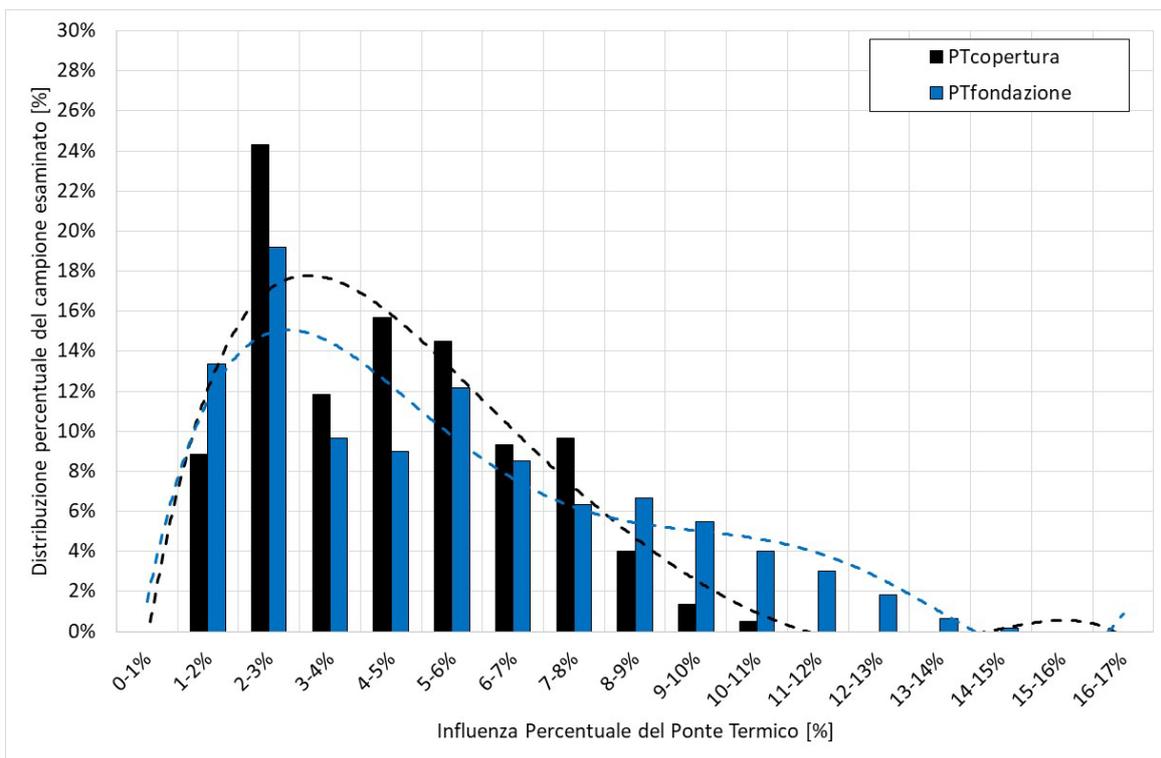


Figura 30 – Variazione percentuale dell’influenza dei ponti termici: PT<sub>copertura</sub> e PT<sub>fondazione</sub>.

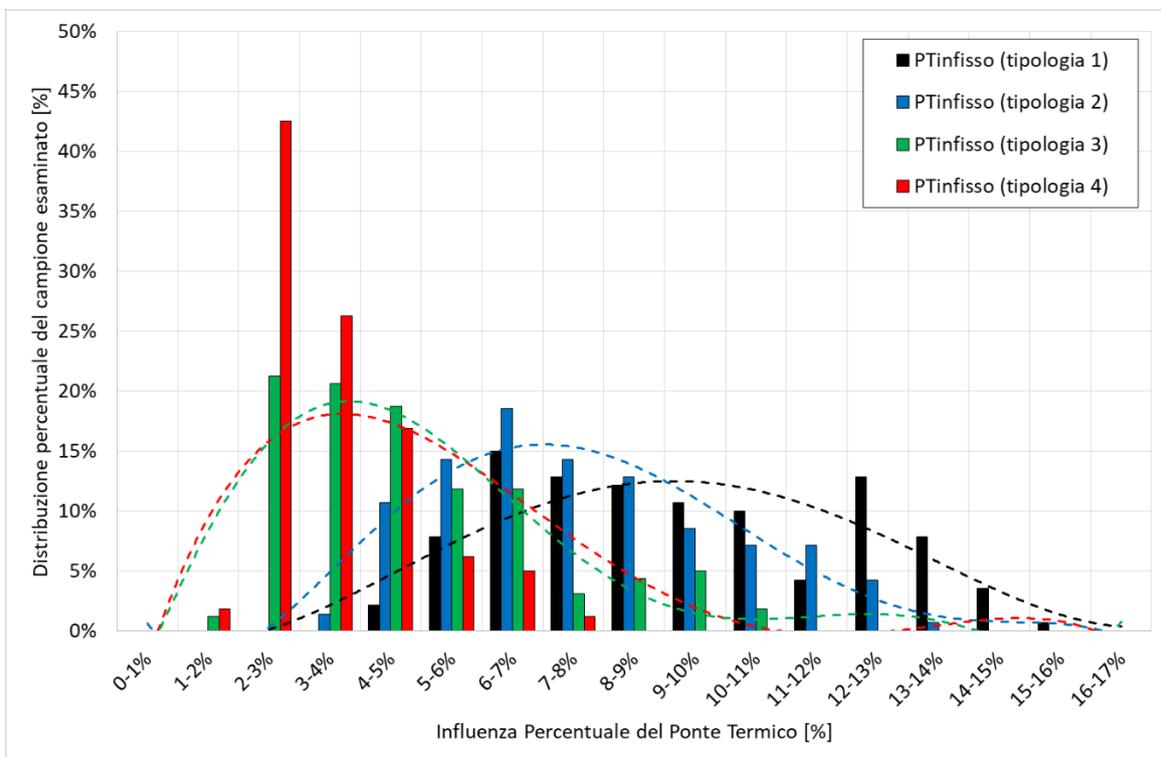


Figura 31 – Variazione percentuale dell’influenza dei ponti termici: PT – Infisso.

Sulla base dei risultati ottenuti, l’influenza percentuale media dei cinque ponti termici analizzati è stata mantenuta costante in tutte le simulazioni. I valori percentuali, assunti in maniera cautelativa con lo scopo di coprire la maggior casistica possibile, sono riportate in Tabella 33,

Si precisa che qualora in fase di validazione e verifica della metodologia si riscontrasse una notevole discrepanza con i risultati reali, sarà possibile raffinare ulteriormente l'analisi parametrica andando ad analizzare il contributo dei singoli ponti termici caso per caso.

Tabella 33 – Percentuale di influenza sulle dispersioni dei ponti termici considerata ai fini dell'analisi parametrica.

<b>Codice del ponte termico</b>	<b>Percentuale di influenza del ponte termico [%]</b>
$PT_{pareti}$	3.0
$PT_{copertura}$	5.0
$PT_{interpiano}$	3.0
$PT_{fondazione}$	5.0
$PT_{infixso}$	8.0

#### 2.4.4 Servizi energetici e configurazione impiantistica

Oltre al fabbricato, i casi studio sono stati caratterizzati anche con una specifica tipologia impiantistica per la copertura dei servizi energetici effettivamente presenti nell'unità immobiliare. Per la loro definizione si è fatto riferimento a quanto emerso nei risultati del primo anno di ricerca [1] che hanno permesso di definire e considerare le tipologie impiantistiche più comuni e diffuse per ciascun servizio energetico. Si precisa che, ai fini del presente lavoro, è stato necessario definire dei parametri per ciascun sottosistema impiantistico, ossia generazione, distribuzione, regolazione ed emissione.

Per tutti questi parametri è stato necessario fare delle semplificazioni e delle standardizzazioni cercando di coprire la maggior parte delle casistiche possibile tenendo conto che ciascuna assunzione comporterà una variazione del rendimento del singolo sottosistema:

1. sistema di emissione: i fattori predominanti sono la tipologia di terminale e la temperatura di esercizio. Il rendimento di emissione può quindi variare da un minimo di 92% (ipotizzando radiatori su parete non isolata con una temperatura di esercizio media di 70°C) a un massimo di 98% (ipotizzando pannelli radianti con una temperatura di esercizio media di 30°C);
2. sistema di distribuzione: questo è influenzato dalla tipologia, dalle temperature di esercizio, dalla temperatura degli ambienti all'interno dei quali corrono le tubazioni e dal livello di isolamento delle tubazioni stesse. Il rendimento di distribuzione può variare significativamente, da un minimo di circa 86% (condizione di un impianto centralizzato con tubazioni non isolate) ad un massimo di 98% (impianto a collettori con tubazioni isolate come prescritto dal [4]);
3. sistema di regolazione: il rendimento di regolazione può variare da un minimo di circa 93% (regolazione manuale) ad un massimo di 99% (regolazione di tipo proporzionale) dipendendo principalmente dalla tipologia di regolazione prevista nell'impianto;
4. sistema di generazione: questo è fortemente influenzato dalla tipologia, dalla potenza, dall'ubicazione e dalla temperatura di esercizio. A tale riguardo, ai fini dell'analisi parametrica, sono stati definiti e selezionati dei generatori di calore con caratteristiche rientranti nei range riscontrati nella precedente attività [1].

Si precisa che molti dei parametri elencati non possono essere sistematicamente implementati o meno in tutti i casi. Per questo motivo e in virtù delle considerazioni fatte, si è deciso di adottare per ciascun sottosistema le configurazioni più plausibili per ciascun sottosistema impiantistico e per i diversi servizi energetici (Tabella 34), definite sia sulla base dell'esperienza che di quanto emerso nello stato dell'arte condotto nel primo anno [1]. Nello specifico, come elementi terminali sono stati considerati i radiatori (operanti ad alta temperatura) e i pannelli radianti (operanti a bassa temperatura); quest'ultimi saranno abbinati solo però a sistemi che possono lavorare a bassa temperatura quali ad esempio pompa di calore e generatori a condensazione e solo nella configurazione di impianto autonomo. In funzione del livello di isolamento dell'edificio è stato assunto un equivalente livello di isolamento delle tubazioni dell'impianto, passando da un livello di isolamento scadente (indicato con la lettera D in tabella) a tubazioni isolate in maniera conforme alla normativa (indicato con la A). Solo nel caso di pannelli radianti si è ipotizzato di avere

sempre un livello di isolamento delle tubazioni conforme alla normativa (quindi A) perché si è ritenuta la configurazione più probabile e logica per questi sistemi. Sempre in merito al sottosistema di distribuzione, è stato previsto anche un serbatoio di accumulo di 300 litri ma solo quando combinato con una pompa di calore, essendo questa la configurazione impiantistica tipicamente più utilizzata.

Per l'ultimo sottosistema, invece, si è considerata una regolazione di zona con sonda climatica esterna e azione proporzionale nel caso di impianto autonomo, e con sonda climatica esterna e regolazione per singolo ambiente con azione proporzionale nel caso di impianto centralizzato. Le varie combinazioni possibili dei tre sottosistemi impiantistici sono dettagliati in Tabella 34.

Solo per il raffrescamento è stato possibile considerare una serie limitata di combinazioni, mentre per il riscaldamento è stato necessario prevedere ben dieci casistiche diverse e per la produzione dell'acqua calda sanitaria undici (di cui dieci combinate con il riscaldamento).

L'ultimo sottosistema da definire è quello di generazione, che influenza fortemente le prestazioni energetiche degli edifici. Sulla base di quanto emerso nell'analisi dello stato dell'arte [1] e in considerazione della metodologia di calcolo fornita dalle UNI/TS [61-66], sono stati definiti alcuni generatori di calore con caratteristiche tecniche rientranti nei range riscontrati nel primo anno di attività [1].

A titolo esemplificativo, si riportano in Tabella 35 le caratteristiche tecniche dei generatori di calore a combustione autonomi, mentre in Tabella 36 e Tabella 37 quelle della pompa di calore idronica e della macchina frigorifera.

Tabella 34 – Configurazioni adottate per i sottosistemi impiantistici di emissione, regolazione e distribuzione per i servizi energetici selezionati.

Servizio Energetico	n.	Sottosistema			
		Generazione	Emissione	Regolazione	Distribuzione
Riscaldamento	1	Autonomo	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Zona + Climatica Azione Proporzionale	Collettore Isolamento A
	2	Autonomo	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Zona + Climatica Azione Proporzionale	Collettore Isolamento B
	3	Autonomo	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Zona + Climatica Azione Proporzionale	Collettore Isolamento C
	4	Autonomo	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Zona + Climatica Azione Proporzionale	Collettore Isolamento D
	5	Autonomo	Pannello Radiante ( $\Delta T = 32-28^{\circ}\text{C}$ )	Zona + Climatica Azione Proporzionale	Collettore Isolamento A
	6	Autonomo	Pannello Radiante ( $\Delta T = 32-28^{\circ}\text{C}$ )	Zona + Climatica Azione Proporzionale	Accumulo + Collettore Isolamento A
	7	Centralizzato	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Climatica + singolo ambiente Azione Proporzionale	Collettore Isolamento A
	8	Centralizzato	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Climatica + singolo ambiente Azione Proporzionale	Collettore Isolamento B
	9	Centralizzato	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Climatica + singolo ambiente Azione Proporzionale	Collettore Isolamento C
	10	Centralizzato	Radiatori ( $\Delta T = 80-60^{\circ}\text{C}$ )	Climatica + singolo ambiente Azione Proporzionale	Collettore Isolamento D
Raffrescamento	1	Autonomo	Split ( $\Delta T = 16-24^{\circ}\text{C}$ )	Singolo ambiente Azione Proporzionale	Collettore Isolamento A
Produzione Acqua Calda Sanitaria	1-10	Combinato	T = $40^{\circ}\text{C}$	-	Metodo semplificato
	11	Autonomo	T = $40^{\circ}\text{C}$	-	Metodo semplificato

I generatori riportati in Tabella 35 e Tabella 36 sono stati adottati per il servizio riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria nella configurazione di servizio energetico combinato con il riscaldamento, mentre nel caso di generatore di calore autonomo per la sola produzione di acqua calda sanitaria si è fatto riferimento ad un boiler elettrico di potenza termica pari a 1.5 kW.

Si tiene a precisare che la potenza degli impianti è stata fissata in relazione a [1] ma anche con l'obiettivo di coprire il reale fabbisogno energetico delle singole unità immobiliari, pertanto tutti gli impianti selezionati permettono di garantire la copertura del singolo servizio energetico. Lo stesso approccio è stato adottato per gli impianti centralizzati, la cui potenza è stata determinata in funzione dell'effettivo fabbisogno energetico delle singole unità immobiliari dell'edificio a torre.

Tabella 35 – Caratteristiche tecniche dei generatori di calore di tipo autonomo.

Parametro	Generatore di calore			
	1	2	3	4
Generatore [-]	Standard		Condensazione	
Tipologia [-]	Monostadio	Multistadio	Modulare	Modulare
Combustibile [-]	Metano			
Ubicazione [-]	Centrale Termica			
Potenza nominale - Pn [kW]	26.7	26.3	26.7	30
Potenza minima - Pmin [kW]	0	11.2	10.4	6
Perdite al bruciatore [%]	On - Pn	7.1	5.1	7.1
	On - Pmin	0	15	15
	Off	0.1	0.1	0
Perdite al mantello [%]	2.29	1.8	2.6	0.2
Potenza assorbita bruciatore [W]	35	125	35	68
Potenza minima assorbita bruciatore [W]	0	24	24	24
Potenza assorbita pompa di circolazione [W]	153	153	153	153
Rendimento al 100 [%]	90.5	93.1	90.3	96.7
Rendimento al 30% [%]	92.5	92.4	88.6	108.1
Temperatura dei fumi –potenza nominale [°C]	-	-	-	82
Temperatura dei fumi ridotta [°C]	-	-	-	60
Temperatura di riferimento fumi [°C]	-	-	-	20
Tenore di Ossigeno [%]	-	-	-	6.5

Tabella 36 – Caratteristiche tecniche della pompa di calore idronica.

Temperatura [°]	Pompa di calore					
	COP			Potenza utile		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
-7	2.90	2.22	1.91	6.80	6.48	6.26
2	3.45	2.96	2.35	8.60	8.19	7.91
7	4.88	3.93	3.03	10.20	9.72	9.38
12	5.28	4.28	3.38	11.31	10.78	10.41

Tabella 37 – Caratteristiche tecniche della macchina frigorifera aria-aria.

Parametro [-]	Macchina frigorifera				
	100 %	75 %	50 %	30 %	25 %
EER	3.9	5.0	5.9	4.5	7.3
Potenza Utile	7.2	5.4	3.6	2.2	1.8

In aggiunta ai sistemi descritti, sono stati considerati anche sistemi a fonte energetica completamente rinnovabile, ossia pannelli solari termici e fotovoltaici. In accordo con quanto emerso con lo stato dell'arte [1], i pannelli solari sono stati considerati solo per la produzione di acqua calda sanitaria.

Entrambi i sistemi impiantistici sono caratterizzati da un'elevata variabilità, difficilmente parametrizzabile; pertanto si è deciso di adottare le seguenti tipologie impiantistiche nonché semplificazioni:

1. pannelli solari termici: analisi condotta considerando l'installazione di uno, due e tre pannelli sottovuoto collegati ad un accumulo termico;
2. pannelli fotovoltaici: installazione di 12 pannelli monocristallini di potenza pari a circa 240 W.

Si tiene a precisare che per entrambe le tipologie impiantistiche a fonte energetica rinnovabile, l'obiettivo non è stato quello di parametrizzare e analizzare la correlazione con il profilo asset e tailored, ma piuttosto quello di capire la reale incidenza al variare delle condizioni al contorno. Come verrà discusso di seguito, infatti, l'idea è stata quella di scorporare il contributo di questi sistemi da quello richiesto dalle altre tipologie impiantistiche determinando rispettivamente la quantità di volume d'acqua compensato dal solare termico e l'energia elettrica prodotta e potenzialmente utilizzabile in ogni mese dell'anno.

#### 2.4.5 Caratterizzazione dei profili di utilizzo

Nella metodologia di calcolo asset utilizzata per l'APE, il funzionamento dell'impianto viene considerato in continuo, ossia un impianto acceso fino alla copertura dell'effettivo fabbisogno energetico dell'edificio, quindi potenzialmente anche per 24 ore al giorno.

Nel metodo tailored, invece, il funzionamento dell'impianto è intermittente. Questo comportamento è sicuramente meno approssimato e permette una stima dei consumi energetici più realistica ma necessita di informazioni e di input sull'edificio indagato molto più dettagliati.

Per assolvere l'obiettivo principale del presente lavoro, ossia di identificare delle relazioni tra metodologia asset e tailored, identificando valori più realistici a partire da quelli presenti sull'APE, sono stati definiti dei nuovi profili di utilizzo per i diversi servizi energetici che considerano i seguenti aspetti:

1. produzione di acqua calda sanitaria: il volume dell'acqua calda richiesta per usi sanitari è calcolato sulla base del numero di persone e non della superficie utile;
2. climatizzazione invernale ed estiva: il funzionamento degli impianti è di tipo intermittente e non in continuo.

La definizione dei nuovi profili di utilizzo tailored è discussa in dettaglio nei seguenti paragrafi per servizio energetico, riportandone le differenze rispetto alla metodologia asset.

##### 2.4.5.1 Produzione di acqua calda sanitaria

Il primo profilo di utilizzo tailored identificato è per il servizio di produzione dell'acqua calda sanitaria. La normativa vigente propone per il settore residenziale il calcolo del volume di acqua per usi sanitari a partire dalla superficie utile dell'immobile e da due parametri (a e b) che dipendono entrambi dalla superficie utile degli immobili. Per il settore non residenziale, invece, il volume viene calcolato come prodotto di due fattori legati alla categoria di edificio e alla superficie utile dell'ambiente oppure al numero di occupanti. Quest'ultima è la metodologia di calcolo standard impiegata nella redazione dell'APE.

Ad esclusione del volume d'acqua consumato, il calcolo del fabbisogno energetico è analogo per tutte le destinazioni d'uso essendo in funzione del numero di giorni del mese e della differenza di temperatura con l'ambiente esterno.

Stimare il volume d'acqua calda sanitaria consumato sulla base dei consumi giornalieri degli occupanti permetterebbe di determinarne valori più realistici che varierebbero in base al numero di persone.

Nell'ottica di semplificare l'analisi, sono stati considerati dei valori cautelativi del volume d'acqua calda sanitaria consumato per persona e sono stati posti uguali per tutte le destinazioni d'uso.

Come sarà discusso di seguito, la successiva normalizzazione di questi valori rispetto ai parametri che maggiormente ne influenzano il calcolo, permetterà di estendere le relazioni matematiche identificate anche a casistiche non considerate nella presente trattazione.

Sulla base della normativa vigente, la condizione più cautelativa per la stima del volume di acqua consumato è quella del settore residenziale, da cui sono stati desunti i profili di utilizzo dipendenti dal numero di utenti effettivamente presenti e non dalla superficie utile dell'immobile.

Benché siano disponibili dei valori medi del volume di acqua per usi sanitari per persona al giorno al variare della destinazione d'uso, l'approccio adottato è stato differente, in quanto considera anche la tipologia degli apparecchi sanitari effettivamente presenti nelle unità abitative. Ad ogni tipologia di apparecchio è stato assegnato un consumo medio di acqua sanitaria (Tabella 38), secondo i dati disponibili nei quaderni Caleffi [70].

Il consumo medio di acqua sanitaria per persona è stato mediato in base ai valori presenti in Letteratura [73], secondo i quali una singola persona consuma 102 l/giorno (nel caso in cui nel bagno sia presente una doccia) e 242 l/giorno (nel caso in cui nel bagno sia presente una vasca): il consumo medio per persona è stato quindi assunto pari a 172 l/giorno.

A partire da questo valore di consumo medio, sono stati quindi definiti tre profili di utilizzo, semplicemente variando il numero di persone (Tabella 39).

Tabella 38 – Consumo medio di acqua per usi sanitari per apparecchio.

<b>Apparecchio sanitario</b>	<b>Consumo medio di acqua [l/giorno]</b>
Doccia	60
Lavabo	12
Bidet	10
Vasca da bagno	200
Lavello da cucina	20

Tabella 39 – Profili di utilizzo per il consumo di acqua calda sanitaria per edifici residenziali

<b>Codice profilo di utilizzo</b>	<b>Persone</b>	<b>Consumo medio giornaliero di acqua calda sanitaria [l/giorno]</b>
<i>P<sub>acs-min</sub></i>	1	172
<i>P<sub>2acs-med</sub></i>	2	344
<i>P<sub>3acs-max</sub></i>	3	516

#### 2.4.5.2 Edifici residenziali: riscaldamento e raffrescamento

La definizione dei profili di utilizzo per i servizi energetici di climatizzazione invernale ed estiva per gli edifici residenziali (E.1) è partita dall'analisi dei dati risultanti da una indagine ISTAT (in collaborazione con ENEA e MISE) inserita nel Piano Statistico Nazionale condotta nel 2013 su un campione rappresentativo della popolazione composto da 20,000 famiglie. Lo stesso campione è stato oggetto di analisi anche in precedenti attività di ricerca [75].

Poiché l'insieme dei dati rappresentativo dell'intero patrimonio edilizio nazionale in ambito residenziale si presenta disomogeneo, per raggiungere l'obiettivo preposto, si è reso necessario suddividere questo macro insieme in ulteriori sottoinsiemi fino ad arrivare ad insiemi il più omogenei possibile. Utile al processo metodologico per la ricostruzione dei profili di utilizzo degli edifici è stata una accurata analisi dei quesiti e delle risposte dell'indagine, sulla base della quale sono stati elaborati ed accorpati i dati come indicato nella terza colonna della Tabella 40 distintamente per ogni zona climatica. Il campione analizzato è stato, quindi, raggruppato attraverso il processo logico mostrato in Figura 32 in funzione di parametri e informazioni disponibili quali la zona climatica, la tipologia impiantistica, l'epoca di costruzione dell'immobile e le configurazioni edilizie. Il raggruppamento ha permesso di ottenere degli insiemi il più omogenei possibile.

Del campione disponibile e raggruppato si è andati ad esaminare la distribuzione per le diverse categorie di suddivisione adottate. In Figura 33 è mostrata la distribuzione in percentuale del campione analizzato messa a confronto con quella reale dei comuni italiani nelle sei zone climatiche; come si evince, la distribuzione del campione Istat è perfettamente in linea con la reale distribuzione dei Comuni italiani in ogni zona climatica, con percentuali molto piccole per la zona A (0.01% del campione) e maggiori nella zona più rappresentativa nella penisola italiana (circa il 43% dei dati nella zona climatica E).

Tabella 40 – Accorpamenti dei dati ISTAT per la valutazione dei profili di utilizzo.

Argomento quesiti	Dati forniti dall'indagine	
	Risposte quesiti	Accorpamenti per ricostruzione profili d'uso
Anno di costruzione	Prima del 1900	ante 1950
	Dal 1900-1949	
	1950-1959	1950-1970
	1960-1969	
	1970-1979	1970-1990
	1980-1989	
	1990-1999	
	2000-oggi	dopo il 1990
Tipo di abitazione	Casa, casale, villa o villetta unifamiliare	Unifamiliare
	Casa, casale, villa o villetta plurifamiliare o a schiera	Plurifamiliare
	Appartamento in edificio con meno di 10 unità	Appartamento
	Appartamento in edificio con 10-27 unità	
Piano dell'appartamento	Piano seminterrato	App. Piano Terra
	Piano terra o piano rialzato	
	Piano intermedio	App. Piano Intermedio
	Ultimo piano	App. Piano Ultimo
Impianto di riscaldamento	Sistema centralizzato per più abitazioni	Centralizzato
	Impianto autonomo a servizio della sola abitazione	Autonomo
	Apparecchi singoli fissi Apparecchi singoli portatili	

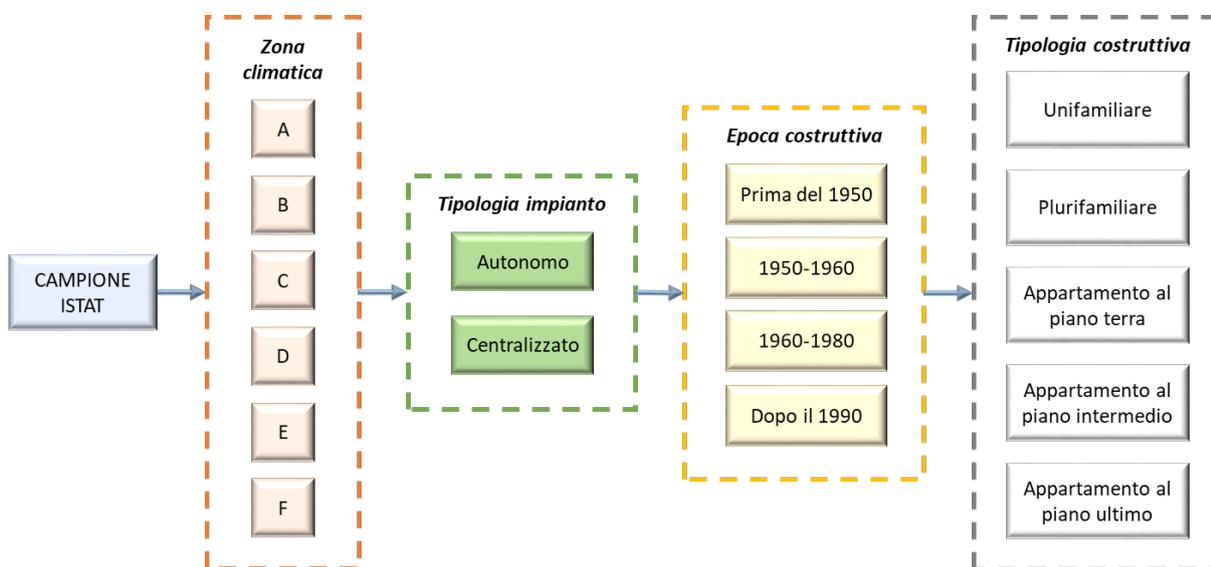


Figura 32 – Suddivisione e raggruppamento dei dati Istat per la definizione dei profili di utilizzo: processo logico.

Disaggregando ulteriormente il campione per tipologia impiantistica (centralizzata o autonoma) la distribuzione non è costante tra le varie zone climatiche (Figura 34), evidenziando delle percentuali più significative per le zone climatiche centrali. Su tutto il campione disponibile, quasi il 15% dei casi fa riferimento agli impianti centralizzati con dati prevalentemente nella zona climatica D ed E, mentre nella configurazione autonoma (circa l'84% del campione) le percentuali più rilevanti sono state ottenute per la zona C, D ed E. Per le zone climatiche più calde, invece, si è disposto di un campione inferiore al 5% per entrambe le configurazioni impiantistiche.

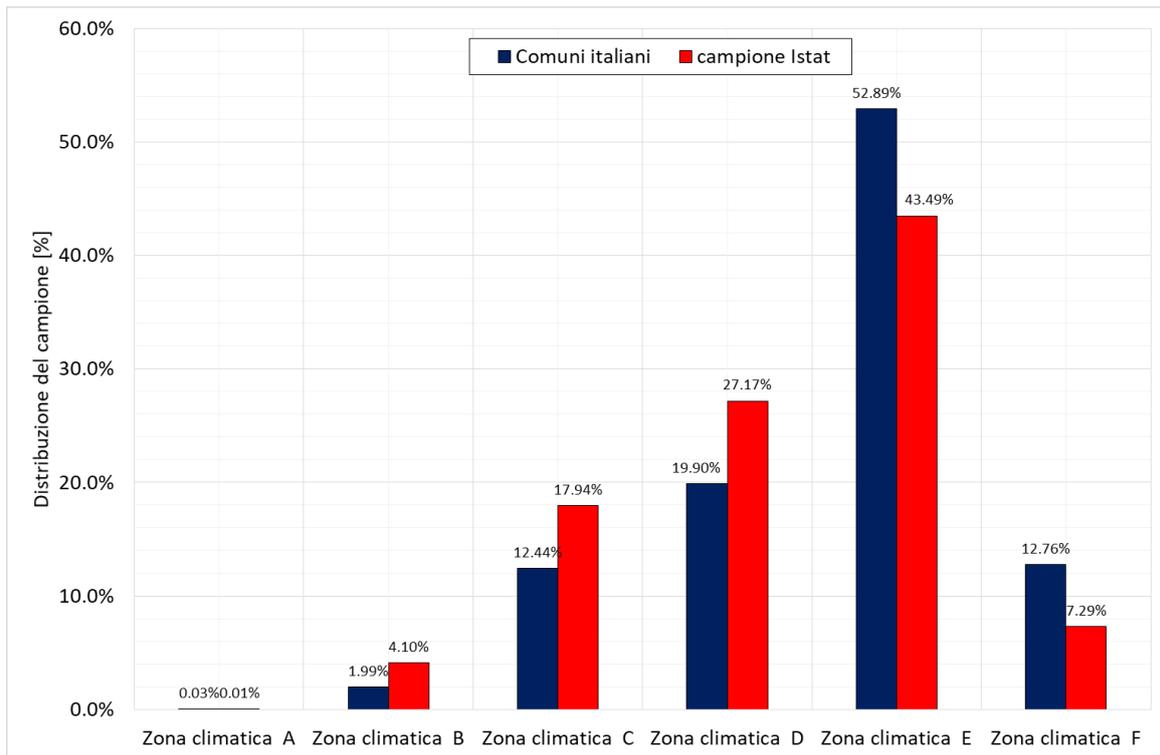


Figura 33 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per zone climatiche messo a confronto con la distribuzione reale dei Comuni italiani.

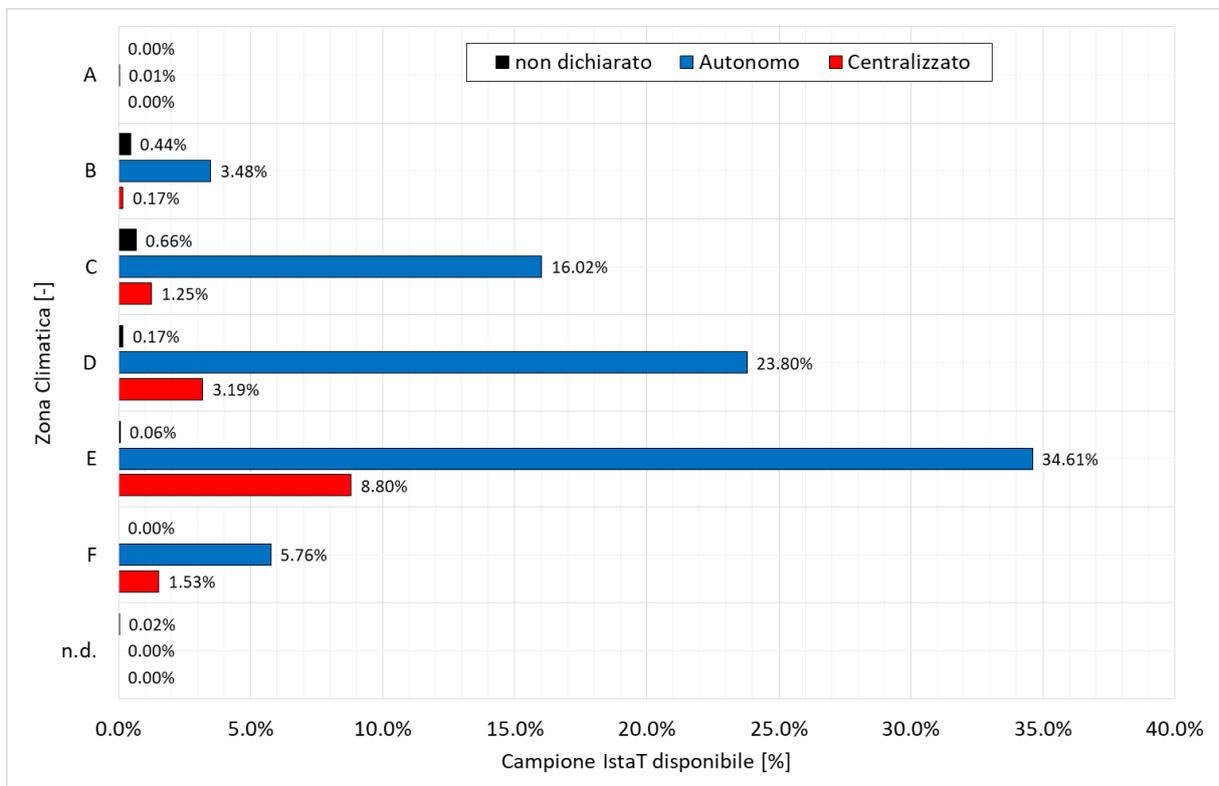


Figura 34 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per zone climatiche e per tipologia impiantistica

In accordo con il processo di riorganizzazione dei dati adottato (Figura 32), si è analizzata la distribuzione del campione anche rispetto l'epoca di costruzione (Figura 35) e la tipologia edilizia (Figura 36 e Figura 37) sempre in considerazione delle sei zone climatiche e della tipologia impiantistica considerata.

Dall'analisi di questi due ulteriori parametri si evince che:

1. impianto autonomo: rispetto l'epoca costruttiva il campione è distribuito in maniera uniforme con prevalenza di edifici costruiti tra 1970-1980 (circa il 36% dei dati). Per questa configurazione le informazioni disponibili sono prevalentemente relative ad edifici unifamiliari (circa il 40% del campione) e ad appartamenti posti al piano intermedio (quasi il 24% dei dati);
2. impianto centralizzato: la maggior parte del campione risale tra il 1950-1980 confermando come questa configurazione sia prevalente in edifici più datati. Tra questi le informazioni disponibili sono relative prevalentemente ad appartamenti posti al piano intermedio (più del 63% del campione Istat disponibile).

È necessario precisare che benché il campione analizzato possa risultare poco rappresentativo specialmente in alcune zone climatiche, si è ritenuto più rilevante identificare dei profili di utilizzo su dati reali, piuttosto che su dati teorici. Inoltre, in accordo con la metodologia di normalizzazione che si adotterà in fase di analisi, i risultati che si otterranno potranno essere estesi anche per orari di accensione dell'impianto differenti da quelli assunti in questa fase.

Qualora nel terzo anno di attività, in cui è prevista la validazione delle relazioni matematiche e dei benchmark con casi studio reali, si dovesse riscontrare una importante divergenza con i risultati derivanti dai suddetti profili di utilizzo tailored, si potrà prevedere di raffinare ulteriormente le analisi definendo nuovi profili di utilizzo tailored per gli impianti di climatizzazione invernale ed estiva.

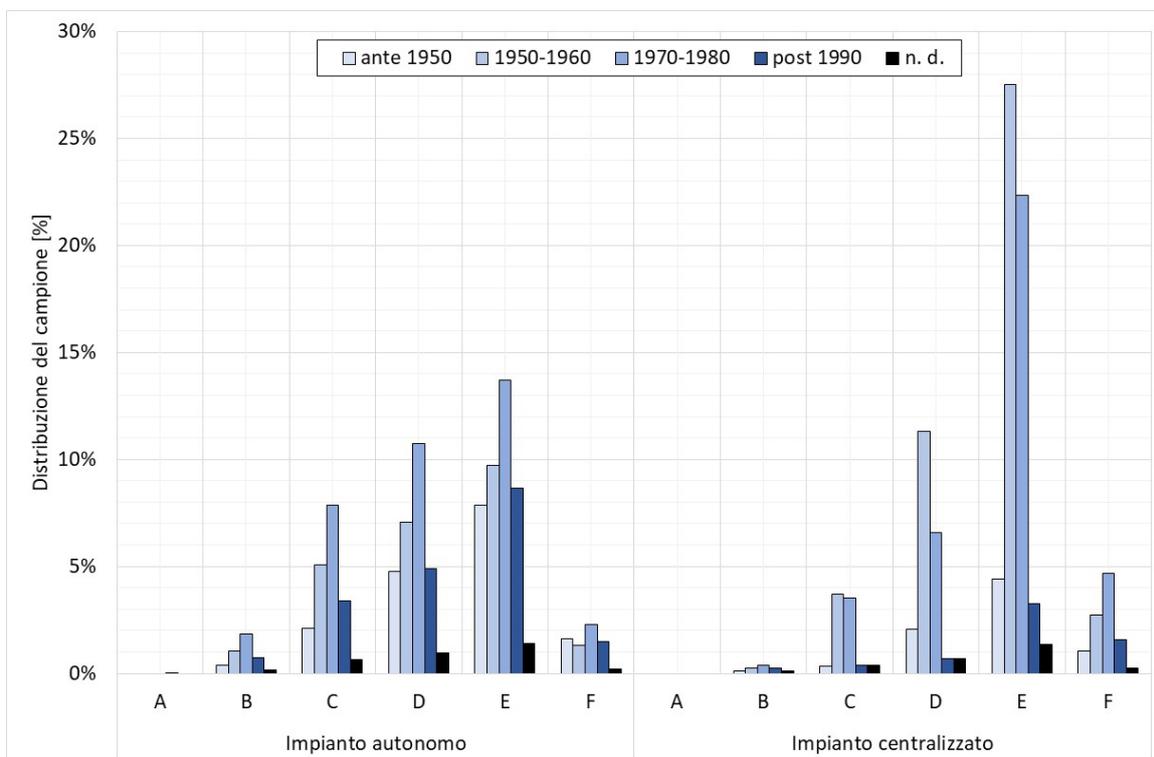


Figura 35 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per epoca di costruzione e per tipologia impiantistica nelle sei zone climatiche.

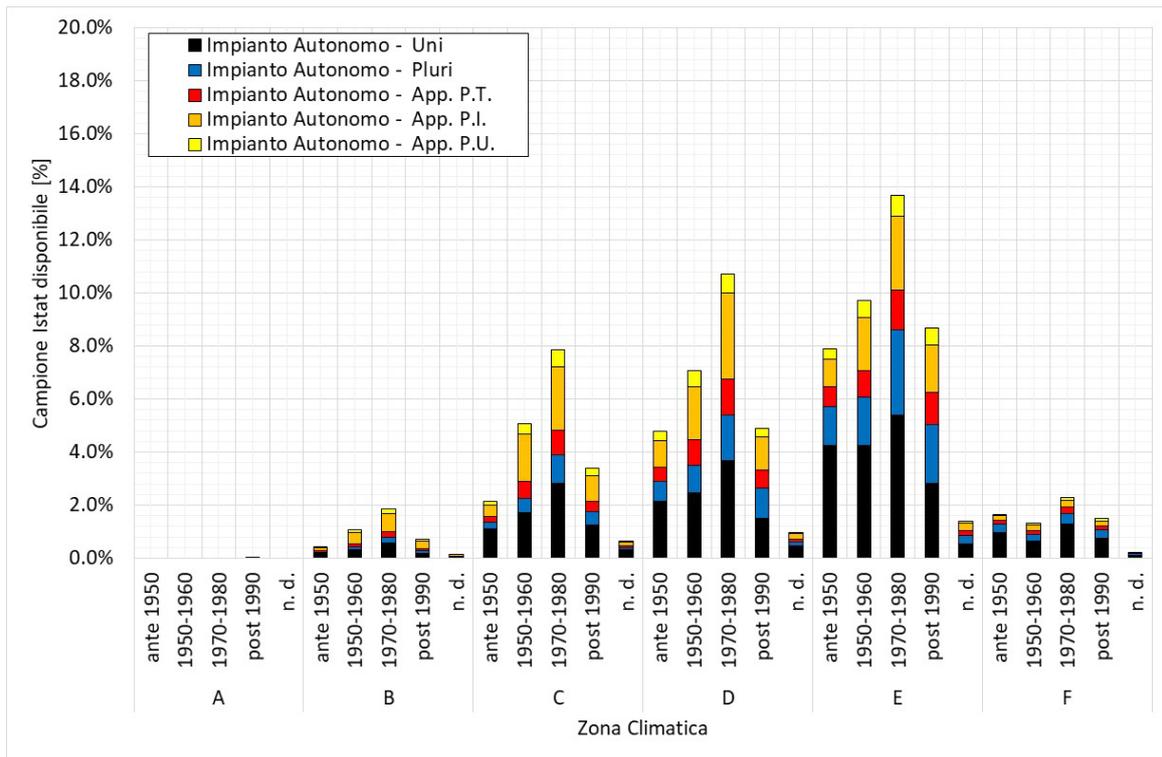


Figura 36 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per tipologia edilizia (unifamiliare, plurifamiliare, appartamento al piano terra, al piano intermedio e al piano ultimo) e per epoca di costruzione nelle sei zone climatiche nel caso di impianto autonomo.

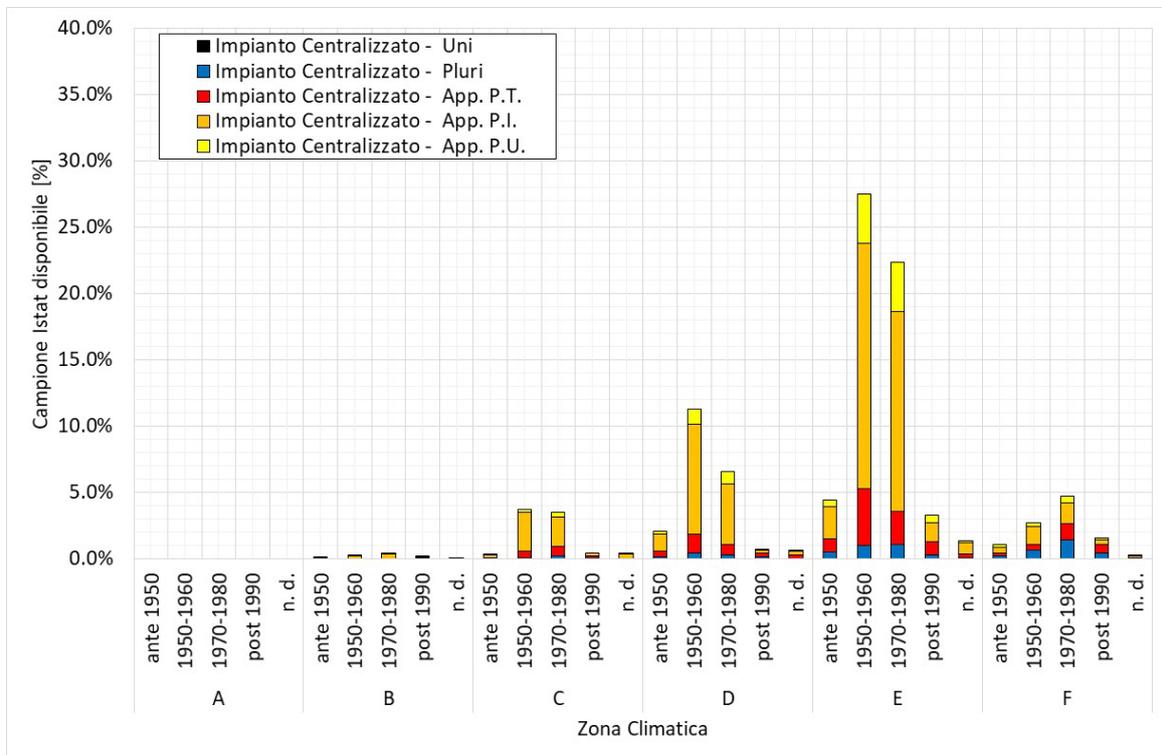


Figura 37 – Distribuzione percentuale del campione ISTAT raggruppato per tipologia edilizia (unifamiliare, plurifamiliare, appartamento al piano terra, al piano intermedio e al piano ultimo) e per epoca di costruzione nelle sei zone climatiche nel caso di impianto centralizzato.

A conclusione del processo di raggruppamento, si sono ottenuti 240 sottoinsiemi rappresentativi di unità abitative, eterogenei tra di loro, ma omogenei al proprio interno, tipici di una standardizzazione. Tale standardizzazione ha permesso di avere, ad esempio, un insieme caratterizzato esclusivamente da unità abitative plurifamiliari ad impianto autonomo costruite negli anni tra il 1950 e il 1970 e ricadenti nella zona climatica C, oppure un altro insieme caratterizzato esclusivamente da unità abitative ubicate al piano intermedio con impianto centralizzato costruite negli anni tra il 1970 e il 1980 e ricadenti nella zona climatica F. L'omogeneità interna ad ognuno dei sottoinsiemi ha consentito di procedere, per ognuno di essi, ad un raffronto di profili di utilizzo sulla base delle fasce orarie di accensione degli impianti.

Va evidenziato che questi sottoinsiemi sono il frutto di elaborazioni basate su elementi oggettivi e quindi standardizzabili.

A seguito della riorganizzazione del campione secondo quanto esposto in Figura 32, sono stati considerati gli aspetti comportamentali degli utenti definendo il numero di ore di accensione dell'impianto distinte in tre fasce orarie:

- fascia 1: dalle 5.00 alle 13.00;
- fascia 2: dalle 13.00 alle 21.00;
- fascia 3: dalle 21.00 alle 5.00.

Sulla base di questa ulteriore informazione si è predisposta una matrice con cui, tenendo conto di tutti i raggruppamenti adottati, è stato possibile analizzare le ripetizioni del numero di ore di accensione degli impianti, sia nella configurazione di impianto autonomo che centralizzato, in riferimento delle tre fasce orarie, della tipologia edilizia, dell'epoca di costruzione e della zona climatica. A titolo esemplificativo si riporta in Tabella 41 un estratto della matrice che si è costruita relativa alla zona climatica F per un edificio costruito prima del 1950 e nella configurazione di impianto autonomo.

I dati sono stati quindi analizzati mediante strumenti di analisi statistica [76], sfruttando principalmente gli indicatori di posizione (moda, mediana e media), che hanno permesso di individuare attorno a quale valore si accentra la distribuzione del campione. Questi sono stati utilizzati con lo scopo di identificare, in considerazione di tutto il campione disponibile per ogni sotto-raggruppamento, il valore medio, la massima frequenza (moda) e il valore centrale (mediana) assunto dalla variabile statistica. Si precisa che la mediana e la moda non tengono in considerazione le variazioni dovute ai valori estremi (massimo e minimo), comportando un ridimensionamento del risultato in un range privo degli estremi; il risultato che ne deriverebbe, quindi, risulterebbe meno rappresentativo rispetto allo scopo di analisi finalizzato al raggiungimento di un valore quanto più aderente alla realtà e rappresentativo dell'intero patrimonio edilizio ad uso residenziale. Per questo motivo, si è deciso di considerare sia la media che la moda come indicatori di posizione per la definizione dei profili di utilizzo.

Questi valori sono stati determinati in considerazione della disomogeneità del campione analizzato, della differente distribuzione tra impianto centralizzato e autonomo nonché tra tipologie edilizie. A titolo esemplificativo si mostra in Tabella 42 un esempio di calcolo del valore medio ottenuto per un appartamento posto ad un piano intermedio e realizzato tra il 1970-1980 nella configurazione di impianto autonomo e in tre distinte zone climatiche (C, D ed E).

I risultati complessivi dell'analisi condotta (Tabella 43) riportati per zona climatica e tipologia impiantistica, evidenziano una piccola variazione del valore medio rispetto le due configurazioni impiantistiche, con una differenza massima di un'ora, ma solo nella zona climatica C ed E, coincidendo, invece, nelle altre. Una discrepanza più significativa è stata invece riscontrata per la moda, con valori maggiori nella configurazione centralizzata.

In accordo con i risultati ottenuti e in considerazione delle numerose simulazioni energetiche da condurre, si è deciso di adottare una importante semplificazione, ossia di definire dei profili di utilizzo analoghi per entrambe le configurazioni impiantistiche; in particolare, la loro definizione si è basata sui risultati ottenuti per l'impianto autonomo presentando questo una maggiore rappresentatività (circa l'85% del campione).

Tabella 41 – Esempio di costruzione della matrice delle ore di accensione di un impianto autonomo per fascia oraria, tipologia edilizia, epoca di costruzione e zona climatica.

<b>Zona climatica F: edificio ante 1950</b>		<b>n. ore di accensione</b>										
<b>Tipologia edilizia</b>	<b>Fascia oraria</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>Totale</b>	
<i>Unifamiliare</i>	5:00-13:00	20	14	28	23	24	24	15	6	19	173	
	13:00-21:00	3	5	14	19	23	21	24	8	56	173	
	21:00-5:00	89	33	27	7	1	0	1	2	13	173	
<i>Plurifamiliare</i>	5:00-13:00	3	6	11	11	9	6	4	4	5	59	
	13:00-21:00	1	5	5	5	9	7	4	1	22	59	
	21:00-5:00	24	18	12	1	1	0	1	0	2	59	
<i>Appartamento</i>	<i>Piano Terra</i>	5:00-13:00	3	1	4	2	4	3	3	2	2	24
		13:00-21:00	1	1	1	1	6	4	0	2	8	24
		21:00-5:00	11	4	4	2	1	1	0	0	1	24
	<i>Piano Intermedio</i>	5:00-13:00	1	1	9	4	2	5	3	1	2	28
		13:00-21:00	1	0	4	6	3	3	1	1	9	28
		21:00-5:00	16	6	5	0	0	0	0	0	1	28
	<i>Piano Ultimo</i>	5:00-13:00	1	0	2	1	0	0	0	0	1	5
		13:00-21:00	1	0	0	0	0	1	2	0	1	5
		21:00-5:00	2	1	1	0	0	0	0	0	1	5

Tabella 42 – Esempio di calcolo del valore medio dell’orario di accensione dell’impianto autonomo per un appartamento posto ad un piano intermedio e realizzato tra il 1970-1980 nelle zone climatiche C, D ed E.

<b>Zona Climatica</b>	<b>Fascia oraria</b>	<b>n. ore</b>										<b>Media</b>		<b>Moda</b>
		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>Tot.</b>	<b>Fascia</b>	<b>Tot.</b>	
<i>C</i>	5:00-13:00	219	32	50	27	7	6	4	0	2	347	0:53		0
	13:00-21:00	12	22	76	86	63	55	17	9	7	347	3:24	5:11	3
	21:00-5:00	158	96	74	16	2	0	0	0	1	347	0:53		0
<i>D</i>	5:00-13:00	203	58	130	57	28	18	4	2	12	512	1:36		0
	13:00-21:00	15	27	77	108	114	71	41	20	39	512	3:56	6:31	4
	21:00-5:00	234	138	104	21	5	2	0	0	8	512	0:58		0
<i>E</i>	5:00-13:00	78	46	119	79	61	27	28	9	11	458	2:39		2
	13:00-21:00	4	20	48	82	112	72	39	24	57	458	4:25	8:03	4
	21:00-5:00	228	105	88	16	12	1	1	1	6	458	0:58		0

Tabella 43 – Media e Moda delle ore di accensione dell’impianto a partire dal campione di dati ISTAT per edifici di categoria E.1

<b>Zona Climatica</b>	<b>Impianto autonomo</b>		<b>Impianto centralizzato</b>	
	<b>Media</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Moda</b>
<i>A</i>	6	3	n.d.	n.d.
<i>B</i>	6	3	6	5
<i>C</i>	7	3	6	6
<i>D</i>	8	4	8	7
<i>E</i>	9	6	9	8
<i>F</i>	10	9	9	8

In accordo con i risultati ottenuti e in considerazione delle ore previste da normativa, sono stati definiti tre profili di utilizzo tailored giornalieri per il servizio energetico di climatizzazione invernale (Tabella 44), rappresentanti rispettivamente:

- $P_{\text{risc-min}}$ : numero di ore di accensione minimo (corrispondenti alla moda del campione analizzato);

- $P_{risc-med}$ : numero di ore di accensione medio (pari alla media derivante dall'analisi del campione);
- $P_{risc-max}$ : numero di ore di accensione massimo (corrispondente ai valori di normativa).

Relativamente alle ore previste da normativa, è necessario precisare che per la zona climatica F non vi sono restrizioni; tuttavia, al fine di ottenere dei risultati che si discostino da quelli più approssimati del metodo di calcolo asset, si è deciso di limitare il numero di ore  $P_{risc-max}$  della zona climatica F a 16 ore.

I profili di utilizzo tailored per il servizio di climatizzazione estiva non sono stati desunti da dati reali in quanto il campione dati disponibile non riporta informazioni in proposito. È stato necessario quindi adottare una metodologia differente impiegando una semplificazione, ossia considerando un profilo di utilizzo dell'impianto di raffrescamento complementare a quello per il riscaldamento. Pertanto, la zona climatica A sarà quella caratterizzata da un numero di ore di accensione maggiore, mentre alla zona F corrisponderà il numero di ore minimo.

Anche i profili di utilizzo tailored per il servizio di climatizzazione estiva sono mostrati in Tabella 44 distinti in:

- $P_{raff-min}$ : numero di ore di accensione minimo (complementare a  $P_{risc-min}$ );
- $P_{raff-med}$ : numero di ore di accensione medio (complementare a  $P_{risc-med}$ );
- $P_{raff-max}$ : numero di ore di accensione massimo (complementare a  $P_{risc-max}$ ).

Tabella 44 – Profili di utilizzo per il riscaldamento e il raffrescamento per edifici di categoria E.1

Zona Climatica	Riscaldamento			Raffrescamento		
	$P_{risc-min}$	$P_{risc-med}$	$P_{risc-max}$	$P_{raff-min}$	$P_{raff-med}$	$P_{raff-max}$
A	3	6	6	9	10	16
B	3	6	8	6	9	14
C	3	7	10	4	8	12
D	4	8	12	3	7	10
E	6	9	14	3	6	8
F	9	10	16	3	6	6

#### 2.4.5.3 Edifici non residenziali: riscaldamento e raffrescamento

Per quanto concerne il settore non residenziale sono state raccolte informazioni mediante ricerche in rete [77] e indagini condotte per mezzo di interviste a enti specifici. Il procedimento e la metodologia adottati è risultato molto meno articolato rispetto a quello del settore residenziale con una differenza sostanziale nella quantità di dati a disposizione.

A partire dai dati reperiti da [77], è stato possibile analizzare differenti tipologie di edifici, quali ad esempio questure, Inps, CAF-UIL, Agenzia delle Entrate, Anagrafe, uffici postali, banche, ecc. Di ogni tipologia sono state ricavate delle fasce orarie di apertura per ogni giorno della settimana, sintetizzate in Tabella 45, dove le caselle in rosso indicano gli orari di apertura dal lunedì al venerdì più frequenti per alcune categorie di edificio ed enti. Si precisa che per gli uffici postali si è riscontrata anche un'apertura al pubblico durante il sabato, mediamente dalle ore 8:30 alle 13:00, non riportati per omogeneità dei risultati.

Dall'analisi della tabella si evince come l'orario medio di apertura giornaliero degli edifici afferenti al settore non residenziale tenda a un valore medio di 8 ore, con una variazione da un minimo di 5-6 ore a un massimo di 10 ore. Tuttavia, in considerazione delle destinazioni d'uso non residenziali oggetto di analisi in questo lavoro (E.2 ed E.5) e specialmente in accordo con le superfici utili considerate per le stesse (80, 100, 120 m<sup>2</sup>), sono stati esclusi i dati relativi agli uffici postali. Il valore medio di ore di apertura giornaliero scende così a 7. Inoltre, l'orario di apertura al pubblico non coincide perfettamente con l'orario di accensione dell'impianto, il quale è mantenuto in esercizio in un arco temporale leggermente differito in considerazione anche dell'inerzia termica dell'impianto stesso. Tuttavia, le dimensioni contenute considerate nelle analisi rendono plausibile ipotizzare una piccola inerzia termica dell'impianto. È stato quindi considerato uno sfasamento aggiuntivo nell'accensione e spegnimento dell'impianto di circa un'ora, arrivando a un valore medio di accensione di 8 ore, corrispondente, tra l'altro, anche con l'orario lavorativo medio giornaliero tipico.

Tabella 45 – Orari di apertura più frequenti per alcune tipologie di edifici non residenziali dal lunedì al venerdì.

Edificio	Giorno	Orari di apertura medi												
		07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
QUESTURE	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
INPS	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
CAF	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
AGENZIA ENTRATE	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
ANAGRAFE	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
UFFICI POSTALI	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
BANCHE	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
MINISTERI	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													
CENTRI DI RICERCA	Lun													
	Mar													
	Mer													
	Gio													
	Ven													

Inoltre, per considerare la variabilità degli orari di apertura e, quindi, dell'accensione dell'impianto evinti dalle analisi, come per il settore residenziale sono stati considerati tre profili di utilizzo tailored differenti per servizio energetico analizzati (Tabella 46), quali:

- $P_{risc-min}$  e  $P_{raff-min}$ : numero di ore di accensione minimo;
- $P_{risc-med}$  e  $P_{raff-med}$ : numero di ore di accensione medio;
- $P_{risc-max}$  e  $P_{raff-max}$ : numero di ore di accensione massimo.

Si precisa, infine, che solo per la zona climatica A e per il profili di utilizzo medi si è deciso di fissare un orario medio di accensione dell'impianto pari a 6 ore invece di 8 ore, in quanto il valore medio riscontrato risulta essere superiore al valore massimo ammissibile da normativa (si vedano i profili  $P_{risc-max}$  e  $P_{raff-max}$ ).

Tabella 46 – Profili di utilizzo per il riscaldamento e il raffrescamento per edifici di categoria E.2 e E.5.

Zona Climatica	Riscaldamento			Raffrescamento		
	$P_{risc-min}$	$P_{risc-med}$	$P_{risc-max}$	$P_{raff-min}$	$P_{raff-med}$	$P_{raff-max}$
A	5	6	6	5	8	16
B	5	8	8	5	8	14
C	5	8	10	5	8	12
D	5	8	12	5	8	10
E	5	8	14	5	8	8
F	5	8	16	5	6	6

#### 2.4.6 Combinazioni di calcolo dell'analisi parametrica

A partire dalle valutazioni riportate sulla caratterizzazione dei casi studio sono state considerate tutte le combinazioni possibili al variare dei parametri esaminati.

Al paragrafo 2.4.2 sono stati definiti quattro casi studio in base alla destinazione d'uso e alla tipologia edilizia: i primi due afferenti alla categoria E.1 (un caso unifamiliare e uno edificio a torre), mentre gli altri due rappresentativi della categoria E.2 ed E.5.

Per ogni modello sono state definite tre dimensioni geometriche e, solo per la tipologia edilizia a torre, tre diversi piani dell'unità immobiliare all'interno dell'edificio, per un totale di ventiquattro combinazioni.

Noto il modello geometrico, sono state selezionate le tipologie costruttive, caratterizzate da diversi parametri termofisici variabili a seconda, ad esempio, della tipologia costruttiva e del livello di isolante, per un totale di 152 tipologie di componenti opache verticali e 52 orizzontali.

Ai fini delle analisi parametriche, i casi studio con i diversi pacchetti edilizi sono stati categorizzati in edifici esistenti e di nuova costruzione distinguendo per ciascuno di questi il differente livello di isolamento considerato. Questo approccio ha permesso di includere nelle analisi edifici di differente epoca costruttiva, nonché interventi di riqualificazione energetica e/o ristrutturazione di cui può essere stato oggetto lo stesso edificio nel corso degli anni. Gli edifici esistenti, a loro volta, sono stati suddivisi in tre sottogruppi in funzione del livello di isolamento dell'involucro edilizio. Combinando tra loro le diverse componenti opache, per ogni raggruppamento sono state definite un numero compreso tra 252 e 624 combinazioni diverse, per un totale di 2208 combinazioni di involucro per ciascun caso studio e per singola tipologia di infisso. Considerando che per l'involucro trasparente sono state assunte tre differenti tipologie, per ogni caso studio sono stati definiti 6624 modelli di simulazione energetica.

Per una maggiore chiarezza nell'esposizione, si riportano in Tabella 47 le diverse combinazioni geometriche e di involucro edilizio effettuate per il caso studio E1.t.U, ossia un edificio unifamiliare con destinazione d'uso E.1, per il quale sono state considerate oltre 15,000 combinazioni complessive diverse.

Ogni combinazione di involucro individuata è stata quindi oggetto di simulazione al variare sia della tipologia impiantistica che delle condizioni climatiche; considerando che il servizio riscaldamento è stato ipotizzato anche combinato con la produzione dell'acqua calda sanitaria e che quest'ultima può essere soddisfatta anche attraverso l'ausilio del solare termico, sono state definite ventiquattro potenziali combinazioni impiantistiche per i suddetti servizi. Queste sono riportate schematicamente in Tabella 48 per la produzione

dell'acqua calda sanitaria (simboli evidenziati in blu) e per il riscaldamento (simboli in rosso) al variare della configurazione di involucro adottata. Come descritto in 2.4.4, le tipologie impiantistiche operanti a bassa temperatura (caldaia a condensazione – GC4 e la pompa di calore – PdC) sono state considerate solo per edifici che presentano un buon livello di isolamento (Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3).

Combinando le casistiche mostrate in Tabella 47 con quelle in Tabella 48, per ogni caso studio sono state considerate complessivamente oltre 80,000 combinazioni possibili (comprensivo anche del solare termico) per il servizio di produzione dell'acqua calda sanitaria, mentre per il riscaldamento poco più di 33,400.

Oltre alle combinazioni riportate in Tabella 48, sono state considerate anche quelle relative all'impianto di raffrescamento e dell'impianto fotovoltaico. Come per il solare termico, si sono considerate sia le configurazioni che prevedono il servizio raffrescamento e fotovoltaico che configurazioni in cui questi non sono presenti, determinando complessivamente 96 combinazioni impiantistiche possibili per i vari servizi energetici.

In considerazione delle combinazioni di involucro mostrate in Tabella 47 e in Tabella 48, e in considerazione dell'unica configurazione impiantistica adottata per il raffrescamento e per la produzione di energia elettrica (fotovoltaico), per ogni singolo caso studio sono state condotte 1,336,320 simulazioni energetiche.

Tabella 47 – Definizione delle oltre 15000 combinazione per il caso studio E1.i.U.1.

Caso studio	Raggruppamento Edificio	Costruzione	Livello di isolamento	Involucro Edilizio			Infissi	Combo	
				Parete esterna	Solaio superiore	Solaio inferiore			
E1.i.U.1	Esistente	Muratura	11	21	4	3	3	756	
			13	21	4	3	3	756	
			14	21	4	3	3	756	
		Cemento Armato	11	23	4	3	3	828	
			13	23	4	3	3	828	
			14	23	4	3	3	828	
	Nuova costruzione	-	15	26	6	4	3	1872	
	E1.i.U.2	Esistente	Muratura	11	21	4	3	3	756
				13	21	4	3	3	756
14				21	4	3	3	756	
Cemento Armato			11	23	4	3	3	828	
			13	23	4	3	3	828	
			14	23	4	3	3	828	
Nuova costruzione		-	15	26	6	4	3	1872	
E1.i.U.3		Esistente	Muratura	11	21	4	3	3	756
				13	21	4	3	3	756
	14			21	4	3	3	756	
	Cemento Armato		11	23	4	3	3	828	
			13	23	4	3	3	828	
			14	23	4	3	3	828	
	Nuova costruzione	-	15	26	6	4	3	1872	

Tabella 48 – Combinazione impiantistica per il servizio riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria (tipologia impiantistica autonoma: BE: boiler elettrico, GC1: generatore monostadio, GC2: generatore multistadio, GC3: generatore modulante, GC4-AT: generatore a condensazione operante ad alta temperatura, GC4-BT: generatore a condensazione operante a bassa temperatura, PdC: pompa di calore, ST: solare Termico).

Combo involucro	Produzione di acqua calda sanitaria								Riscaldamento					
	BE	GC1	GC2	GC3	GC4-AT	GC4-BT	PdC	ST	GC1	GC2	GC3	GC4-AT	GC4-BT	PdC
Muratura-I1	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
Muratura -I3	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
Muratura -I4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cemento Armato-I1	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
Cemento Armato -I3	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
Cemento Armato -I4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nuove-I5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Le stesse considerazioni sono state fatte per la configurazione di impianto centralizzato, ottenendo 64 combinazioni impiantistiche. Si ricorda, infatti, che in base alle analisi condotte in [1], configurazioni centralizzate con pompa di calore risultano essere poco diffuse, così come i pannelli radianti in configurazioni centralizzate; pertanto, queste sono state considerate nella sola configurazione autonoma e solo per edifici dotati di un livello minimo di isolamento Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3, perché gli altri sono edifici molto più energivori per i quali non si sono riscontrati casi in [1]. Nella configurazione centralizzata, quindi, sono state condotte 1,059,840 simulazioni energetiche per singolo caso studio.

Queste simulazioni sono state effettuate in venticinque comuni diversi e con due metodologie di calcolo: la prima asset (metodologia utilizzata per l’APE) e la seconda Tailored. Per quest’ultima, come descritto in 2.4.5 sono stati definiti tre profili di utilizzo (uno minimo, uno medio e uno massimo) corrispondenti al numero di ore di accensione dell’impianto che quindi differiscono dal metodo asset.

Pertanto per ogni singolo caso studio, come ad esempio per E.1.t.PT.1 o per E.2.t.PT.1, sono state condotte oltre 133 milioni di simulazioni energetiche considerando una configurazione impiantistica di tipo autonomo e quasi 106 milioni per la configurazione centralizzata a parità di profilo di utilizzo per il servizio di produzione d’acqua calda sanitaria.

Sebbene, siano state adottate delle semplificazioni e che siano state fatte delle ipotesi semplificative, si ritiene che il campione costituito possa essere ben rappresentativo per l’obiettivo preposto in questo lavoro. Qualora si dovesse ritenere il campione non idoneo o comunque non sufficiente per il corretto sviluppo dei benchmark, è possibile prevedere un suo ampliamento variando alcune condizioni al contorno. 2

Si precisa, tuttavia, come sarà descritto di seguito, che tutte le analisi sono state condotte cercando di normalizzare per le diverse variabili e cercando di giungere a delle relazioni che dipendano dal maggior numero possibile di parametri.

## 2.5 Analisi delle simulazioni energetiche

A partire dalla definizione dei casi studio e di tutte le possibili configurazioni comprensive anche dei diversi profili di utilizzo degli impianti, è stato possibile condurre le simulazioni energetiche parametriche secondo la procedura e le combinazioni descritte nel paragrafo 2.4.6.

I dati sono stati analizzati per servizio energetico e per configurazione impiantistica utilizzata per la produzione di energia termica, mentre l'impianto fotovoltaico è stato considerato solo a valle di tutte le analisi ripartendo l'energia elettrica prodotta in funzione dell'effettivo fabbisogno elettrico di ciascun servizio energetico effettivamente presente, in accordo con la metodologia proposta dalla UNI TS.

Nei paragrafi che seguono sono state esposte le analisi condotte e i risultati ottenuti rispettivamente per la produzione dell'acqua calda sanitaria, per il riscaldamento e per il raffrescamento. Le simulazioni di ogni caso studio sono state svolte applicando ai vari servizi energetici i profili di utilizzo asset, ossia quelli utilizzati nella metodologia di calcolo dell'APE (asset rating), e i profili di utilizzo tailored, identificati al paragrafo 2.4.5, ossia quelli personalizzati a seconda delle caratteristiche del caso studio.

I risultati ottenuti sono stati ulteriormente analizzati in modo tale da delineare delle relazioni matematiche che leghino il profilo asset a quello tailored al variare di specifici parametri che caratterizzano ciascun servizio energetico.

A partire da queste relazioni matematiche, si sono quindi desunti dei benchmark che saranno oggetto di approfondimento nel paragrafo 2.6.

### 2.5.1 Produzione acqua calda sanitaria

Il primo servizio energetico analizzato è quello della produzione acqua calda sanitaria.

In base alla metodologia utilizzata nel profilo asset, un caso studio, di cui si vari la composizione dell'involucro edilizio, presenterà lo stesso consumo di acqua calda sanitaria. Analogamente, i tre profili di utilizzo tailored, definiti al paragrafo 2.4.5.1, dipendendo dal numero di fruitori dell'immobile (1, 2 o 3 persone), porteranno a consumi di acqua calda sanitaria equivalenti, indipendentemente dalla tipologia costruttiva dell'edificio.

La metodologia di calcolo dell'energia primaria per l'acqua calda sanitaria (metodo asset), infatti, dipende dal volume d'acqua consumato, dalla superficie utile e dalla differenza tra la temperatura di erogazione dell'acqua e quella dell'aria esterna media mensile. Quindi, valori diversi di energia primaria per questo servizio a parità di caso studio sono dovuti alla variazione della località, della superficie utile e dalla tipologia impiantistica per la generazione dell'energia termica.

Per i motivi appena descritti, i casi studio sono analizzati nel loro complesso, raggruppando le diverse configurazioni per dimensioni (Tabella 49) e variando le condizioni esterne nelle venticinque località selezionate al paragrafo 2.4.1.

Tabella 49 – Raggruppamento dei dati adottato nelle analisi sui consumi di acqua calda sanitaria sulla base della superficie utile del singolo caso studio.

<b>Casi studio considerati</b>	<b>Superficie utile [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Codice gruppo casi studio</b>
<i>E1.i.U.1</i>	100	E1.100
<i>E1.i.U.2</i>	135	E1.135
<i>E1.i.U.3</i>	168	E1.168
<i>E1.t.PT.1</i>	80	E1.80
<i>E1.t.PT.2</i>	100	E1.100
<i>E1.t.PT.3</i>	120	E1.120
<i>E1.t.PI.1</i>	80	E1.80
<i>E1.t.PI.2</i>	100	E1.100
<i>E1.t.PI.3</i>	120	E1.120
<i>E1.t.PU.1</i>	80	E1.80
<i>E1.t.PU.2</i>	100	E1.100
<i>E1.t.PU.3</i>	120	E1.120

Si precisa, inoltre, che non si sono riscontrate significative differenze tra le combinazioni impiantistiche di tipo centralizzato e autonomo. Queste due tipologie impiantistiche, infatti, sono caratterizzate da valori di rendimento di generazione, e quindi medi stagionali dell'impianto, leggermente diversi che comportano un'energia primaria lievemente superiore o inferiore in funzione della combinazione impiantistica. Questa differenza tra centralizzato e autonomo ha portato a trend e relazioni matematiche praticamente coincidenti o comunque molto simili a quelle identificate per la configurazione autonoma.

Al contrario, è stata invece riscontrata una significativa differenza al variare della tipologia di generatore di calore adottato.

In accordo con tale premessa, tutte le analisi saranno argomentate per tipologia di generatore di calore.

Con lo scopo di seguire una metodologia di analisi standard e con l'obiettivo di estendere le relazioni anche a casi studio diversi da quelli indagati, le analisi sono state svolte in base al seguente approccio:

6. analisi dell'energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria in base al profilo asset e ai profili tailored per ciascun caso studio in funzione della superficie utile e in ogni località di simulazione prescelta (si veda paragrafo 2.4.1);
7. normalizzazione dell'energia primaria rispetto al volume consumato di acqua calda sanitaria (si veda paragrafo 2.4.5.1) relativo al profilo di calcolo considerato;
8. definizione di una relazione matematica di correlazione dei risultati normalizzati tra il profilo asset e quelli tailored, come al punto 7, dipendente dal volume d'acqua calda sanitaria consumato;
9. normalizzazione dei dati calcolati al punto 6, rispetto al volume consumato di acqua calda sanitaria del relativo profilo di calcolo considerato e rispetto anche alla temperatura esterna media annuale delle città di simulazione, determinata a partire dai valori medi mensili forniti da normativa [67];
10. eventuale correzione della relazione matematica di cui al punto 8 in base ai risultati normalizzati come al punto 9, definendo una nuova relazione matematica dipendente dal volume consumato d'acqua calda sanitaria e dalle condizioni climatiche della località;
11. verifica delle equazioni identificate ai punti 8 e 11 confrontando i valori da queste restituiti con quelli ottenuti nelle simulazioni energetiche al variare del profilo di utilizzo.

Il contributo del solare termico è stato considerato in maniera differente con lo scopo di tener conto della grande variabilità di casistiche che si possono avere. Per questo si sono analizzati i dati con le tre configurazioni ipotizzate (un solo pannello, due e tre pannelli) andando a stimare il contributo del solare termico rispetto al volume di acqua calda sanitaria richiesto. L'idea, quindi, nel caso di configurazioni impiantistiche che prevedono anche un solare termico, è quella di stimare quanto volume di acqua viene compensato dal solare termico e quanto rimane a copertura dell'altra tipologia impiantistica presente.

Si precisa, inoltre, che le relazioni matematiche sono state determinate a partire dal valore dell'energia primaria totale, ma risultano perfettamente applicabili anche ai valori di energia primaria non rinnovabile e rinnovabile o agli indicatori energetici riportati nell'APE, essendo legati da una costante.

Inoltre, va notato che tutti i risultati delle analisi sono normalizzati, prima, per il solo volume consumato di acqua calda sanitaria e, poi, anche per la temperatura esterna media annuale. Come si vedrà nella successiva trattazione, questo doppio passaggio è necessario per mostrare come per alcuni generatori di calore la relazione identificata rimane esattamente la stessa.

Infine, si precisa che attraverso la normalizzazione dell'energia primaria per il volume consumato di acqua calda sanitaria, i valori normalizzati ottenuti per i tre profili tailored diventano perfettamente coincidenti a dimostrazione di un diretto legame con questa grandezza.

#### 2.5.1.1 Produzione acqua calda sanitaria: boiler elettrico

La prima tipologia di generatore di calore considerata è quella dell'impianto autonomo costituito da un boiler elettrico.

I casi studio (Tabella 49) sono stati simulati al fine di ottenere l'energia primaria necessaria per soddisfare il fabbisogno per la produzione di acqua calda sanitaria. In Figura 38 si mostra il confronto dei valori di energia primaria totale normalizzata rispetto al volume di acqua consumata ottenuta nelle ventacinque località di simulazione per tutti i casi analizzati; in particolare, nelle ascisse è riportata l'energia primaria normalizzata

richiesta secondo il profilo asset (APE) mentre nelle ordinate è riportata quella derivante dai tre profili tailored ipotizzati. I diversi indicatori e colori sono invece associati ai casi studio indagati e quindi a cinque gruppi mostrati in Tabella 49.

In Figura 38 si osserva un netto legame di tipo lineare tra il profilo asset e il profilo tailored, con una pendenza delle rette dipendente dalla superficie utile del caso studio considerato in quanto condiziona il risultato asset. La relazione ricavata dai risultati è del tipo:

$$EP_{tailored} = m * EP_{APE} + q \quad \text{Equazione 1}$$

dove l'intercetta della retta ( $q$ ) è una costante tendente a zero.

Ai fini del presente lavoro, il coefficiente angolare è stato mediato e pesato sulla superficie e assume un valore pari a 0.8899, in quanto il fabbisogno energetico tailored è in funzione della sola portata di acqua calda sanitaria e non della superficie utile dell'immobile. Si osservi infatti come al variare della superficie utile l'energia primaria normalizzata oscilla sempre tra 30-60 kWh/litri/giorno indipendentemente dalla superficie. In accordo con i risultati ottenuti è stato quindi possibile definire una relazione matematica che permetta di calcolare il fabbisogno di energia primaria totale in funzione del reale consumo d'acqua a partire dal valore determinato secondo il profilo asset (Equazione 2).

$$EP_{W_{profilo}} = \left( m \cdot \frac{EP_{W_{APE}}}{V_{H_2O_{APE}}} \right) \cdot V_{H_2O_{profilo}} \quad \text{Equazione 2}$$

In accordo con l'Equazione 2, quindi, l'energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria di un generico profilo di utilizzo è determinabile a partire dal volume d'acqua effettivamente consumato ( $V_{H_2O_{profilo}}$ ) e dall'energia primaria calcolata secondo il profilo asset ( $EP_{W_{APE}}$ ) normalizzata rispetto il volume di acqua calcolato con la metodologia asset ( $V_{H_2O_{APE}}$ ).

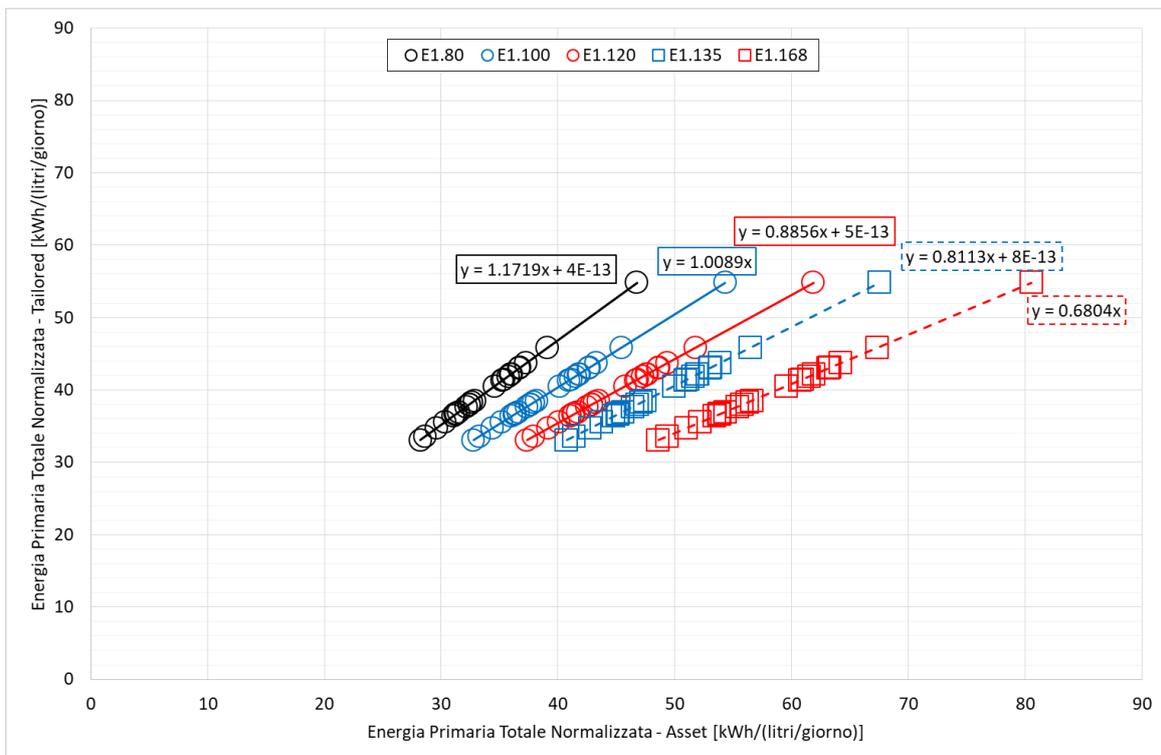


Figura 38 – Confronto dell'energia primaria totale per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating.

In considerazione dei molteplici obiettivi del lavoro, tra cui quello di estrapolare dei risultati più coerenti con la realtà a partire dai valori presenti negli APE, i risultati sono stati ulteriormente normalizzati rispetto al valore medio annuale della temperatura esterna della località di simulazione.

Come si osserva, i coefficienti angolari delle rette di interpolazione rimangono esattamente gli stessi rispetto a quelli individuati nei risultati di Figura 39. Ne conviene che l'Equazione 2 rimane valida.

La relazione matematica espressa dall'Equazione 2, in cui si è assunto un valore del coefficiente angolare  $m$  pari a 0.8899, è stata oggetto di confronto e verifica; in particolare, i valori restituiti da questa relazione sono stati confrontati con i risultati delle simulazioni energetiche al variare del profilo di utilizzo (Figura 40).

Il confronto evidenzia come i risultati analitici e quelli restituiti dalle simulazioni energetiche siano quasi coincidenti, con un errore relativo mediato su tutti i casi studio inferiore all'1%. Da un'analisi dell'errore più accurata, si è osservato che l'errore relativo raggiunge valori anche del 2% ma solo per l'E1.80 per cui si hanno dei volumi consumati di acqua più piccoli. In tutti gli altri casi l'errore relativo è sempre inferiore all'1%.

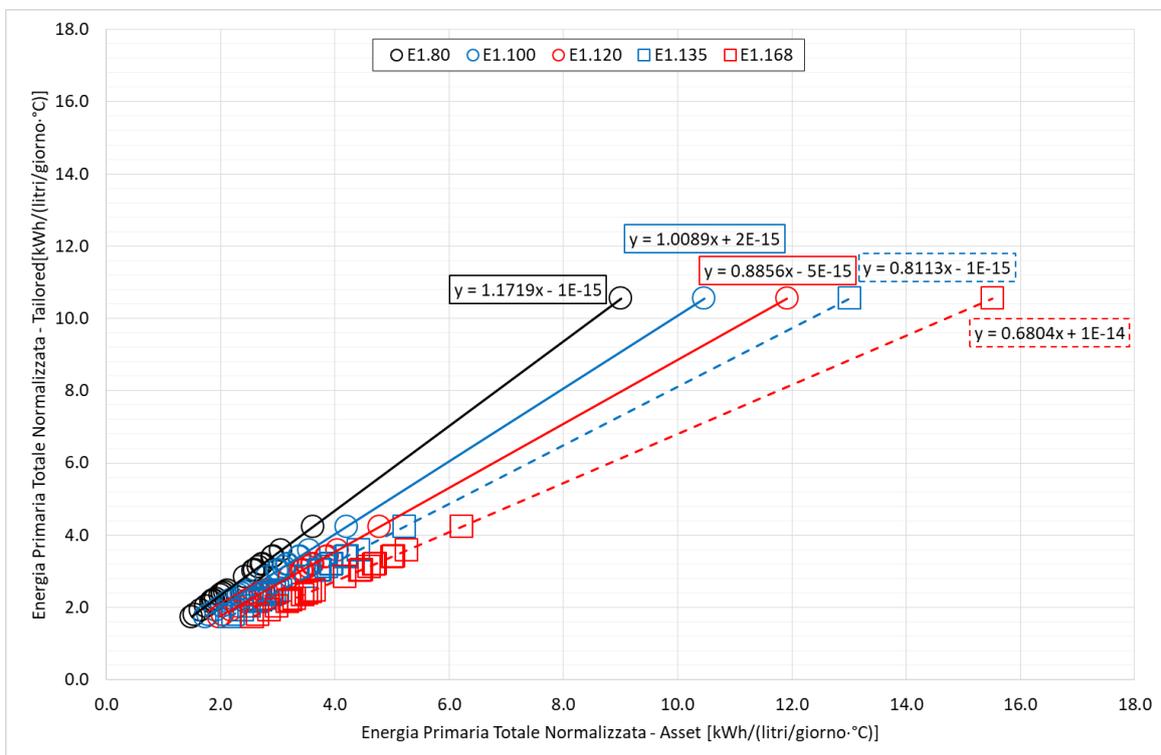


Figura 39 – Confronto dell'energia primaria totale per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating.

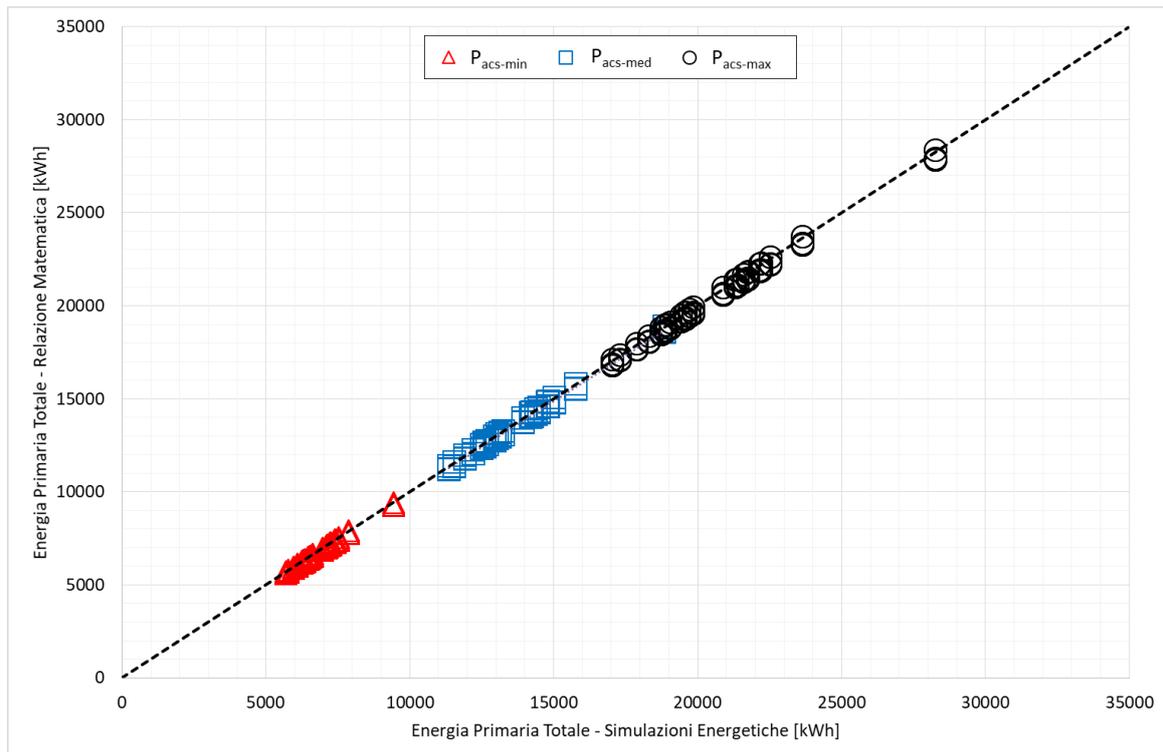


Figura 40 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 2.

### 2.5.1.2 Produzione acqua calda sanitaria: generatore a combustione monostadio

La seconda tipologia di generatore di calore analizzata è quella dell’impianto costituito da un generatore a combustione monostadio.

Come per le analisi con il boiler elettrico, anche in questo caso i valori dell’energia primaria totale normalizzata rispetto al volume di acqua calda sanitaria consumato (Figura 41) sono legati da una relazione lineare dall’Equazione 1, dove, però,  $q$  non è più una costante tendente a zero. La pendenza delle rette di interpolazione varia con il caso studio confermando una dipendenza del profilo asset con la superficie utile dell’immobile ma del tailored per il quale l’indicatore normalizzato oscilla sempre all’interno del range 10-25 kWh/litri-giorno.

Analizzando separatamente i valori di  $m$  e di  $q$ , è stato possibile definire la relazione matematica che lega il profilo asset con quello tailored per un generatore di calore a combustione di tipo monostadio (Equazione 3) che permette di calcolarne il fabbisogno di energia primaria totale in funzione del reale consumo d’acqua e a partire dallo stesso indicatore determinato secondo il metodo asset.

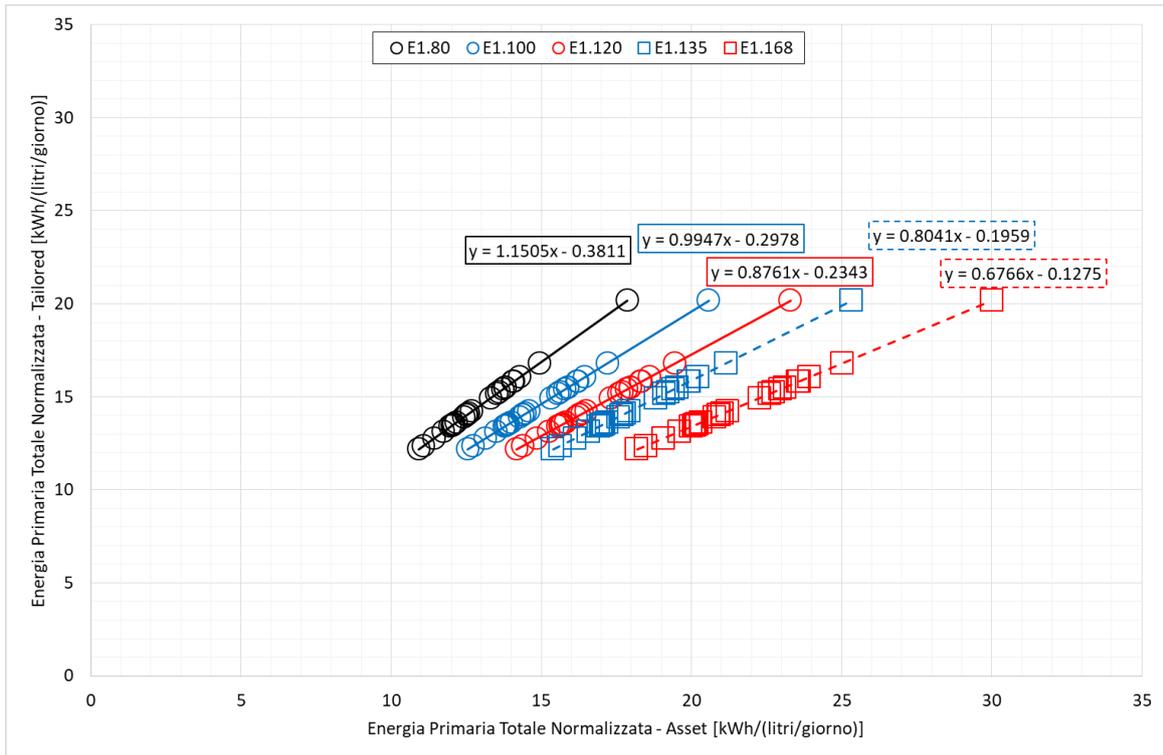


Figura 41 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating.

$$EP_{W_{profilo}} = \left( m \cdot \frac{EP_{W_{APE}}}{V_{H_2O_{APE}}} + q \right) \cdot V_{H_2O_{profilo}} \quad \text{Equazione 3}$$

dove i coefficienti  $m$  e  $q$  valgono rispettivamente 0.8795 e -0.2362 calcolati come media dei coefficienti  $m$  e  $q$  pesati sulla superficie.

In accordo con l’Equazione 3, quindi, l’energia primaria di un generico profilo di utilizzo tailored è determinabile a partire dal volume d’acqua effettivamente consumato ( $V_{H_2O_{profilo}}$ ), dall’energia primaria calcolata secondo il profilo asset ( $EP_{W_{APE}}$ ) normalizzata rispetto il volume di acqua calcolato con la metodologia asset ( $V_{H_2O_{APE}}$ ) e da una costante  $q$  dipendente dalla tipologia impiantistica.

I risultati dell’energia primaria totale sono stati quindi ulteriormente normalizzati rispetto al valore della temperatura esterna media annuale della località di simulazione effettuando un ulteriore confronto tra i risultati legati al profilo asset con quelli del profilo tailored (Figura 42). In questo caso i valori di  $m$  e  $q$  tendono ad assumere valori leggermente diversi rispetto ai risultati normalizzati rispetto al solo volume d’acqua; l’Equazione 3 va quindi aggiornata con l’Equazione 4 che permette di tener conto anche delle effettive condizioni climatiche esterne della località di simulazione. Ugualmente, il coefficiente angolare  $m$  e l’intercetta  $q$  sono stati aggiornati assumendo rispettivamente i valori di 0.8699 e -0.0056.

Infine, l’Equazione 3 e l’Equazione 4 sono state oggetto di verifica, ottenendo risultati tra le due coincidenti e un errore relativo medio inferiore all’1% rispetto alle simulazioni energetiche per tutti i casi studio (Figura 43). In accordo con i risultati ottenuti, è quindi plausibile ipotizzare l’utilizzo della sola Equazione 4 per il calcolo dell’energia primaria totale tailored per un generatore di calore a combustione di tipo monostadio.

$$EP_{W_{profilo}} = \left( m \cdot \frac{EP_{W_{APE}}}{V_{H_2O_{APE}} \cdot T_{media-ext}} + q \right) \cdot V_{H_2O_{profilo}} \cdot T_{media-ext} \quad \text{Equazione 4}$$

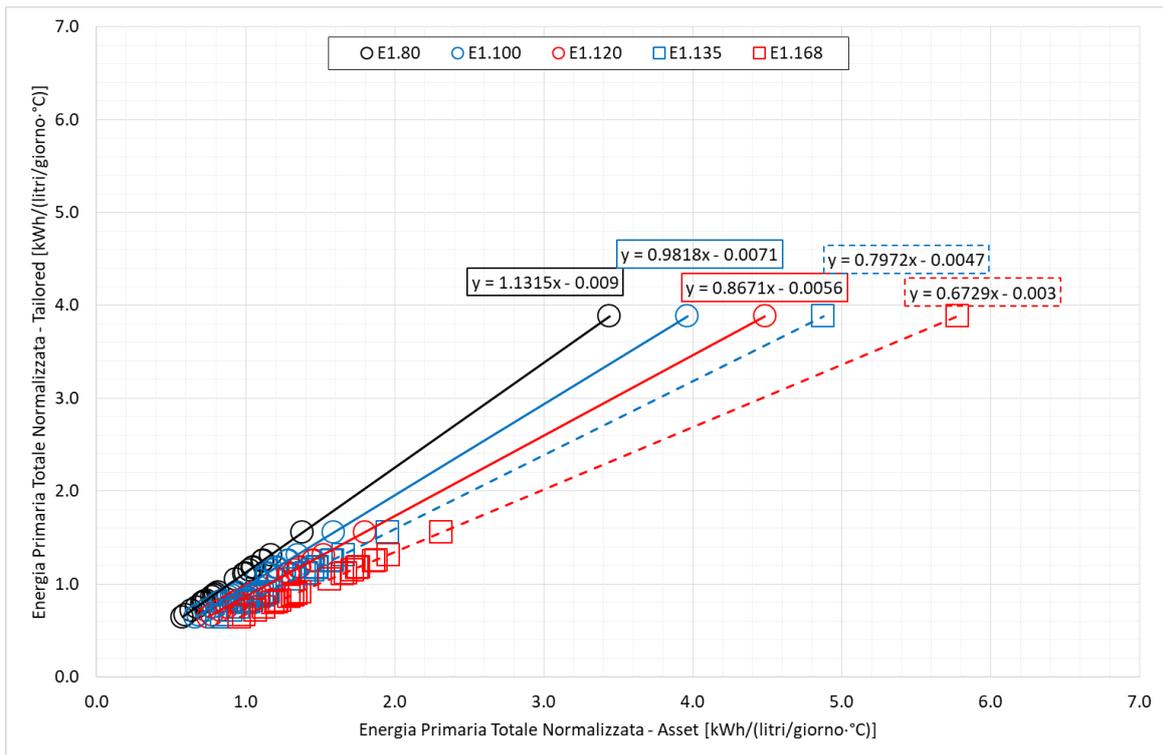


Figura 42 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating.

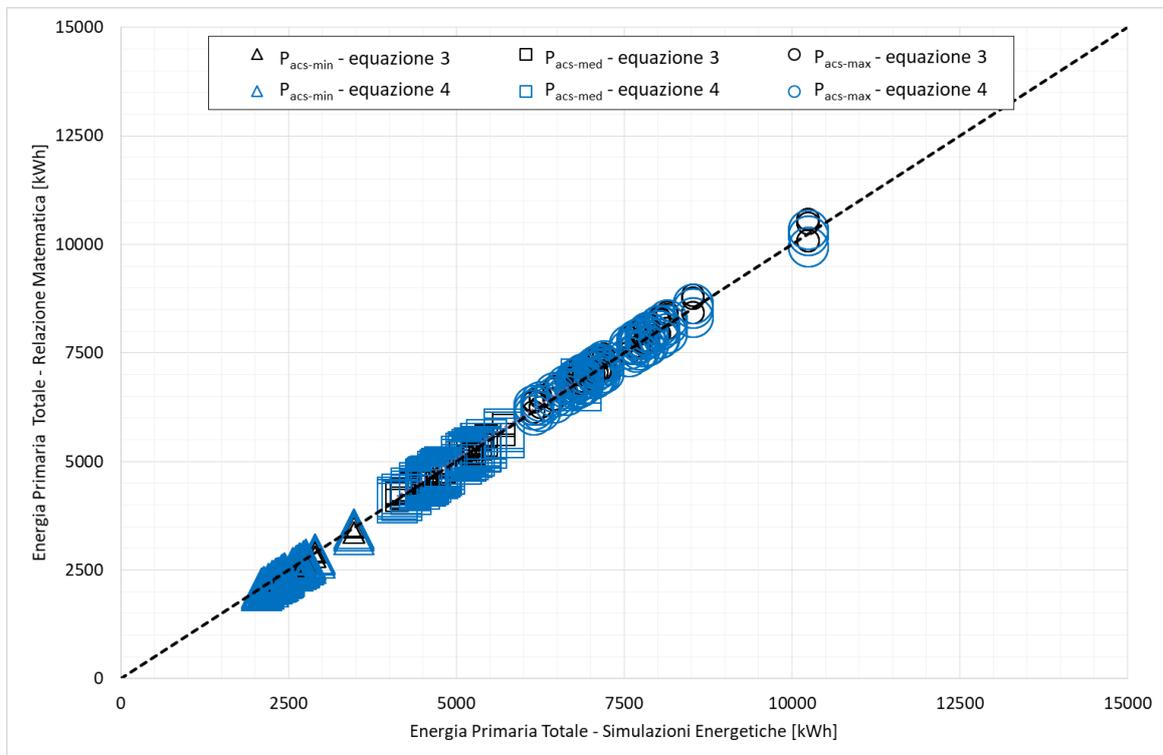


Figura 43 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 3 e dall’Equazione 4.

2.5.1.3 Produzione acqua calda sanitaria: generatore a combustione multistadio

La terza tipologia di generatore di calore analizzata è quella dell'impianto costituito da un generatore a combustione di tipo multistadio.

I valori dell'energia primaria normalizzati per il volume consumato di acqua calda per usi sanitari (Figura 44) indicano un legame sempre di tipo lineare tra il profilo asset e il profilo tailored (Equazione 1), pervenendo alla stessa relazione matematica definita per il generatore monostadio (Equazione 3) e caratterizzata dai coefficienti  $m$  e  $q$  pari rispettivamente pari a 0.8805 e -0.2214.

Elaborando i valori di energia primaria totale normalizzati anche per la temperatura esterna media annuale delle località di simulazione (Figura 45), si ottengono dei valori di  $m$  e  $q$  leggermente diversi. Anche in questo caso, quindi, l'Equazione 3 è stata aggiornata con l'Equazione 4, dove  $m$  e  $q$  assumono rispettivamente un valore pari a 0.8715 e -0.0052, permettendo di calcolare l'energia primaria per un generatore a combustione di tipo multistadio in funzione del reale consumo d'acqua, delle effettive condizioni climatiche esterne e a partire dal valore determinato attraverso l'APE.

Infine, in Figura 46 si riportano i risultati derivanti dalla verifica effettuata tra le due equazioni, dal cui confronto diretto si evincono valori perfettamente coincidenti, con quelli simulati con i tre profili di utilizzo tailored. Anche per il generatore di calore multistadio si è riscontrato un errore relativo medio inferiore all'1% per tutti i casi studio; pertanto, è ancora plausibile utilizzare solo l'Equazione 4 per il calcolo dell'energia primaria.

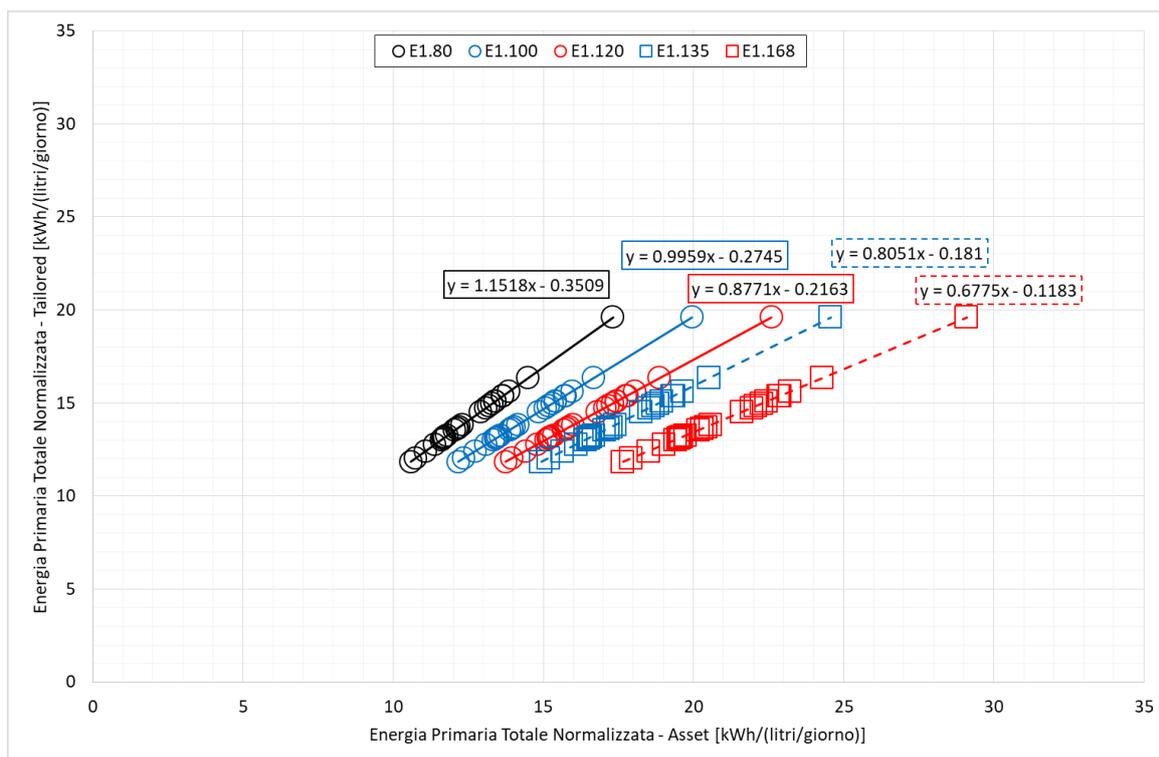


Figura 44 – Confronto dell'energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating.

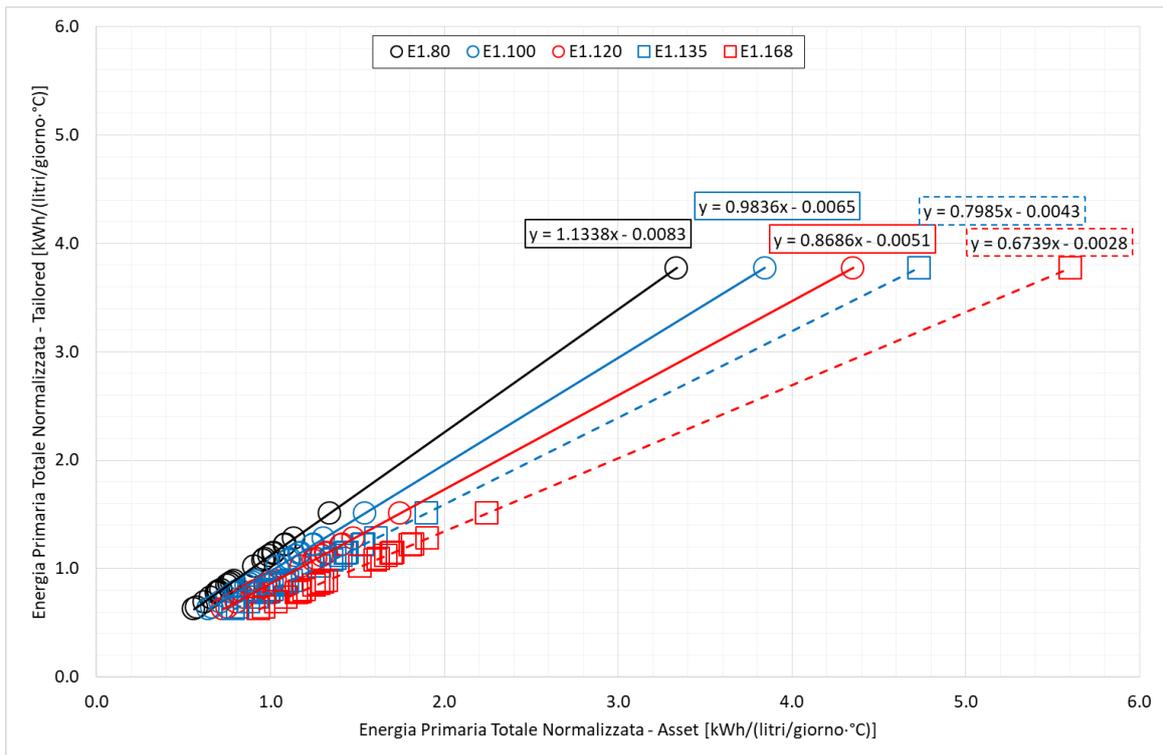


Figura 45 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating.

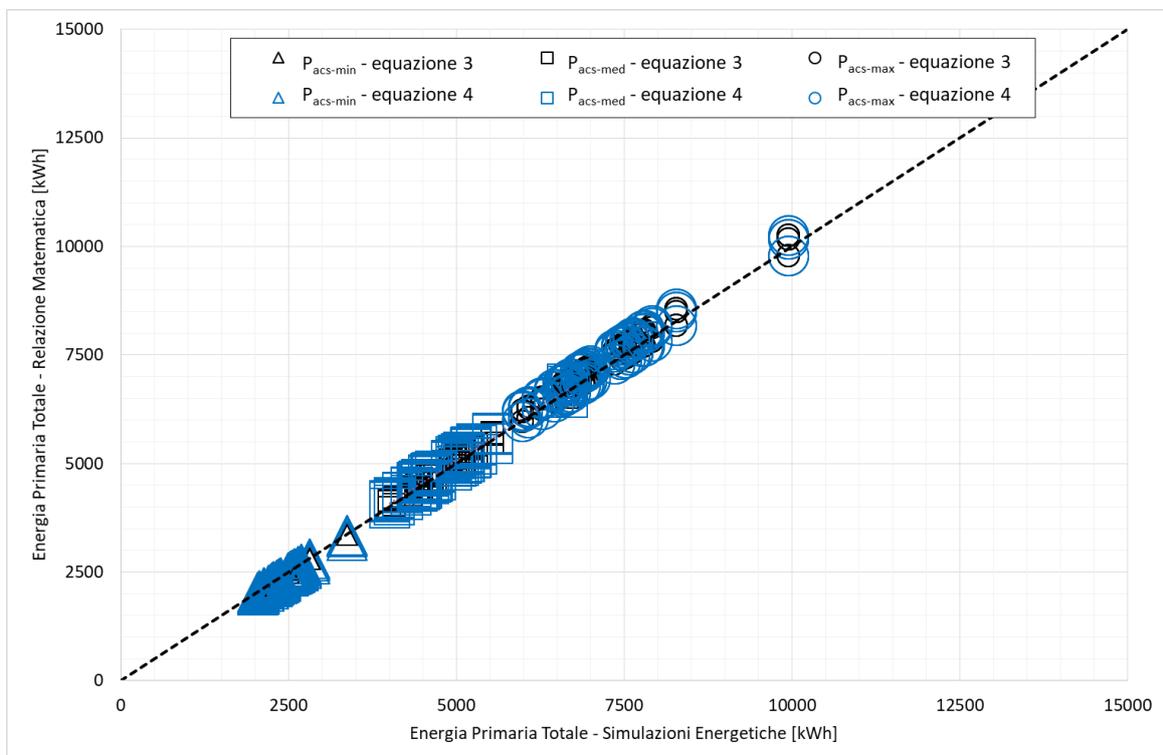


Figura 46 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 3 e dall’Equazione 4.

2.5.1.4 Produzione acqua calda sanitaria: generatore a combustione modulante

La quarta tipologia analizzata è quella dell'impianto costituito da un generatore a combustione di tipo modulante.

I risultati dell'energia primaria normalizzata per il volume consumato di acqua calda sanitaria (Figura 47) comprovano un legame lineare (Equazione 1) tra il profilo asset e i profili tailored; risulta quindi possibile determinare il fabbisogno di energia tailored mediante l'utilizzo dell'Equazione 3 a partire dal reale consumo d'acqua e considerando lo stesso indicatore energetico calcolato con il metodo asset dove i coefficienti  $m$  e  $q$  valgono rispettivamente 0.8861 e 0.015 (calcolati come media pesata rispetto la superficie dei coefficienti mostrati in figura).

Come per gli altri generatori, l'energia primaria è stata normalizzata anche per le temperature esterne medie annuali delle località di simulazione (Figura 48); i risultati confermano come anche per il generatore modulante sia necessario aggiornare l'Equazione 3 con l'Equazione 4, dove però, in questo specifico caso i coefficienti  $m$  e  $q$  assumono rispettivamente i valori pari a 0.8867 e 0.0004. Diversamente dagli altri generatori di calore, si osservi come a seguito della seconda normalizzazione, il valore dell'intercetta assuma sempre un valore costante al variare del caso studio.

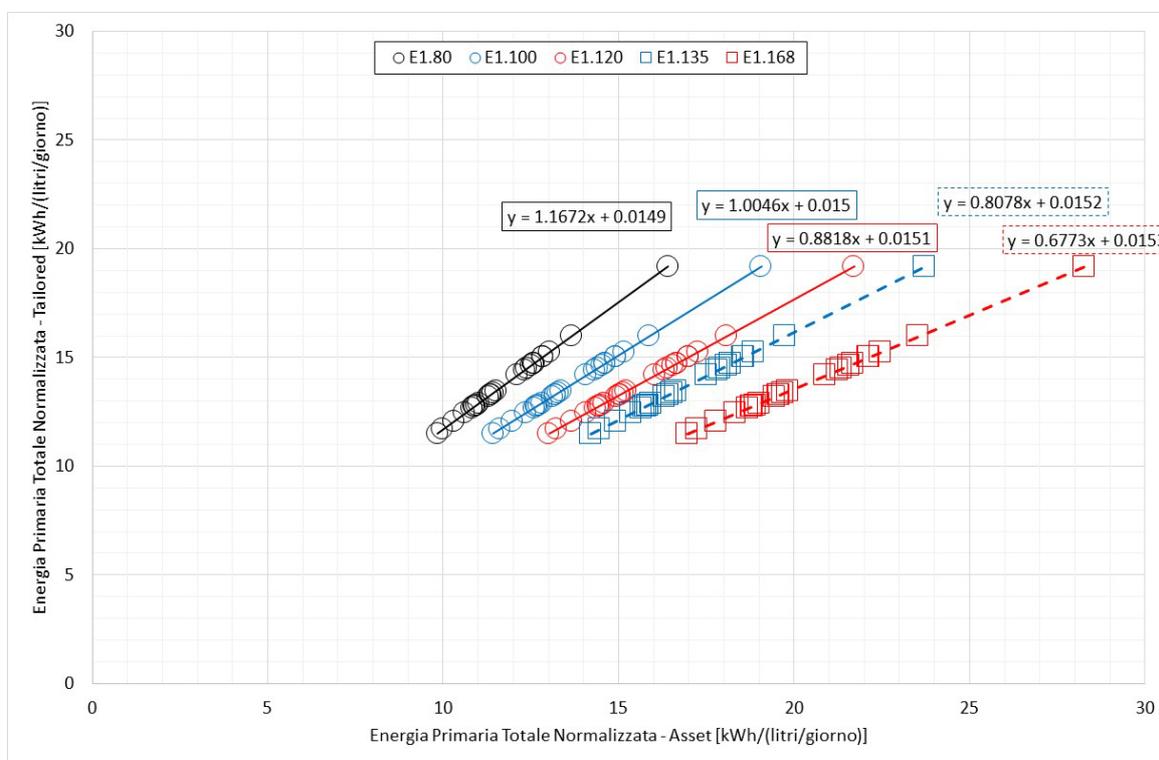


Figura 47 – Confronto dell'energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating.

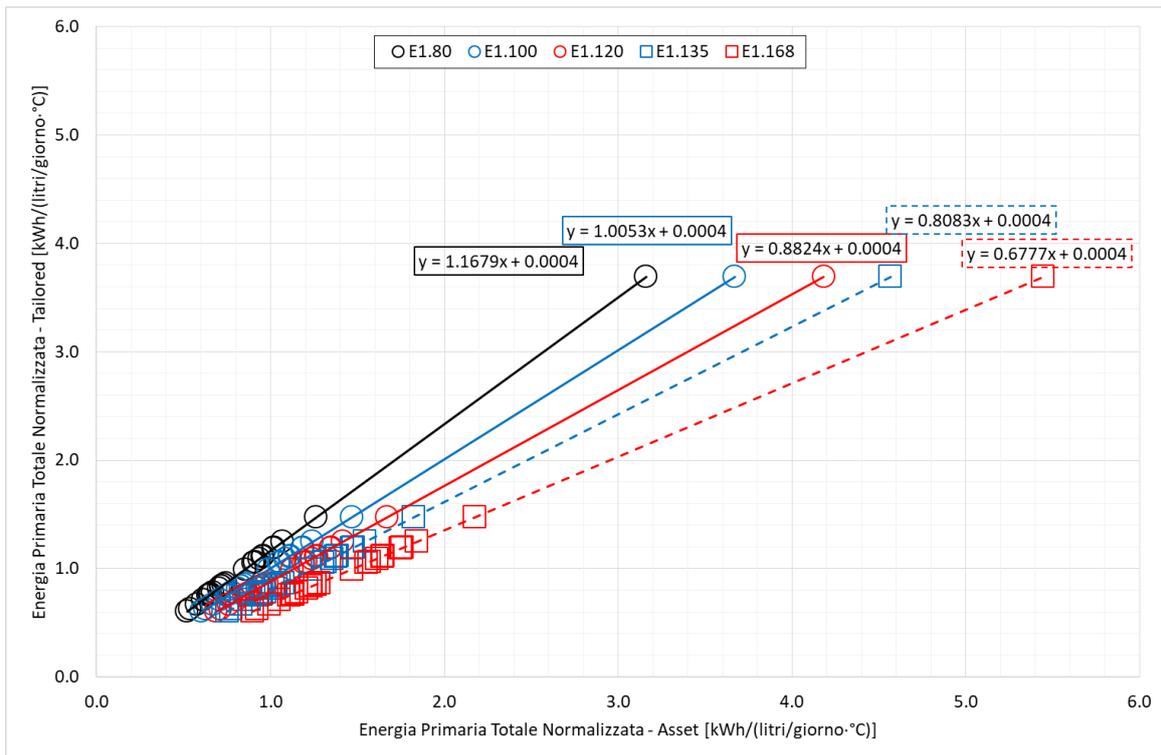


Figura 48 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating.

Infine, le due equazioni, entrambe con i rispettivi coefficienti  $m$  e  $q$ , sono state oggetto di verifica rispetto i valori di energia primaria restituiti dalle simulazioni energetiche (Figura 49) ottenendo un errore relativo medio inferiore all’1% per tutti i casi studio.

I risultati, inoltre, evidenziano un risultato coincidente tra le due equazioni trovate; pertanto, risulta plausibile l’utilizzo della sola Equazione 4 per il calcolo del fabbisogno di energia primaria per un generatore a combustione modulante in funzione del reale consumo d’acqua, delle effettive condizioni climatiche esterne e considerando il medesimo indicatore determinato attraverso la metodologia asset.

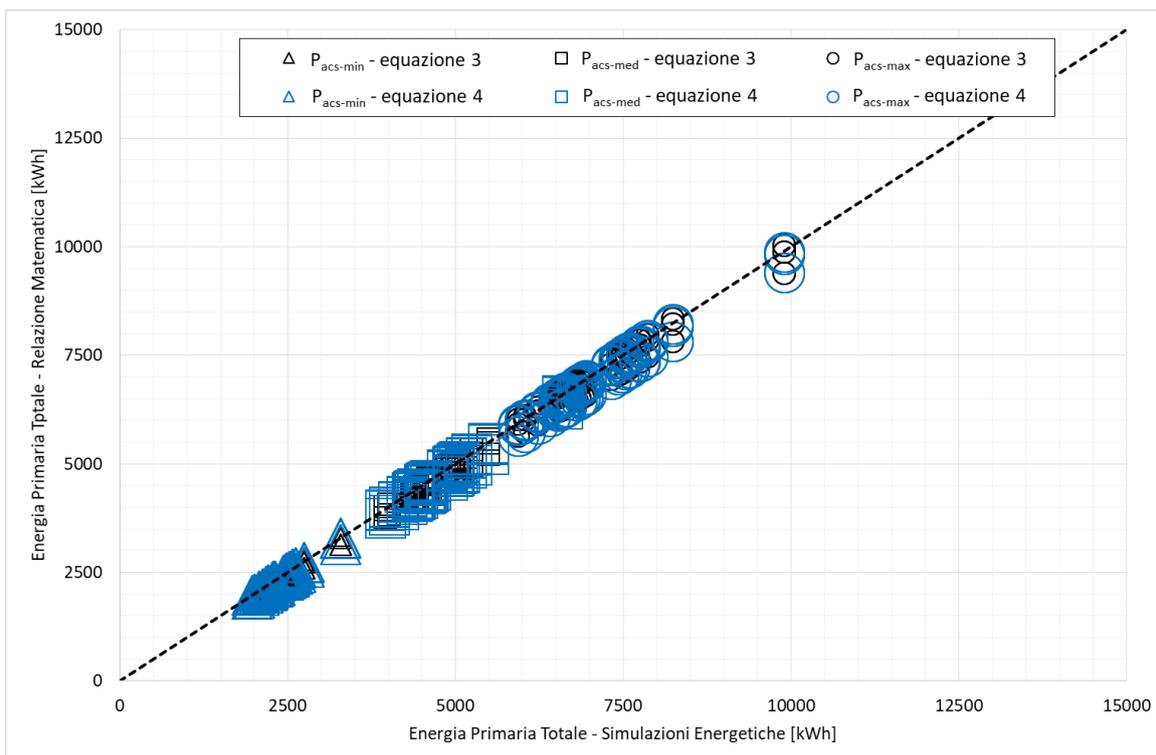


Figura 49 – Confronto tra l’energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall’Equazione 3 e dall’Equazione 4.

### 2.5.1.5 Produzione acqua calda sanitaria con generatore a condensazione

La quinta e ultima tipologia di generatore a combustione analizzata è stata quella a condensazione. Come per gli altri generatori, i risultati dell’energia primaria normalizzata rispetto al volume consumato di acqua per usi sanitari, evidenziano un trend perfettamente lineare tra la metodologia asset e quella tailored (Figura 50) confermando la validità dell’Equazione 3, in cui i valori dei coefficienti  $m$  e  $q$  valgono rispettivamente 0.8708 e -0.6214.

A seguito della seconda normalizzazione dei dati (rispetto la temperatura esterna media annuale delle località di simulazione), i risultati (Figura 51) confermano la necessità di aggiornare la precedente relazione matematica nell’Equazione 4, dove i coefficienti  $m$  e  $q$ , calcolati sempre come media pesata sulla superficie, assumono rispettivamente i valori di 0.8465 e -0.0161.

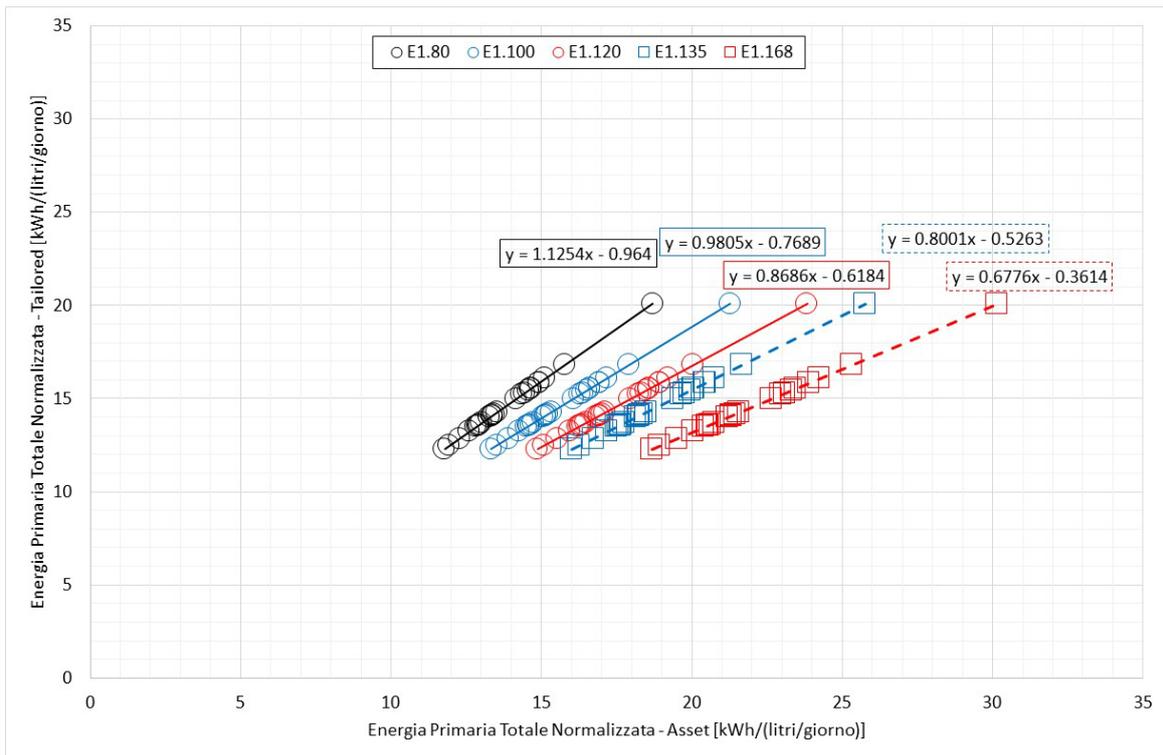


Figura 50 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating.

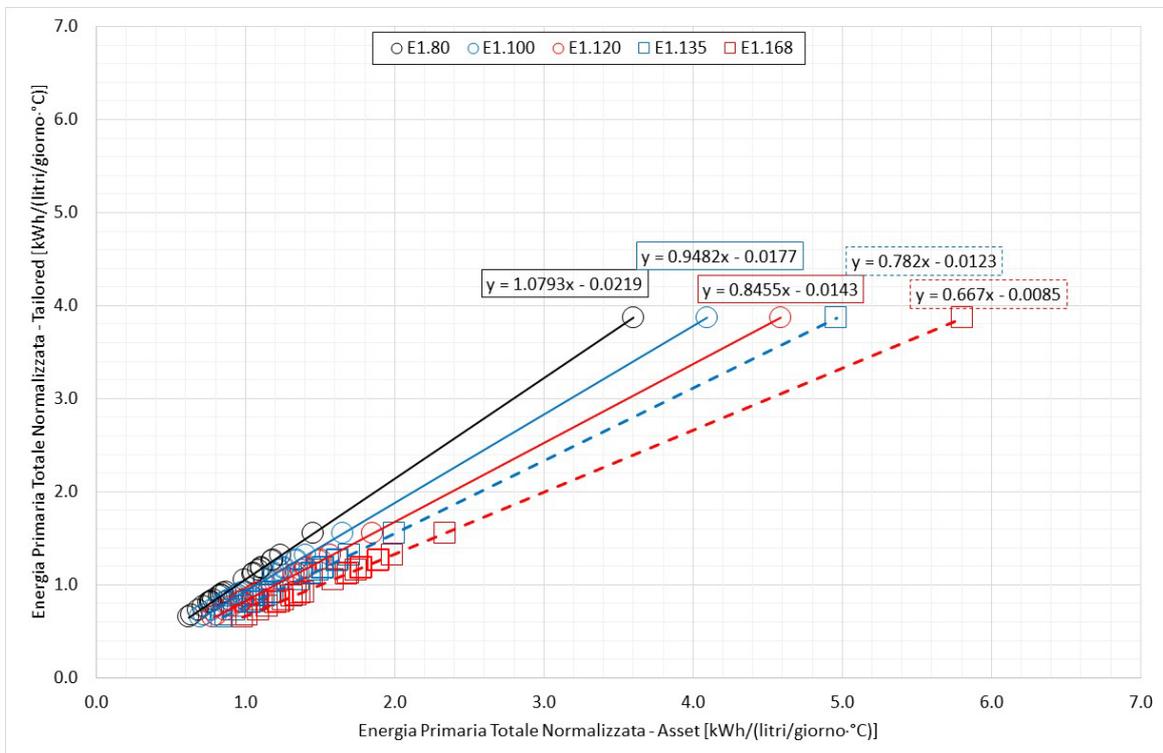


Figura 51 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating.

Infine, la verifica delle due equazioni (Figura 52) restituisce un errore relativo medio inferiore all’1% per tutti i casi studio; contrariamente ai casi precedenti, per il generatore a condensazione si osserva una leggera

discrepanza tra le due equazioni, evidenziando una migliore correlazione tra l'Equazione 4 e l'energia restituita dalle simulazioni energetiche.

In accordo con i risultati ottenuti, è opportuno nel caso di un generatore a condensazione, fare riferimento all'Equazione 4 per il calcolo dell'energia primaria totale tailored, essendo i risultati restituiti da questa più vicini a quelli delle simulazioni energetiche parametriche.

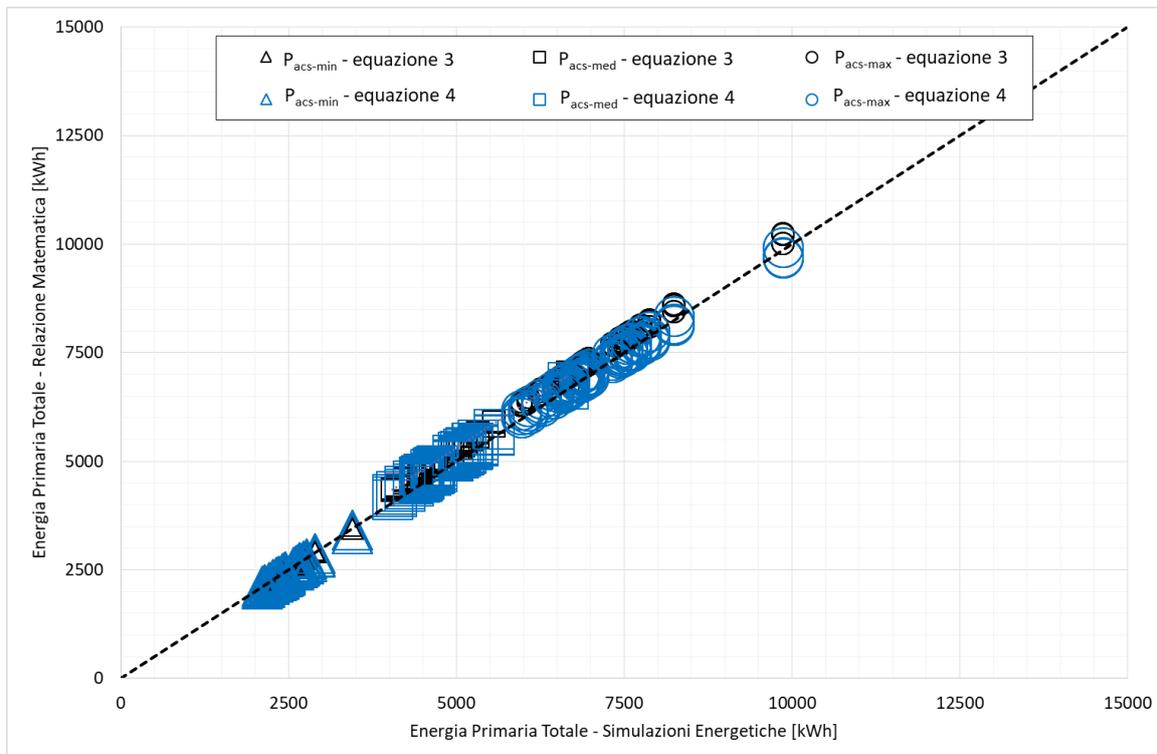


Figura 52 – Confronto tra l'energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall'Equazione 3 e dall'Equazione 4.

### 2.5.1.6 Produzione acqua calda sanitaria con pompa di calore

L'ultima tipologia di generatore di calore analizzata è quella della pompa di calore.

Come nel caso del boiler elettrico (2.5.1.1), anche per la pompa di calore si sono riscontrate delle relazioni lineari tra la metodologia asset e quella tailored; applicando entrambe le normalizzazioni (rispetto al volume di acqua consumato e rispetto la temperatura media annuale dell'aria esterna), rispettivamente mostrate in Figura 53 e in Figura 54, si osserva un trend perfettamente coincidente dell'energia primaria totale. In accordo con il risultato ottenuto, è pertanto possibile adottare la sola Equazione 2 per la determinazione dell'energia primaria tailored a partire dal medesimo indicatore asset; nel caso della pompa di calore il coefficiente  $m$  assume un valore medio pesato sulla superficie pari a 0.8904.

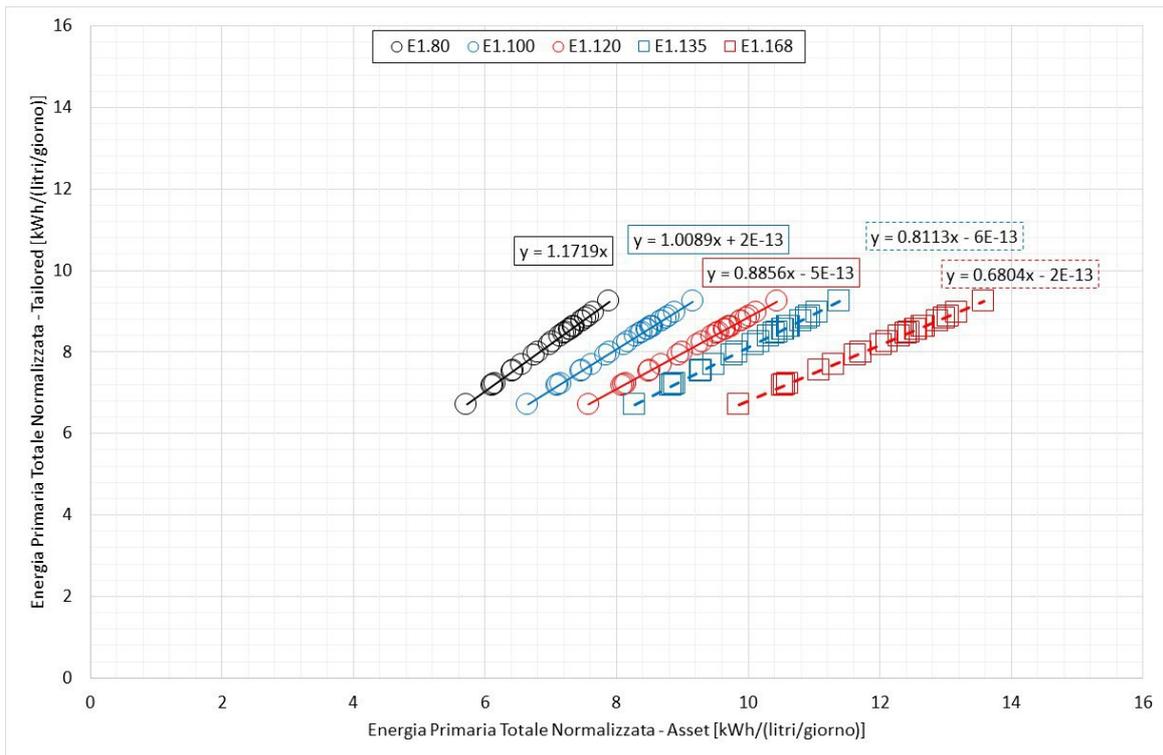


Figura 53 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato: asset rating vs tailored rating.

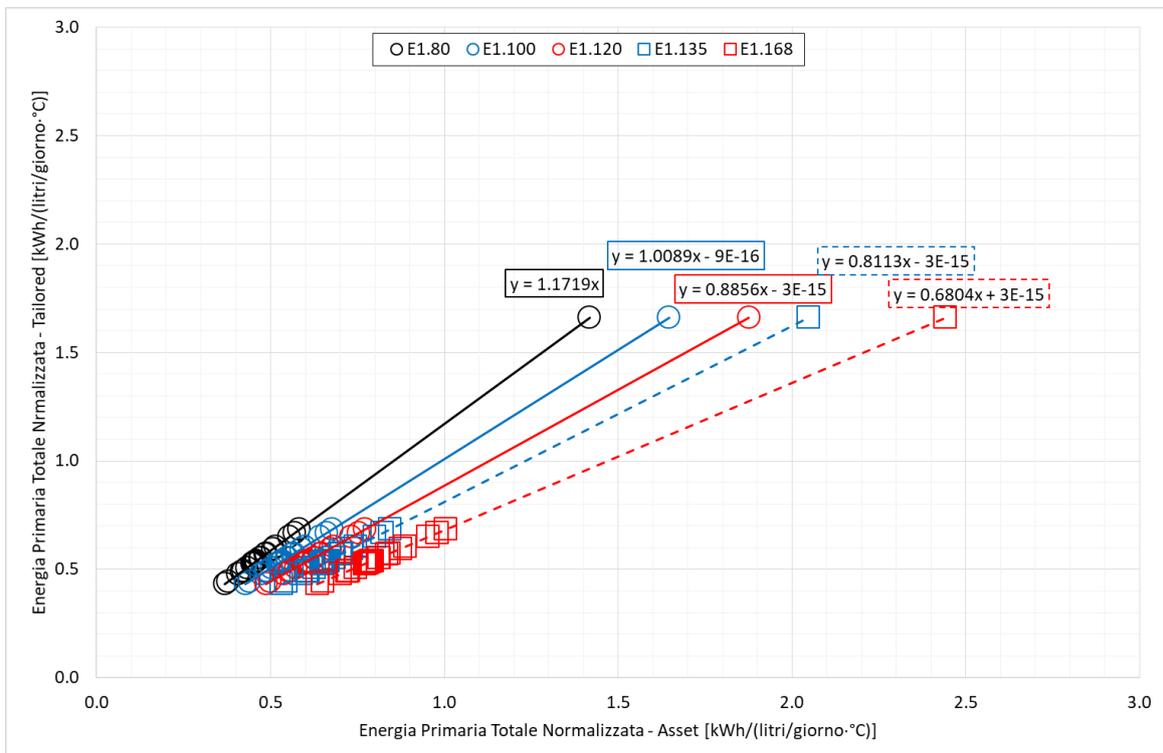


Figura 54 – Confronto dell’energia primaria per la produzione acqua calda sanitaria normalizzata rispetto al volume di acqua consumato e la temperatura media annuale: asset rating vs tailored rating.

Infine, si è proceduto con la verifica dell'Equazione 2 (Figura 55), la quale ha dato esito positivo con un errore relativo medio inferiore all'1% per tutti i casi studio, confermando quindi la possibilità di calcolare l'energia primaria tailored a dal medesimo indicatore asset e dal volume di acqua consumato.

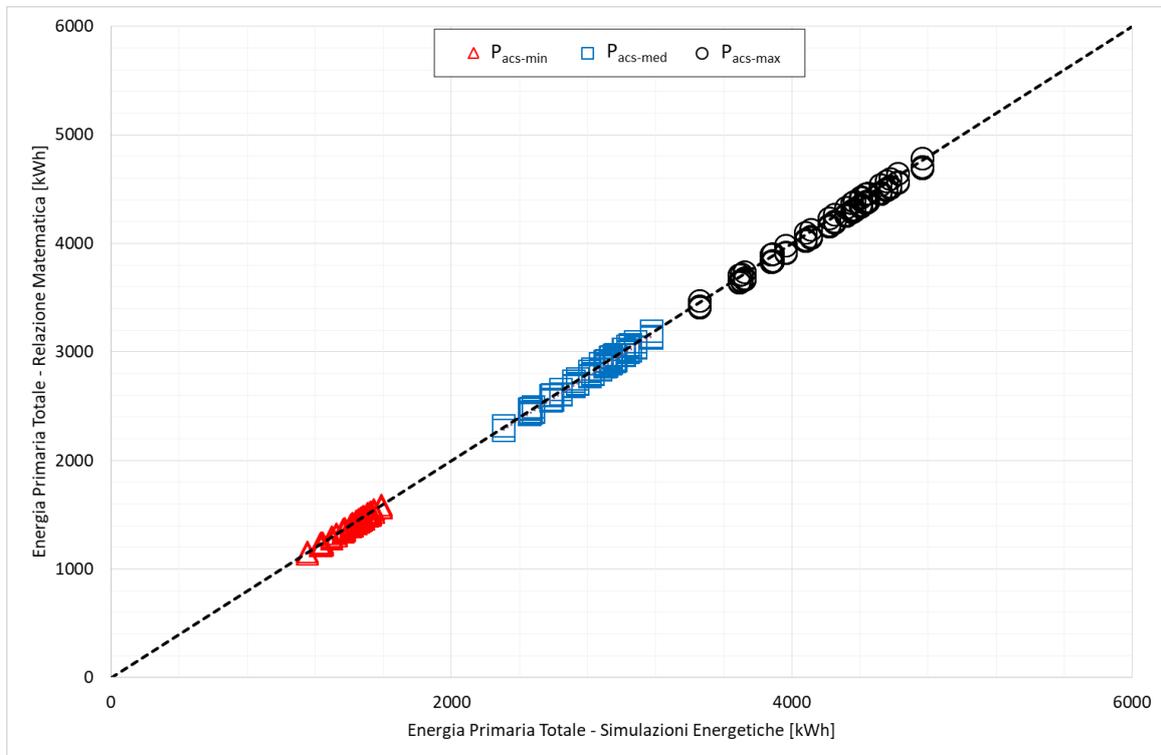


Figura 55 – Confronto tra l'energia primaria restituita per i tre profili di utilizzo nelle simulazioni energetiche e quella calcolata a partire dall'Equazione 2.

### 2.5.1.7 Produzione acqua calda sanitaria con solare termico

L'ultimo aspetto che è stato esaminato ha riguardato la produzione di acqua calda sanitaria con il solare termico. In accordo con la UNI TS, la producibilità dei pannelli solari è funzione delle condizioni climatiche, delle caratteristiche tecniche del singolo pannello, ma anche dall'effettivo fabbisogno energetico richiesto. A parità di fabbisogno richiesto per il servizio di acqua calda sanitaria, la copertura del solare termico aumenta con il numero dei pannelli fino alla copertura massima del 100% del fabbisogno, a cui corrisponde una richiesta nulla da compensare con altri impianti.

Dopo aver svolto delle analisi preliminari, per questa configurazione impiantistica non si sono riscontrate relazioni matematiche di semplice utilizzo come nei casi precedenti. Questo primo risultato è dipeso principalmente dal fatto che in alcune località (quelle più calde) e per alcuni casi studio, si riesce a raggiungere il 100% della copertura del fabbisogno energetico già considerando un solo pannello, determinando dei risultati energetici del tutto coincidenti nelle tre configurazioni ipotizzate (installazione di uno, due o tre pannelli).

Per tale motivo, l'approccio adottato per lo studio del solare termico è stato cambiato. Nello specifico, il contributo del solare termico è stato considerato come una riduzione del volume d'acqua per usi sanitari da produrre con altri sistemi impiantistici. Ovviamente tale contributo tende a variare con il numero di pannelli effettivamente installati, nonché dall'effettivo fabbisogno energetico e dalle condizioni climatiche esterne; pertanto le relazioni matematiche dovranno considerare tutte queste variabili. Inoltre, essendo possibile prevedere configurazioni anche diverse da quelle ipotizzate, le stesse equazioni dovranno essere estendibili non solo al variare della zona climatica, ma anche al numero di pannelli effettivamente installati.

In accordo con tale premessa, ai fini della presente analisi, si è deciso di incrementare il fabbisogno di energia richiesto per il servizio di produzione di acqua calda sanitaria con l'obiettivo di non raggiungere mai la copertura del 100% del fabbisogno con il solo solare termico. Di questo, ovviamente, se ne terrà conto nelle

rispettive relazioni matematiche attraverso l'introduzione di uno specifico parametro che dipenderà dal reale volume d'acqua richiesto e da quello adottato per questa analisi.

In quest'ottica sono state condotte delle simulazioni parametriche in cui è stata valutata la producibilità mensile del sistema solare termico in funzione delle condizioni climatiche dipendenti dalla località e del numero di pannelli solari effettivamente installati. Nella presente trattazione si farà riferimento alla codifica mostrata in Tabella 50 per le diverse configurazioni adottate per il solare termico.

A titolo esemplificativo e per una migliore leggibilità del grafico, la Figura 56 mostra la producibilità media mensile del solare termico ottenuta per alcune città italiane considerate per l'analisi (Milano, Bologna, Roma, Bari, Napoli e Palermo) al variare del numero dei pannelli. Come si osserva, la producibilità risente fortemente delle condizioni climatiche esterne crescendo in maniera non uniformemente nei mesi centrali dell'anno all'aumentare del numero dei pannelli installati.

Questo importante risultato è stato ulteriormente analizzato normalizzando tutte le producibilità simulate per quella derivante dalla configurazioni ST-1 per ogni città simulata (Figura 57): ad eccezione dei mesi centrali dell'anno (i più caldi), in cui si osserva un appiattimento delle curve, in quelli più freddi la producibilità del solare termico tende a diversificarsi significativamente in funzione delle effettive condizioni climatiche della località di riferimento.

Tabella 50 – Codice identificativo dei casi studio in base al numero di pannelli del solare termico.

Numero di pannelli considerati per l'analisi parametrica	Codice identificativo
1 pannello	ST-1
2 pannelli	ST-2
3 pannelli	ST-3

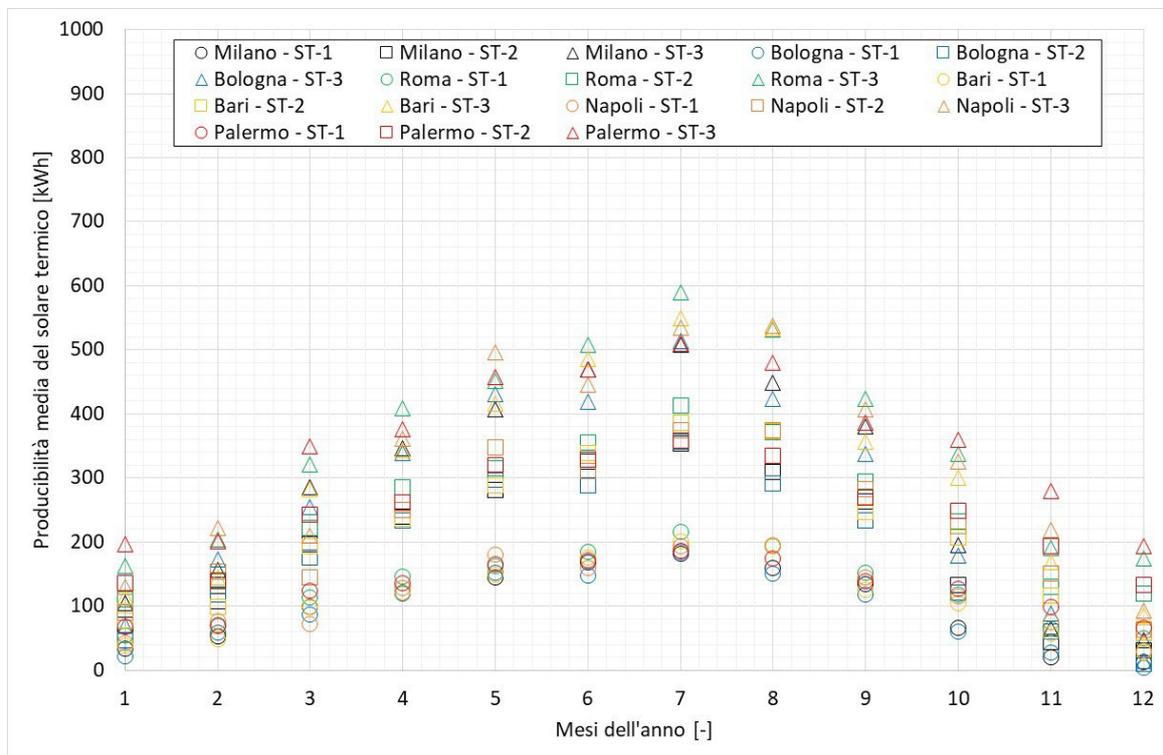


Figura 56 – Produttività del solare termico normalizzata per alcune città italiane.

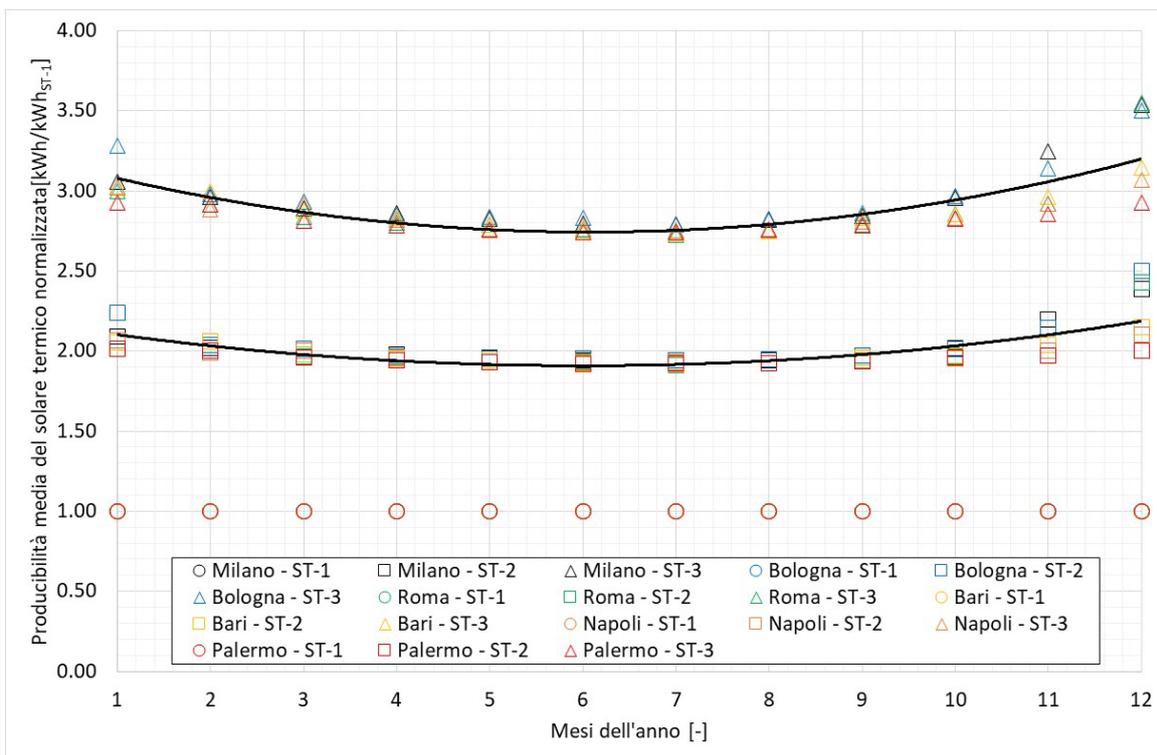


Figura 57 – Producibilità del solare termico normalizzata rispetto la configurazione ST-1.

In quest’ottica, al fine di tener conto delle effettive condizioni climatiche, i dati della producibilità sono stati normalizzati anche per l’irradianza media mensile (MJ/m<sup>2</sup>) e per la temperatura alla quale si porterebbe l’acqua in presenza del solare termico installato per la sola produzione di acqua calda sanitaria, determinata con la metodologia della UNI TS [61-65]; il prodotto tra l’irradianza solare globale mensile e la temperatura dell’acqua con il solare termico è stato chiamato, nella presente trattazione e per semplicità, parametro climatico (PC).

Il risultato della normalizzazione per il numero di pannelli e per il parametro climatico è riportata in Figura 58 che mostra un trend per tutte le configurazioni considerate perfettamente assimilabile a una curva del tipo:

$$y = a \cdot e^x \tag{Equazione 5}$$

I risultati ottenuti hanno permesso di identificare l’Equazione 6, che permette di determinare il fattore di correzione della producibilità del solare termico (F<sub>ST</sub>) in funzione dell’effettivo numero di pannelli installati. Pertanto, una volta nota la producibilità media mensile, essa dovrà essere moltiplicata per questo fattore e per il numero di pannelli effettivamente installati.

$$F_{ST} = 1.5 \cdot PC^{-1.061} \tag{Equazione 6}$$

Trovato il legame tra la producibilità e il numero di pannelli, si è quindi proceduto con la parametrizzazione della producibilità al variare delle condizioni climatiche esterne. Per questa analisi si è considerato un valore della producibilità medio per tutte le località, pesato rispetto al parametro climatico di ogni città, ottenendo un trend ben approssimabile con una funzione a campana con un picco nel mese di luglio (Figura 59).

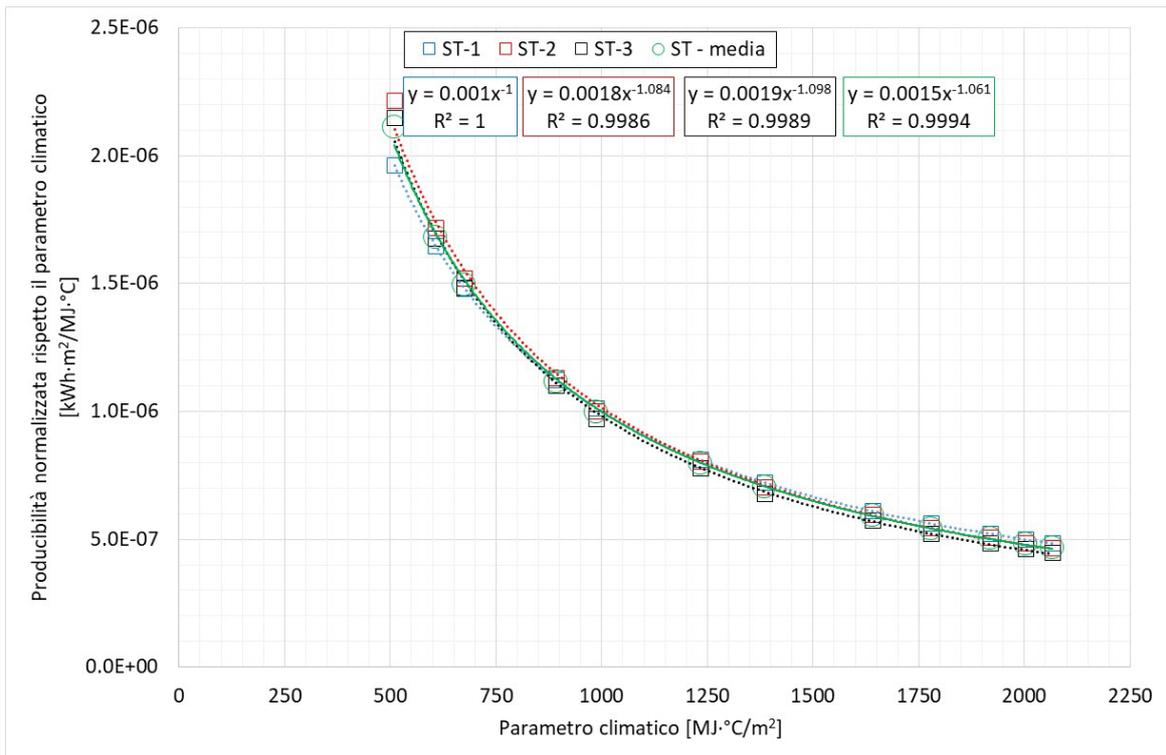


Figura 58 – Producibilità normalizzata in funzione del parametro climatico.

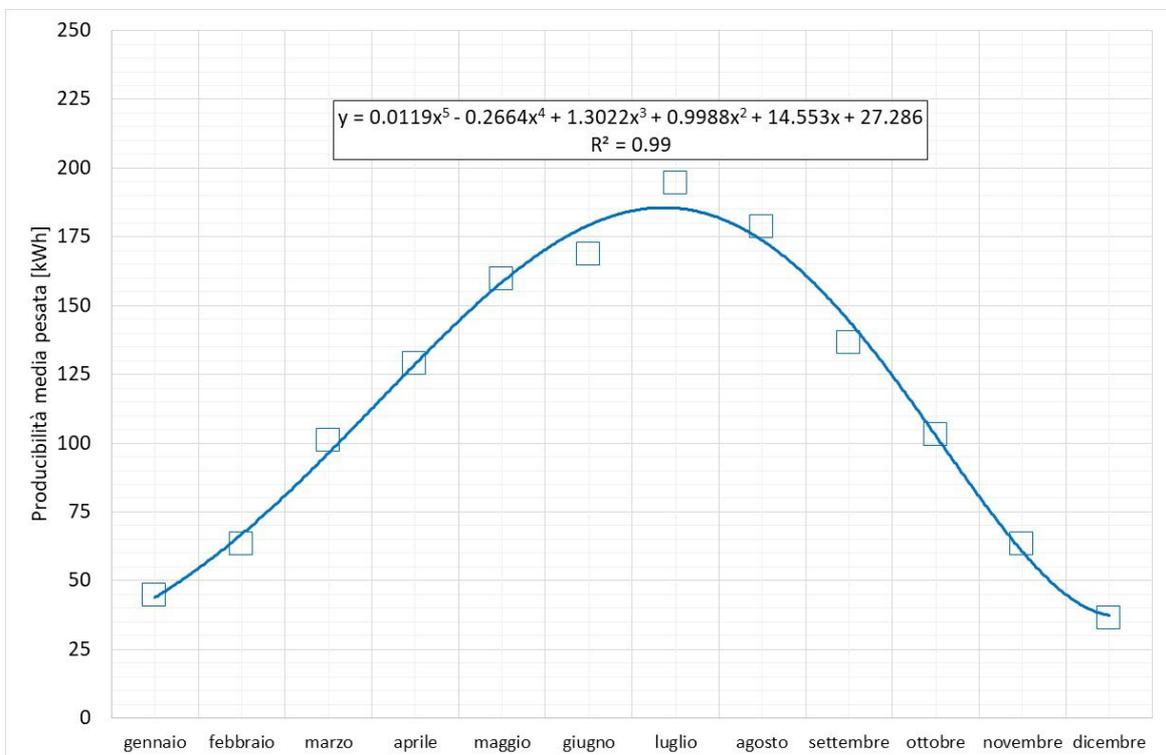


Figura 59 – Producibilità media pesata del solare termico.

In accordo con i risultati ottenuti, si è quindi determinata la producibilità del solare termico in funzione delle caratteristiche climatiche e del numero di moduli installati. Questa è riportata sinteticamente nell'Equazione 7, in cui con x si è indicato il mese dell'anno, ovvero dalla relazione di correlazione mostrata in Figura 59.

$$P_{ST} = (0.0119 \cdot x^5 - 0.266 \cdot x^4 + 1.3022 \cdot x^3 + 0.999 \cdot x^2 + 14.553 \cdot x + 27.286) \quad \text{Equazione 7}$$

L'Equazione 7 è valida per il calcolo della producibilità media teorica di un singolo pannello; per il calcolo di quella corretta che tenga conto del numero di pannelli anche maggiori, essa deve essere moltiplicata per il fattore correttivo  $F_{ST}$  (Equazione 6) nonché per il numero di pannelli installati.

Nota la producibilità media pesata, è quindi possibile estrapolare il volume d'acqua corrispondente che andrà sottratto al volume d'acqua per usi sanitari. Questo, determinato per ogni mese, risulta essere funzione della producibilità del solare termico, del volume d'acqua stimato secondo la procedura della UNI TS o dal profilo tailored, e del fabbisogno energetico richiesto per il servizio nel mese considerato.

In accordo con le relazioni riportate e con le analisi condotte, si sono quindi definite due metodologie per stimare la riduzione dei fabbisogni energetici a seguito dell'installazione del solare termico. La prima è un metodo basato su un calcolo medio mensile e consiste nel:

1. calcolo del parametro climatico medio mensile che caratterizza la località di riferimento ( $MJ^{\circ}C / m^2$ );
2. calcolo della producibilità media mensile del solare termico a partire dalla producibilità media mensile pesata (Figura 59-Equazione 7) e dal fattore correttivo  $F_{ST}$  legato al numero dei pannelli e al parametro climatico, secondo:

$$P_{ST} = \frac{P_{ST_{media\ mensile, pesata}} \cdot I_{mensile\ città}}{I_{medio\ mensile, pesato}} \cdot F_{ST} \cdot n_{pannelli} \cdot k \quad \text{Equazione 8}$$

dove  $k$  è una costante di conversione che tiene conto del volume d'acqua effettivamente richiesto e conforme a quello dei profili di utilizzo:

$$k = \left( \frac{859}{1000 - V_{H_2O-profilo}} \right) \quad \text{Equazione 9}$$

3. calcolo del volume di acqua calda sanitaria prodotta mensilmente con il solare termico:

$$V_{H_2O-solare} = \frac{P_{ST} \cdot V_{H_2O-profilo}}{EP_{w-APE}} \quad \text{Equazione 10}$$

4. calcolo del volume medio mensile rimanente da soddisfare con altro impianto termico (volume da considerare nell'Equazione 2 o nell'Equazione 4);
5. calcolo del fabbisogno energetico da soddisfare con altro impianto termico (fabbisogno restituito dall'Equazione 2 o dall'Equazione 4).

La seconda metodologia, invece, si basa su una valutazione media annuale dei parametri sopra descritti, risultando un metodo molto più rapido, ma che comporta un scostamento dai risultati medio mensili di circa il 2%. Questa metodologia, tuttavia, potrebbe risultare molto comoda nel caso in cui non fossero disponibili i dati con distribuzione mensile.

Come per i precedenti casi, anche le equazioni identificate per il solare termico sono state oggetto di verifica, confrontando i risultati derivanti dall'applicazione della metodologia sopra descritta con quelli restituiti dalle simulazioni parametriche energetiche (Figura 60). Il grafico mostra come l'equazione messa a punto consente di stimare con buona approssimazione la producibilità del solare termico specialmente nel caso di installazione di uno o due pannelli (errore assoluto medio di 4 kWh ed errore relativo tra il 7-9%); le discrepanze maggiori sono state riscontrate nel caso di un numero di pannelli solari maggiore a due, dove l'errore assoluto medio è di 6 kWh con un errore relativo inferiore del 12%.

Al fine di valutare l'accuratezza della relazione, si è proceduto con la verifica dei volumi e dei fabbisogni energetici da soddisfare con altre tipologie impiantistiche. A titolo di esempio, in Figura 61 si riporta il confronto relativo all'energia primaria da compensare con altro sistema impiantistico restituito dalle

simulazioni energetiche e quello ottenuto con la procedura descritta (dall'Equazione 8 all'Equazione 10) nella configurazione ST-1 e per i tre profili di utilizzo definiti per l'acqua calda sanitaria. Il confronto evidenzia come la metodologia e le equazioni messe a punto permettano di restituire dei risultati perfettamente in linea con le simulazioni energetiche. In accordo con i risultati ottenuti, si ritiene che l'errore restituito nella stima della producibilità del solare termico non comporti quindi significative variazioni né del volume di acqua coperto dal solare termico, né dell'energia primaria da compensare con altre tipologie impiantistiche. Pertanto, le equazioni alle quali si è pervenuti, nonché l'approccio metodologico proposto, possono e sono stati ritenuti validi.

In accordo con quanto riportato, si riportano in Tabella 51 i valori medi mensili pesati della producibilità del solare termico, il fattore di correzione ( $F_{ST}$ ) dipendente dal parametro climatico, nonché il valore dello stesso parametro climatico di riferimento adottato per il calcolo della producibilità media pesata. A partire da questi valori o da quelli derivanti dall'Equazione 7 all'Equazione 10, è possibile stimare il contributo del solare termico per la sola produzione di acqua calda sanitaria nei diversi contesti climatici nonché per un diverso numero di pannelli solari.

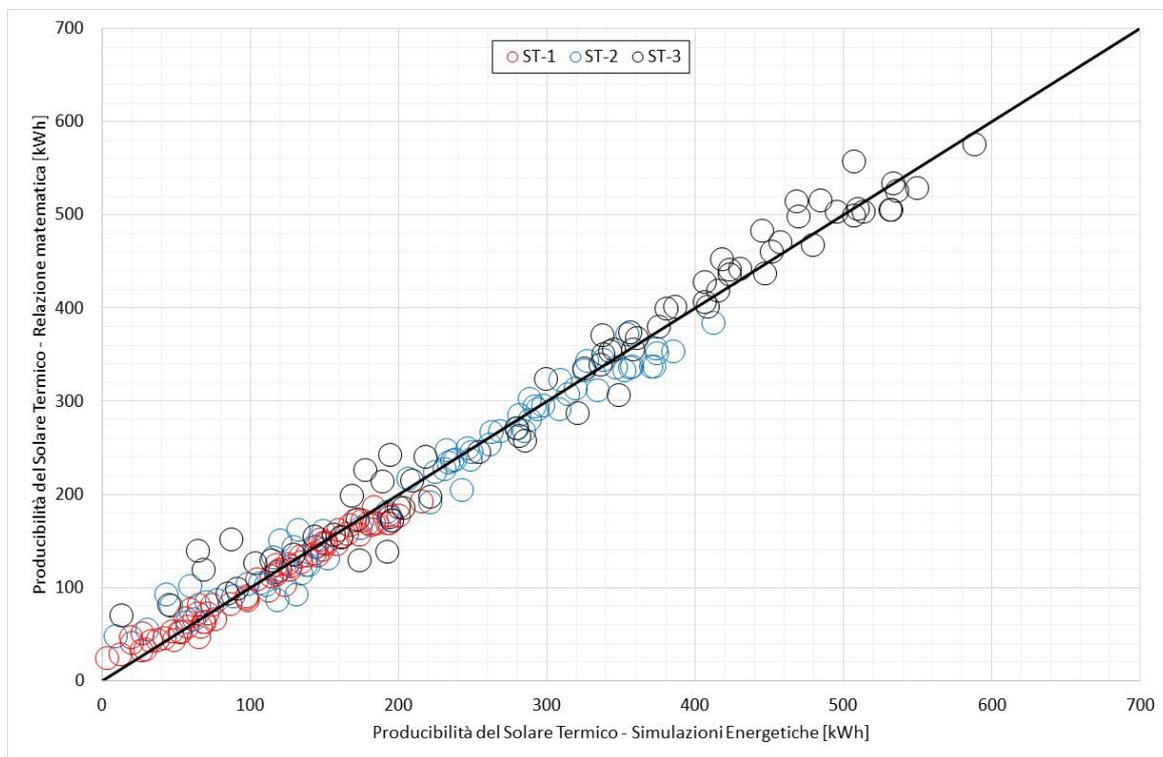


Figura 60 – Confronto tra la producibilità del solare termico restituita dalle simulazioni energetiche e quella dell'Equazione 8.

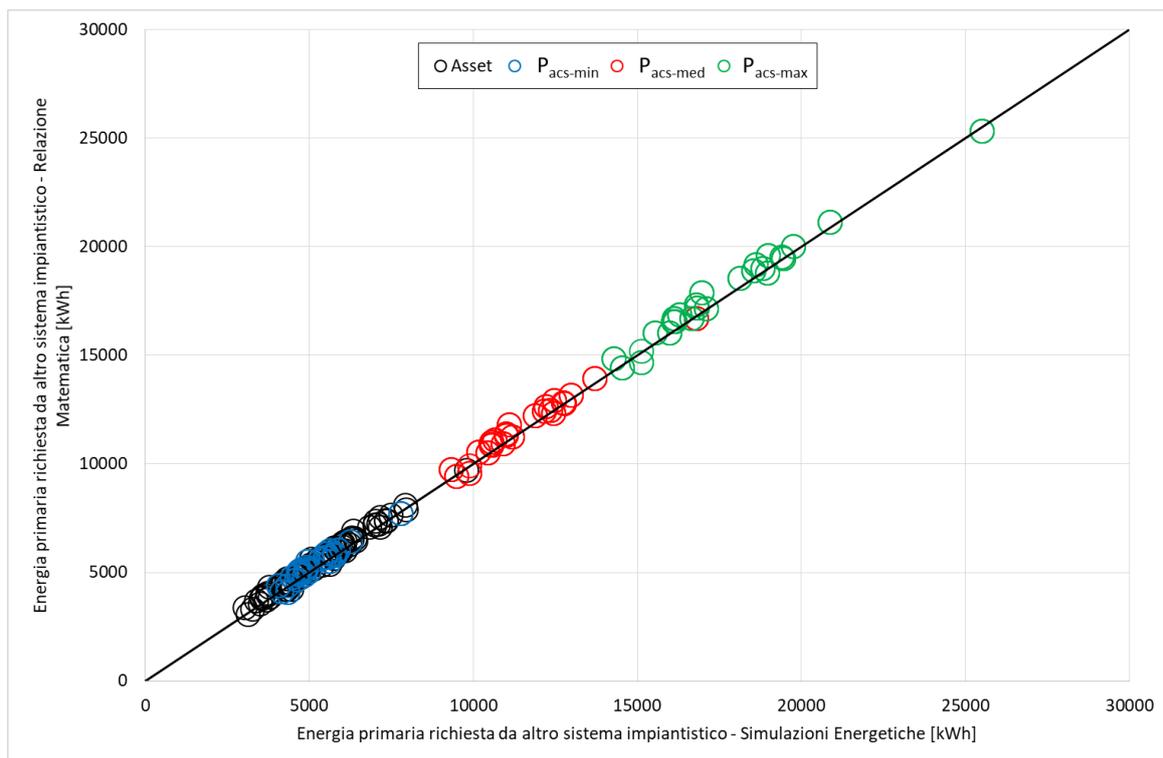


Figura 61 – Confronto tra l’energia primaria da compensare con altro sistema impiantistico nella configurazione ST-1 restituita dalle simulazioni energetiche e dall’ applicazione dell’Equazione 8: asset rating vs tailored rating.

Tabella 51 – Parametro climatico di riferimento, fattore di correzione  $F_{ST}$  e producibilità media mensile pesata del solare termico.

Mese	Parametro climatico di riferimento [ $MJ^{\circ}C/m^2$ ]	Fattore correttivo $F_{ST}$ (Equazione 6) [-]	Producibilità media pesata (Equazione 7) [kWh]
gennaio	618	1.015	43.89
febbraio	947	0.991	66.93
marzo	1303	0.972	96.46
aprile	1678	0.955	129.00
maggio	1964	0.946	159.03
giugno	2039	0.943	180.38
luglio	2047	0.942	187.71
agosto	1797	0.950	177.95
settembre	1420	0.965	151.70
ottobre	1000	0.985	114.72
novembre	651	1.008	79.32
dicembre	528	1.025	65.84

### 2.5.2 Riscaldamento

Il secondo servizio energetico investigato è la climatizzazione invernale per la quale sono state considerate combinazioni sia di impianto autonomo che centralizzato.

Come descritto nel paragrafo 2.4, questo servizio è stato simulato con diverse condizioni al contorno e per diverse categorie di edificio (E.1, E.2 ed E.5), determinando degli indicatori energetici fortemente variabili. Infatti, contrariamente al servizio energetico di produzione di acqua calda sanitaria, il riscaldamento è estremamente condizionato dalle caratteristiche termiche dell’involucro edilizio, dalla tipologia della componente impiantistica e dalle condizioni climatiche esterne. In particolare, a parità delle altre condizioni,

al miglioramento delle prestazioni termiche dell'involucro la richiesta di energia primaria dell'immobile diminuisce, così come all'aumentare della rigidità delle condizioni climatiche esterne la richiesta di energia primaria aumenta.

Ulteriore criticità riguarda sicuramente una corretta analisi delle due metodologie di calcolo in considerazione e in particolar modo delle ore di accensione dell'impianto; infatti, all'aumentare del numero di ore di accensione e al miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro, il profilo di utilizzo tailored tenderà al valore del profilo asset, mentre al peggioramento delle performance energetiche dell'edificio i due profili divergeranno tanto più quanto le ore di funzionamento ipotizzate diminuiranno.

Per questi motivi, il legame tra il profilo asset e quello tailored non è di tipo non lineare ed è fortemente variabile con le diverse combinazioni di calcolo che tengono conto dei seguenti parametri:

1. destinazione d'uso dell'edificio (paragrafo 2.4.2);
2. condizioni climatiche esterne, in base alle venticinque località di simulazione selezionate (paragrafo 2.4.1) e caratterizzate da un diverso valore di Gradi Giorno;
3. tipologia di involucro edilizio (paragrafo 2.4.3), basata sulla combinazione dei componenti opachi verticali e orizzontali caratterizzati da diversi livelli di isolamento termico (Tabella 29) e della componente trasparente (Tabella 30);
4. tipologia impiantistica (paragrafo 2.4.4) ossia la configurazione di impianto adottata (autonomo e centralizzato) nonché le caratteristiche dei quattro sottosistemi di impianto, quale ad esempio la tipologia del generatore di calore;
5. profilo di utilizzo dell'impianto (paragrafo 2.4.5), ossia il numero di ore di accensione dell'impianto di riscaldamento.

Vista la complessità della valutazione del servizio energetico, le analisi sono state precedute da numerosi studi preliminari che hanno permesso di adottare importanti semplificazioni e di evidenziare alcuni aspetti che hanno influenzato l'approccio adottato per determinare le relazioni matematiche più idonee per gli obiettivi preposti:

- 1) l'energia primaria di ogni combinazione di involucro edilizio, a parità delle condizioni climatiche e della tipologia impiantistica, varia linearmente con le caratteristiche del fabbricato. Grazie a questo trend, è stato possibile fare riferimento a valori medi per macro-categoria di livello di isolamento in quanto l'influenza delle reali caratteristiche termiche dell'involucro edilizio sono già tenute in considerazione nell'indicatore energetico determinato con la metodologia asset;
- 2) i consumi del settore non residenziale sono generalmente maggiori rispetto a quelli del residenziale, determinando delle relazioni matematiche tecnicamente diverse per queste categorie edilizie. Tuttavia, come verrà discusso in seguito, l'utilizzo di alcune delle relazioni trovate per la categoria E.1 risultano essere ugualmente valide anche per altre categorie, comportando degli errori relativi accettabili;
- 3) i consumi derivanti dall'utilizzo di un impianto centralizzato sono mediamente diversi da quelli di impianto autonomo. Tuttavia, come si vedrà in seguito, le relazioni matematiche identificate per la tipologia autonoma risultano essere ugualmente valide e utilizzabili per la tipologia centralizzata;
- 4) i consumi medi associati alla tipologia costruttiva in muratura sono mediamente superiori a quelli della tipologia in cemento armato a causa di valori di trasmittanza termica media leggermente più elevati. I risultati delle analisi preliminari hanno mostrato che le relazioni matematiche identificate per la tipologia costruttiva in cemento armato risultano essere valide anche per la tipologia in muratura, ma non sempre il contrario. Questo risultato sarà ulteriormente discusso in seguito;
- 5) le diverse tipologie di generatore a combustione di tipo standard determinano valori di energia primaria molto simili tra loro a meno di una costante dipendente dalle stesse caratteristiche dell'impianto (potenza, assorbimento elettrico, rendimento, ecc). Pertanto, la stessa relazione matematica può essere estesa anche agli altri generatori a combustione di tipo standard. Discorso diverso per i generatori a condensazione e le pompe di calore, per le quali si è ottenuto un trend divergente richiedendo la definizione di relazioni differenti ma solo in determinate condizioni;

- 6) come mostrato al paragrafo 2.4.1, i Gradi Giorno forniti dal DPR 412/93 [4] non sono aggiornati rispetto alle temperature medie mensili delle varie località italiane, presenti nella normativa [67]. Per questo motivo, i risultati dell'energia primaria mostrati in relazione ai Gradi Giorno evidenziano un trend non perfettamente lineare. Nel paragrafo 2.4.1, è stato dimostrato come il trend rispetto ai Gradi Giorno reali, ossia ricalcolati rispetto alle più attuali condizioni climatiche esterne, sia molto più coerente con la relazione tra rigidità del clima e aumento dei consumi. È stato deciso, tuttavia, di mostrare i risultati con i Gradi Giorno teorici, ossia quelli presenti in [4], per coerenza con gli obiettivi del presente lavoro, prendendo in considerazione quindi quelli riportati nell'APE.

Sulla base di quanto emerso, la definizione delle relazioni matematiche per correlare il profilo asset e quelli tailored sono stati discussi per tutte le combinazioni di casi studio con destinazione d'uso residenziale, ovvero E1.i ed E1.t, considerando i quattro livelli di isolamento identificati alla Tabella 29 e al variare della tipologia autonoma di generatore di calore installata:

- 1) generatore di calore a combustione standard;
- 2) generatore di calore a combustione a condensazione;
- 3) generatore di calore a pompa di calore.

Si è poi verificata l'applicabilità delle relazioni matematiche trovate al variare della configurazione impiantistica (centralizzato) e della destinazione d'uso dell'edificio (E.2 e E.5).

Con lo scopo di seguire una metodologia di analisi standard e con l'obiettivo di estendere le relazioni anche a casi studio diversi da quelli indagati, le analisi sono state svolte seguendo il seguente approccio:

1. analisi dell'energia primaria calcolata con il profilo asset e con i tre tailored dei casi studio per singola destinazione d'uso con il primo generatore di calore standard, raggruppati per livello di isolamento e macro-tipologia costruttiva, per ciascuno dei venticinque comuni selezionati al paragrafo 2.4.1;
2. confronto dei risultati (energia primaria) ottenuti con la metodologia asset con quella tailored;
3. calcolo dell'indicatore energetico normalizzato (IEN), attraverso la normalizzazione dei risultati ottenuti dai profili tailored rispetto a:
  - a. energia primaria calcolata secondo il metodo asset;
  - b. potenza nominale e rendimento riferiti alla temperatura di esercizio del generatore di calore;
  - c. numero di ore di accensione ipotizzate per il profilo tailored considerato;
  - d. Gradi Giorno teorici della località di riferimento;
4. calcolo dei valori minimo, medio e massimo dell'indicatore IEN per ogni località e profilo;
5. identificazione di tre equazioni che approssimano i valori di cui al punto 4;
6. attraverso le equazioni di cui al punto 5, calcolo dei valori dell'indicatore IEN per tutte le località di simulazione, per ogni caso studio caratterizzato dalla stessa macro-tipologia costruttiva, livello di isolamento e profilo di utilizzo;
7. prima verifica dei valori calcolati al punto 6 con quelli restituiti per lo stesso caso studio dalle simulazioni energetiche;
8. identificazione dei coefficienti di correzione delle equazioni di cui al punto 5 con lo scopo di minimizzare l'errore di cui al punto 7;
9. seconda verifica dei risultati delle tre equazioni moltiplicate per i rispettivi coefficienti di correzione rispetto i valori restituiti dalle simulazioni energetiche per lo stesso caso studio.

Si specifica che tra i parametri di normalizzazione non è stato ritenuto necessario includere il volume riscaldato, la superficie disperdente e il coefficiente di scambio termico medio, in quanto sono implicitamente considerati nell'indicatore energetico al punto 3.a. Anche le caratteristiche dell'impianto, previste al punto 3.b, potrebbero essere escluse per lo stesso motivo; tuttavia, sono state considerate perché si vogliono determinare delle relazioni che dipendano da almeno la potenza e il rendimento in modo da poter estendere la loro applicazione anche a generatori di calore diversi.

Una volta definite le prime equazioni di correlazione tra profilo asset e i tre tailored relative al primo generatore di calore standard e alla categoria E.1, si è verificata la loro applicabilità ad altri generatori di calore operanti alla stessa temperatura di esercizio (sia generatori standard che a condensazione), a una diversa configurazione impiantistica (impianto centralizzato) e ad una differente categoria di edificio (destinazione d'uso E.2 ed E.5).

I risultati ottenuti hanno permesso di fare delle considerazioni che sono risultate valide per tutti i casi studio:

1. per tutte le località simulate, il consumo maggiore calcolato con il profilo asset è prodotto dal caso studio E1.i.U.3, caso con superficie utile più elevata (e conseguentemente anche il volume) e confinante con l'esterno su tutti i lati; il consumo minore risulta invece per il caso studio E1.t.PI.1, caratterizzato dal minor valore di superficie utile e del coefficiente S/V che determina quindi un minore scambio termico rispetto agli altri casi;
2. l'indicatore energetico normalizzato (IEN), espresso dalla normalizzazione dei valori di energia primaria calcolata con profili di utilizzo tailored, presenta un trend approssimabile da delle curve che tendono a convergere verso un unico valore con l'aumentare dei Gradi Giorno ed è espresso dalla seguente relazione:

$$IEN = a \cdot GG^{-b} \qquad \text{Equazione 11}$$

dove GG rappresentano i Gradi Giorno mentre i coefficienti a e b variano con la configurazione del caso studio come sarà trattato nei prossimi paragrafi;

3. non è possibile fare riferimento a un'unica equazione per il servizio energetico di climatizzazione invernale. In generale, è stata ricavata una famiglia di tre equazioni che lega il profilo asset con quelli tailored in funzione del profilo di utilizzo di ore di accensione minimo, medio e massimo.

### 2.5.2.1 Categoria E.1 e impianto autonomo con generatore di calore a combustione di tipo standard

Come emerso dagli studi preliminari, tutte le analisi sono state raggruppate per macro-categoria distinguendo per tipologia costruttiva e per livello di isolamento come mostrato nella Tabella 29.

L'impianto di riscaldamento autonomo considerato per la presente analisi è il generatore a combustione coincidente con il generatore 1, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 35. Si ricorda che, come da studi preliminari, gli altri generatori a combustione hanno portato a relazioni matematiche molto simili, tema che sarà approfondito nel paragrafo 2.5.2.2.

Di seguito saranno argomentati i risultati relativi ai casi studio mostrati in Tabella 52 ottenuti adottando il profilo asset e i tre profili tailored precedentemente definiti.

Tabella 52 – Caratteristiche dei casi studio E1.t.PT, E1.t.PI e E1.t.PU.

Casi studio	Superficie utile [m <sup>2</sup> ]	Superficie vetrata [m <sup>2</sup> ]	Profilo Asset (APE)	Profilo Tailored		
				P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
E1.i.U.1	100	15.2	✓	✓	✓	✓
E1.i.U.2	135	18	✓	✓	✓	✓
E1.i.U.3	168	24.5	✓	✓	✓	✓
E1.t.PT.1	80	11.0	✓	✓	✓	✓
E1.t.PT.2	100	13.7	✓	✓	✓	✓
E1.t.PT.3	120	17.5	✓	✓	✓	✓
E1.t.PI.1	80	11.0	✓	✓	✓	✓
E1.t.PI.2	100	13.7	✓	✓	✓	✓
E1.t.PI.3	120	17.5	✓	✓	✓	✓
E1.t.PU.1	80	11.0	✓	✓	✓	✓
E1.t.PU.2	100	13.7	✓	✓	✓	✓
E1.t.PU.3	120	17.5	✓	✓	✓	✓

2.5.2.1.1 Livello di isolamento Liv-Iso-0

L'energia primaria determinata con il profilo d'utilizzo asset è riportata in Figura 62 per la tipologia costruttiva in muratura ( $E_M$ ) e in Figura 63 per quella in cemento armato ( $E_{CA}$ ), al variare dei Gradi Giorno dei venticinque comuni di simulazione prescelti e considerando il livello di isolamento Liv-Iso-0.

Come precedentemente detto, il fabbisogno di energia mostra genericamente un trend crescente con l'aumentare della rigidità delle condizioni climatiche, con una leggera diminuzione dell'energia richiesta tra i 1800 e 2100 Gradi Giorno; trend già ampiamente spiegato nel paragrafo 2.4.1

Le analisi sono proseguite mettendo in relazione l'asset rating con il tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ); il confronto dei risultati è mostrato in Figura 64 per le configurazioni  $E_M$  e in Figura 65 per le configurazioni  $E_{CA}$ .

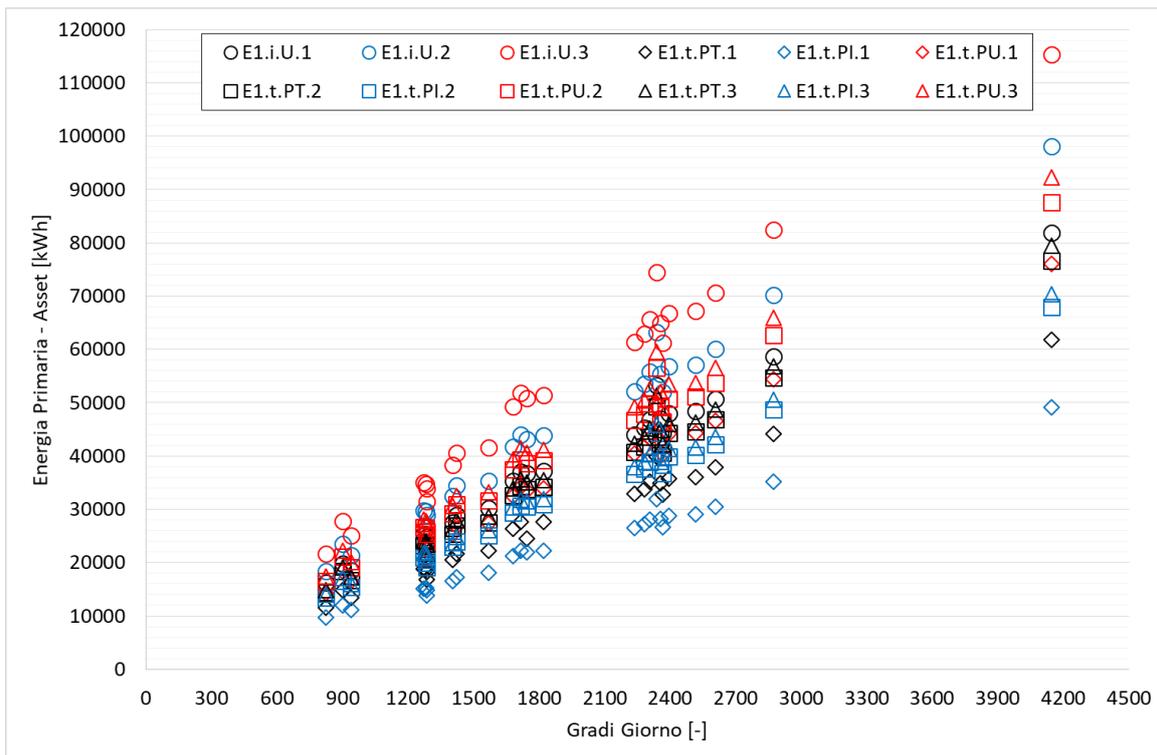


Figura 62 – Trend dell'energia primaria calcolata con l'asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0.

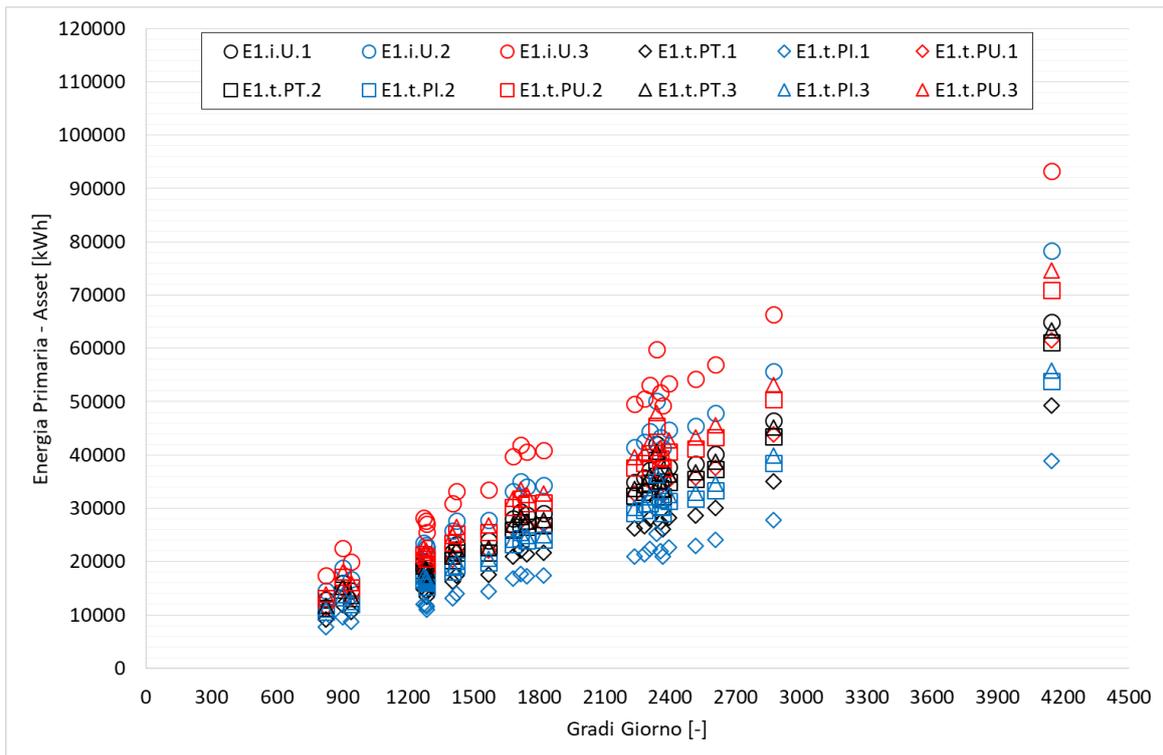


Figura 63 – Trend dell’energia primaria calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0.

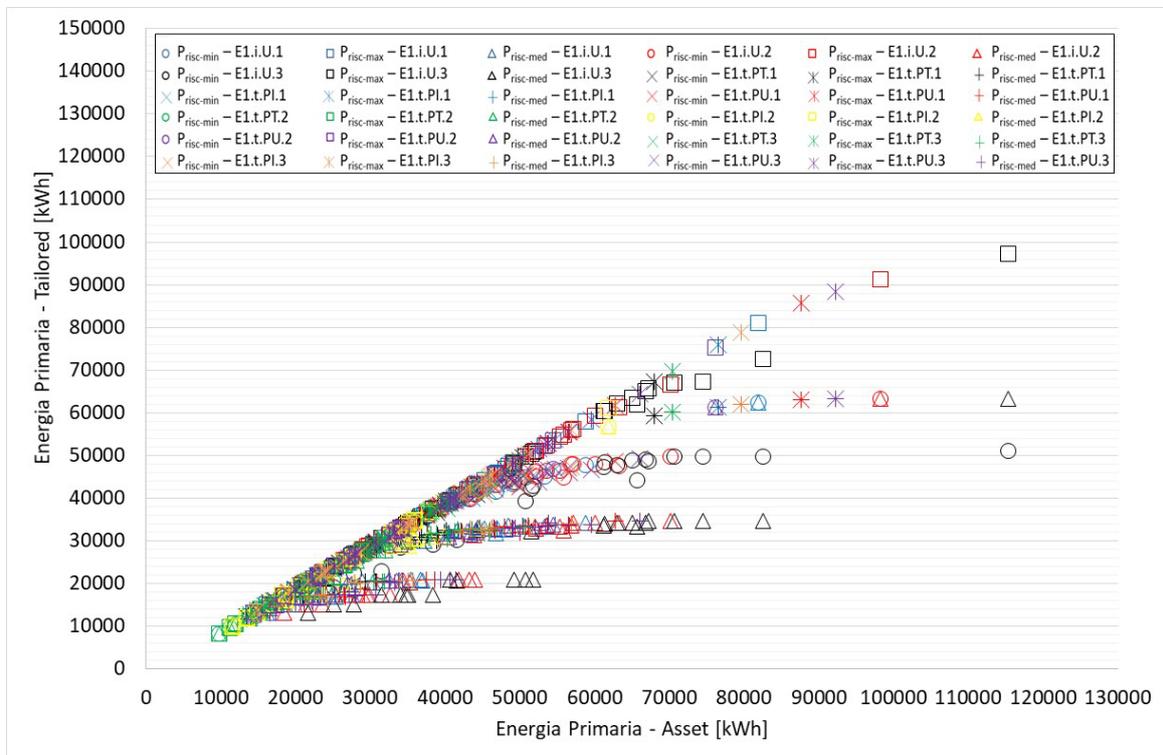


Figura 64 – Confronto tra energia primaria calcolata con l’asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0.

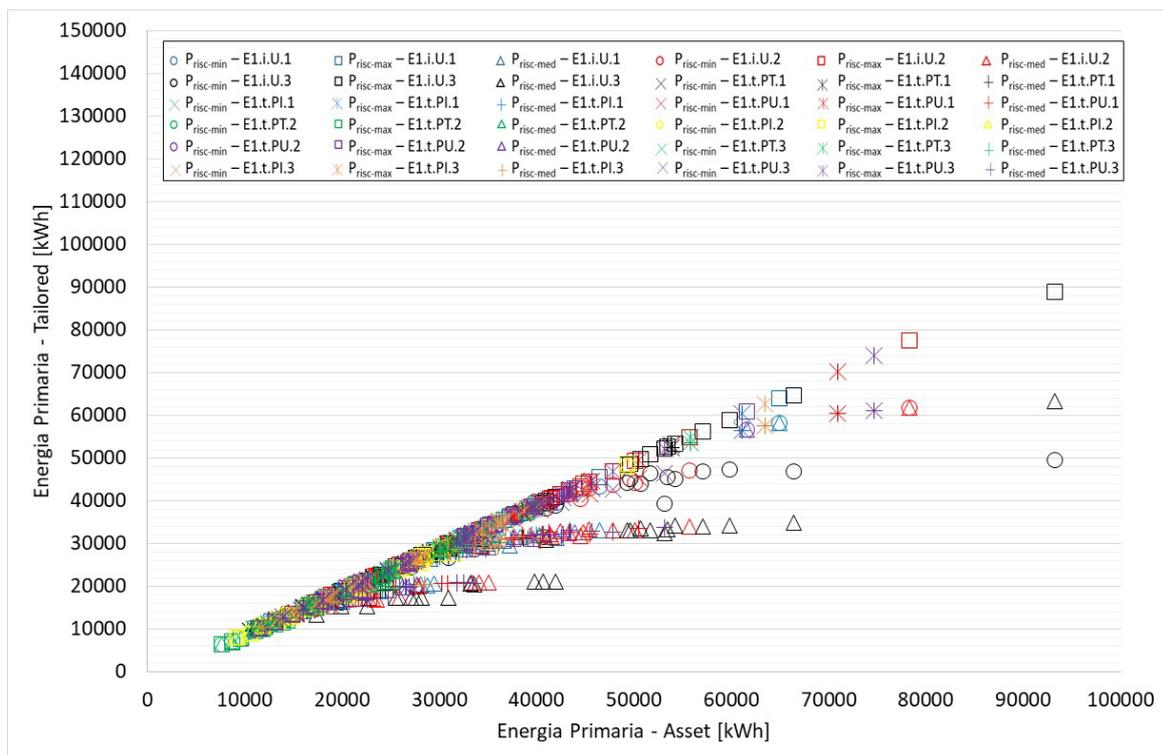


Figura 65 – Confronto tra energia primaria calcolata con l’asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0.

In accordo con i grafici riportati, il legame tra il profilo asset e i tre tailored non è né lineare né costante, con una variazione anche significativa dell’energia primaria totale. Questo fatto è probabilmente legato alle assunzioni fatte, tra cui il numero di ore di accensione dell’impianto adottate nei profili tailored che in determinate condizioni non permettono di coprire il reale fabbisogno energetico dell’edificio; è il caso del profilo  $P_{risc-min}$  relativo al numero minimo di ore di accensione dell’impianto che, specialmente nelle zone più fredde, diverge sensibilmente dai risultati ottenuti con l’asset rating. È pertanto plausibile pensare che nella realtà in queste zone climatiche l’orario di accensione dell’impianto sarà maggiore di quello previsto nel profilo  $P_{risc-min}$  (orario di accensione minimo).

I valori dell’energia primaria ottenuti con i profili di utilizzo tailored sono stati quindi normalizzati, come specificato al paragrafo 2.5.2, ottenendo i trend mostrati in Figura 66 e in Figura 67 rispettivamente per le configurazioni  $E_M$  e  $E_{CA}$ .

Per ciascun profilo tailored e per ogni località sono stati quindi individuati i valori minimo, medio e massimo dell’indicatore energetico normalizzato medio ( $IEN_{medio}$ ) ricavati a partire dai valori medi di tutti i casi studio analizzati, ottenendo il trend riportato rispettivamente in Figura 68 per  $E_M$  e in Figura 69 per  $E_{CA}$ .

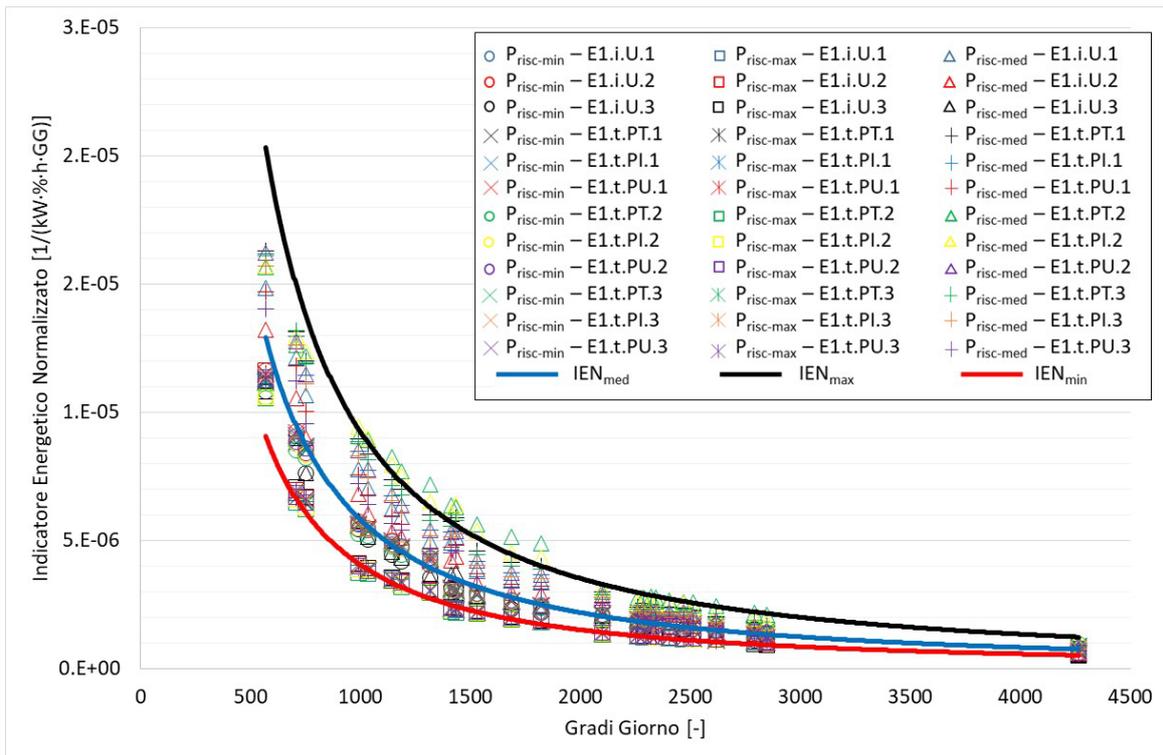


Figura 66 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0.

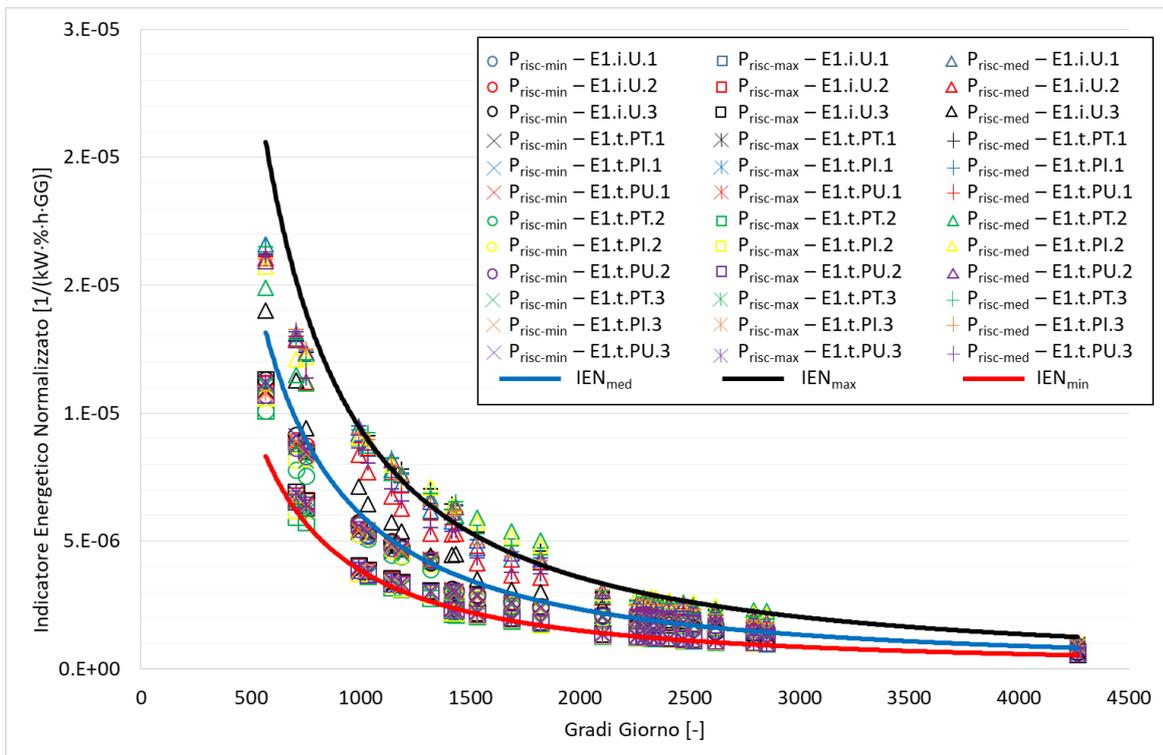


Figura 67 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0.

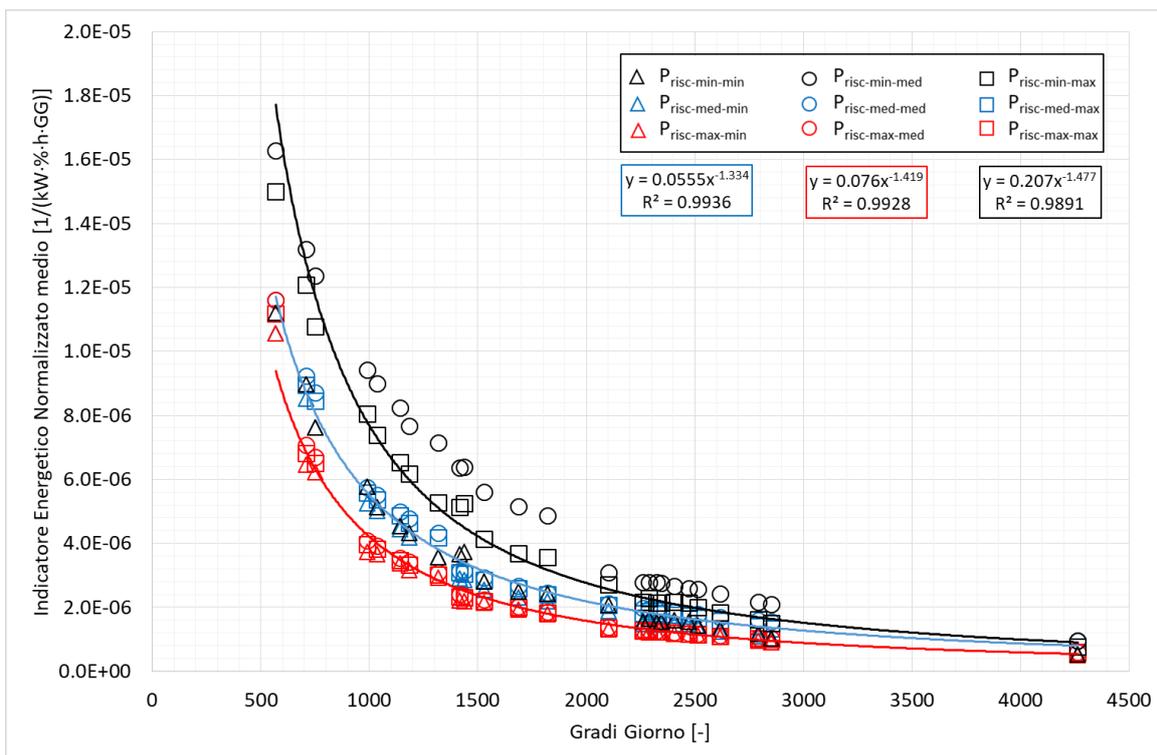


Figura 68 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0.

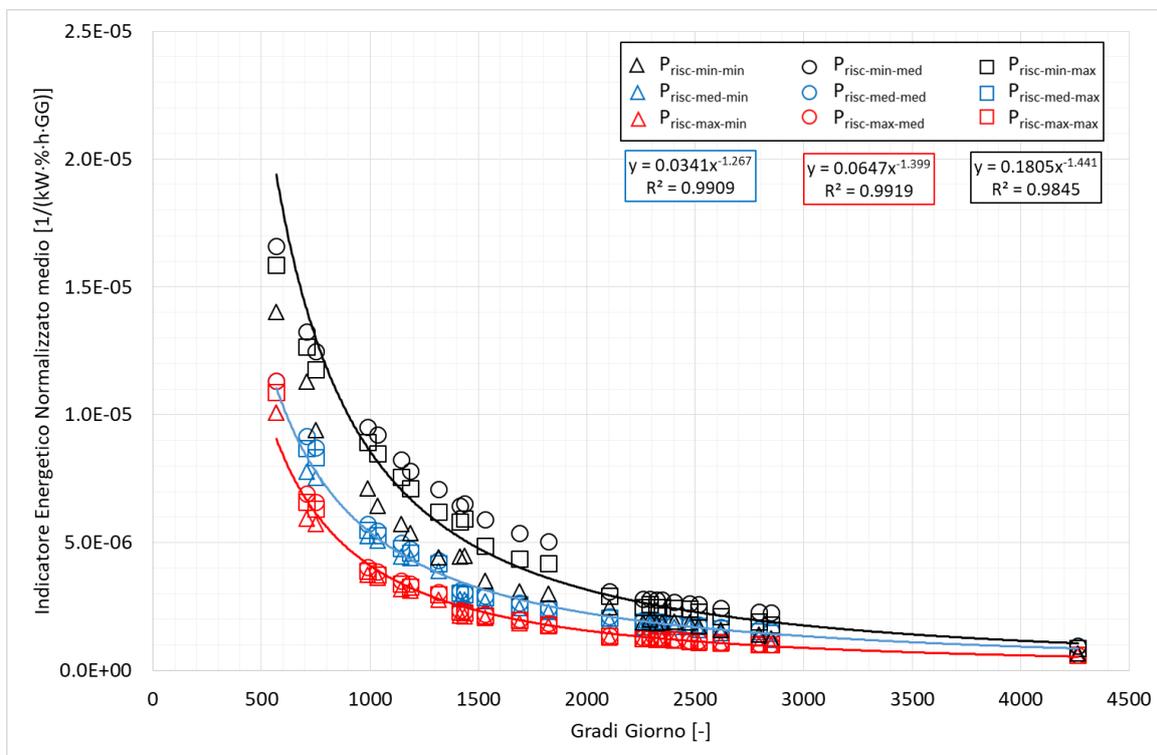


Figura 69 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in cemento armato Liv-Iso-0.

In base ai trend dei valori minimo, medio e massimo dell’indicatore energetico normalizzato medio è stato possibile definire un sistema di tre equazioni che legano il profilo asset con quello tailored. Queste possono

essere espresse attraverso l'Equazione 12, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11 in cui il pedice  $x$  rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  (Tabella 53) che variano in funzione della tipologia costruttiva considerata,

$$EP_{tailored} = IEN_x \cdot GG \cdot EP_{APE} \cdot h_{impianto} \cdot P_{n_{impianto}} \cdot \eta_{impianto} \quad \text{Equazione 12}$$

Come si evince da Figura 68 e Figura 69, le equazioni per  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$  non riescono ad approssimare sempre perfettamente i valori dell'indicatore energetico normalizzato di tutti i casi studio, in particolar modo per le località caratterizzate da valori di Gradi Giorno molto bassi e nel caso di poche ore di accensione dell'impianto.

Per questo motivo, sono stati definiti dei coefficienti correttivi per approssimare con maggiore precisione il valore dell'indicatore energetico normalizzato (ottenuto mediante le tre equazioni) in tutte le località di simulazione. L'indicatore  $IEN$  è stato quindi ricalcolato per ogni caso studio ed è stato oggetto di verifica con i risultati delle simulazioni energetiche per lo stesso caso studio.

A titolo esemplificativo, in Figura 70 la suddetta verifica è stata svolta considerando i valori medi ottenuti per la categoria E.1 con tipologia costruttiva in muratura  $E_M$ , livello di isolamento Liv-Iso-0 e profilo di utilizzo tailored  $P_{risc-med}$ . Il grafico mostra come l'Equazione 12 calcolata considerando l' $IEN_{med}$  sia quella che meglio approssima l'energia primaria ottenuta con il profilo  $P_{risc-med}$  nelle simulazioni energetiche, ad eccezione di alcune località che invece risultano meglio approssimate da una combinazione tra le equazioni per  $IEN_{med}$  e  $IEN_{min}$ . In questo specifico caso, non risulta consigliabile utilizzare l'equazione per  $IEN_{max}$  in quanto tende a restituire un risultato dell'energia primaria sempre maggiore di quello desiderato, ossia il valore restituito dalle simulazioni energetiche ( $EP_{simulazioni\ energetiche}$ ). Si precisa, infatti, che i risultati mostrati in Figura 70 non sono rappresentativi di tutti i casi esaminati poiché variano con la tipologia edilizia, configurazione impiantistica nonché dal singolo caso studio.

Sulla base di queste considerazioni si sono quindi definiti dei coefficienti correttivi moltiplicativi delle equazioni per  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{min}$  ed  $IEN_{max}$  con lo scopo di determinare un indicatore energetico normalizzato medio pesato (indicato in figura con  $IEM_{corretto}$ ) che differisca il meno possibile da quello simulato in ogni caso studio considerato.

I coefficienti correttivi sono stati desunti mettendo a confronto gli indicatori ottenuti applicando le tre equazioni per ogni profilo di utilizzo tailored considerato ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$ ,  $P_{risc-max}$ ) con i rispettivi valori delle simulazioni energetiche mediati per tutti i casi studio per ogni località di simulazione; questi sono riportati in Tabella 54 per  $E_M$  e in Tabella 55 per  $E_{CA}$ .

Tabella 53 – Coefficienti  $a$  e  $b$  per le due tipologie costruttive e in funzione del valore ricercato.

Valore Indicatore Normalizzato	Tipologia costruttiva				Codice identificativo
	Muratura portante		Cemento armato		
	a	b	a	b	
minimo	0.207	-1.477	0.180	-1.441	$IEN_{min}$
medio	0.056	-1.334	0.034	-1.267	$IEN_{med}$
massimo	0.076	-1.419	0.065	-1.399	$IEN_{max}$

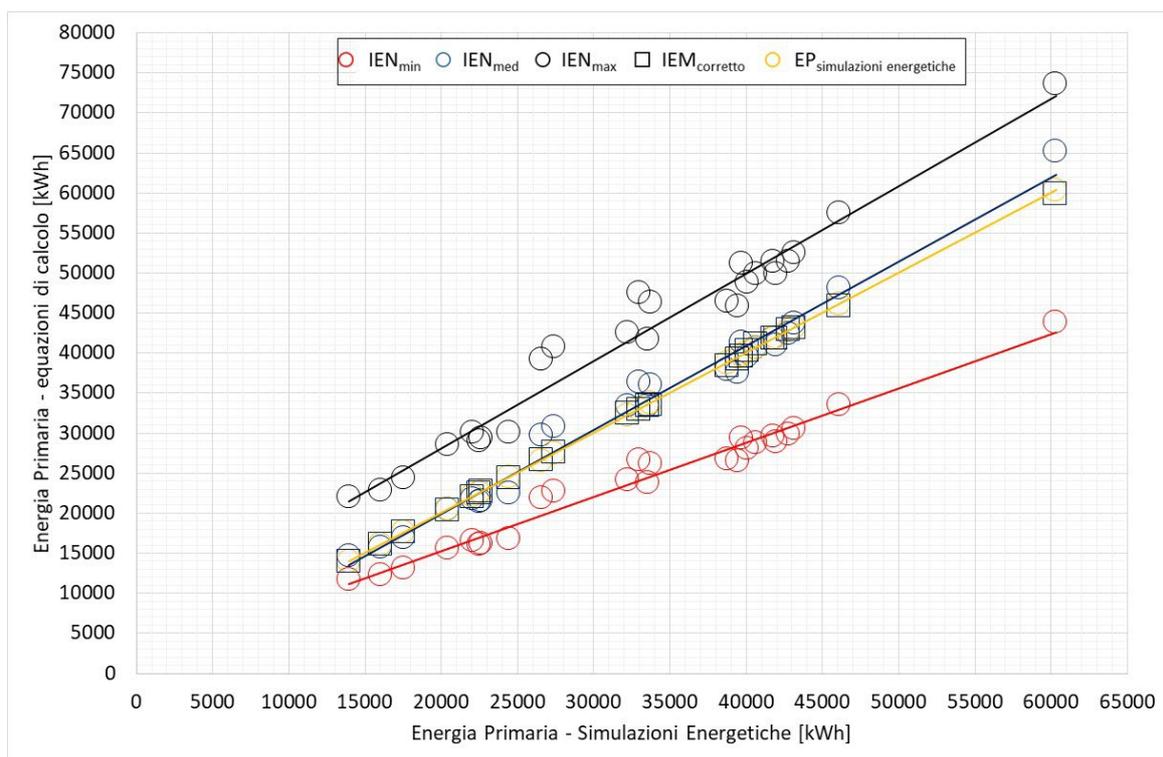


Figura 70 – Analisi della precisione delle tre equazioni per il profilo tailored  $P_{risc-med}$ : edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0.

Come si evince, i coefficienti correttivi tra le tipologie  $E_M$  e  $E_{CA}$  costruttive sono generalmente molto simili. Si registra tuttavia un'importante variazione per alcune località e per bassi valori dell'indicatore energetico tailored legato quindi al profilo di utilizzo  $P_{risc-min}$  caratterizzato dal numero minimo di ore di accensione dell'impianto. Invece i coefficienti correttivi ottenuti per valori elevati di energia primaria o per un numero di ore di accensione elevate (profilo tailored  $P_{risc-max}$ ) sono sensibilmente più simili e in alcuni casi coincidenti. I risultati ottenuti lasciano ipotizzare la possibilità di utilizzare le stesse equazioni ottenute per una specifica tipologia costruttiva anche ad altre diverse da quelle investigate nel presente lavoro. Questa ipotesi è stata oggetto di verifica per le macro-tipologie  $E_M$  e  $E_{CA}$  al fine di determinare quale delle due famiglie di equazioni, e, quindi, di coefficienti moltiplicativi, potesse essere impiegata anche per l'analisi di casi studio diversi.

I valori di  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{min}$  ed  $IEN_{max}$  sono stati ricalcolati per tutti i casi studio riportati in Tabella 52 aventi un livello di isolamento Liv-Iso-0 e tipologia costruttiva sia  $E_M$  che  $E_{CA}$ , in tutte le località di simulazione applicando entrambe le famiglie di equazioni ricavate per  $E_M$  e  $E_{CA}$ .

I risultati sono stati confrontati determinando un errore relativo medio (Tabella 56) calcolato rispetto ai valori restituiti dalla simulazioni energetiche. Il confronto permette di evidenziare come entrambe le famiglie permettano di approssimare correttamente il risultato della simulazione, specialmente quando applicate alla stessa tipologia costruttiva dalle quali sono state estrapolate, osservando nello specifico quanto segue:

1. utilizzo della famiglia di equazioni estrapolate per  $E_M$ : quando queste equazioni vengono utilizzate per la stessa tipologia costruttiva ( $E_M$ ) l'errore relativo medio risulta essere inferiore al 3%, mentre se applicate alla tipologia in cemento armato ( $E_{CA}$ ) l'errore tende ad essere leggermente superiore e pari al 5%;
2. utilizzo della famiglia di equazioni estrapolate per  $E_{CA}$ : quando queste equazioni sono utilizzate per  $E_{CA}$  l'errore relativo medio risulta essere inferiore al 2%, mentre se applicate alla tipologia  $E_M$  l'errore tende a diminuire arrivando ad essere inferiore all'1%.

Inoltre, è importante precisare che l'errore relativo maggiore è stato riscontrato per un numero di ore di accensione minore dell'impianto (profilo di utilizzo tailored  $P_{risc-min}$ ) a cui corrisponde un valore di energia

primaria più piccolo, mentre tende a decrescere all'aumentare del numero di ore di accensione dell'impianto e quindi a valori crescenti dell'energia primaria.

In accordo con i risultati ottenuti e in ottica di minimizzare il numero di relazioni matematiche da utilizzare, si è deciso di fare riferimento ai coefficienti trovati per gli edifici  $E_{CA}$  in quanto la famiglia di equazioni che si è ottenuta (Eq.  $E_{CA}$ ) permette di ben approssimare anche i risultati della casistica  $E_M$  commettendo un errore relativo medio di circa il 2%, partendo da un errore minimo dello 0,5% che tende a crescere con i Gradi Giorno. Pertanto, per la valutazione dell'energia primaria di tutte le configurazioni del caso studio E1.i con livello di isolamento Liv-Iso-0 si farà riferimento alle equazioni riportate in Figura 69 e ai coefficienti correttivi mostrati in

Tabella 54 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura ( $E_M$ ) con livello di isolamento Liv-Iso-0.

<b>Gradi Giorno</b>	<b><i>P<sub>risc-min</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-med</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-max</sub></i></b>		
	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>
568	0.55	0.35	0.10	0.00	0.75	0.00	0.00	0.75	0.00
707	0.85	0.00	0.15	0.10	0.80	0.10	0.00	0.00	0.00
751	0.75	0.10	0.15	0.20	0.60	0.20	0.00	0.10	0.00
990	1.01	0.00	0.00	0.05	0.85	0.05	0.00	0.00	0.00
1034	0.95	0.05	0.00	0.10	0.80	0.10	0.00	0.00	0.00
1142	1.01	0.00	0.00	0.15	0.85	0.15	0.00	0.00	0.00
1185	1.01	0.00	0.00	0.15	0.85	0.15	0.00	0.00	0.00
1317	1.00	0.00	0.00	0.25	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00
1415	1.08	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
1435	1.14	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
1530	0.95	0.00	0.05	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
1688	1.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
1821	1.08	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.05	0.00
2102	1.03	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2259	0.70	0.15	0.15	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00
2289	0.90	0.10	0.00	0.05	0.85	0.05	0.00	0.00	0.00
2323	0.70	0.30	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2345	0.80	0.20	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
2404	0.95	0.05	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
2472	1.03	0.00	0.00	0.20	0.80	0.20	0.00	0.00	0.00
2514	0.92	0.08	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.02	0.00
2617	0.75	0.25	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.05	0.00
2791	0.75	0.15	0.10	0.00	0.95	0.00	0.00	0.12	0.00
2850	0.30	0.70	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.12	0.00
4264	0.00	0.75	0.25	0.00	0.75	0.00	0.00	0.20	0.00

Tabella 55 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in cemento armato (E<sub>ca</sub>) con livello di isolamento Liv-Iso-0.

<b>Gradi Giorno</b>	<b>P<sub>risc-min</sub></b>			<b>P<sub>risc-med</sub></b>			<b>P<sub>risc-max</sub></b>		
	<b>IEN<sub>min</sub></b>	<b>IEN<sub>med</sub></b>	<b>IEN<sub>max</sub></b>	<b>IEN<sub>min</sub></b>	<b>IEN<sub>med</sub></b>	<b>IEN<sub>max</sub></b>	<b>IEN<sub>min</sub></b>	<b>IEN<sub>med</sub></b>	<b>IEN<sub>max</sub></b>
568	0.60	0.30	0.10	0.00	0.99	0.00	0.00	0.99	0.00
707	0.80	0.00	0.20	0.10	0.80	0.10	0.00	0.00	0.00
751	0.81	0.00	0.19	0.20	0.56	0.20	0.00	0.14	0.00
990	1.01	0.00	0.00	0.05	0.85	0.05	0.00	0.00	0.00
1034	1.02	0.00	0.00	0.10	0.80	0.10	0.00	0.00	0.00
1142	1.05	0.00	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.00	0.00
1185	1.04	0.00	0.00	0.15	0.80	0.15	0.00	0.00	0.00
1317	1.04	0.00	0.00	0.20	0.80	0.20	0.00	0.00	0.00
1415	1.10	0.00	0.00	0.10	0.25	0.10	0.00	0.00	0.00
1435	1.14	0.00	0.00	0.10	0.25	0.10	0.00	0.00	0.00
1530	1.02	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
1688	1.05	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
1821	1.12	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.05	0.00
2102	0.90	0.10	0.05	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00
2259	0.75	0.15	0.10	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00
2289	0.90	0.10	0.00	0.05	0.90	0.05	0.00	0.00	0.00
2323	0.90	0.00	0.10	0.05	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
2345	0.90	0.10	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
2404	0.92	0.08	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
2472	1.02	0.00	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.00	0.00
2514	0.92	0.08	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.02	0.00
2617	0.85	0.15	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.05	0.00
2791	0.80	0.20	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.12	0.00
2850	0.60	0.40	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.12	0.00
4264	0.00	0.95	0.05	0.00	0.95	0.00	0.00	0.20	0.00

Tabella 56 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie delle equazioni trovate (Eq. E<sub>M</sub> e Eq. E<sub>CA</sub>).

Gradi Giorno	<i>P<sub>risc-min</sub></i>				<i>P<sub>risc-med</sub></i>				<i>P<sub>risc-max</sub></i>			
	Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>		Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>		Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>	
	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>
568	4.86	7.17	0.96	1.06	0.12	2.54	1.08	1.46	0.03	-2.54	1.08	-1.46
707	5.06	6.12	1.71	0.86	0.23	3.63	2.01	1.19	-1.12	-4.75	1.84	-1.68
751	6.67	11.10	2.25	3.42	0.83	1.50	0.74	1.60	0.01	-2.82	3.00	0.26
990	6.48	12.23	1.18	3.26	0.01	1.80	1.47	0.32	-1.19	-3.33	1.11	-0.98
1034	7.45	15.35	2.22	4.52	0.73	1.28	0.96	1.03	-0.53	-2.79	1.67	-0.54
1142	7.36	15.98	2.02	4.61	0.39	2.39	1.69	0.93	-0.33	-3.24	1.67	-1.18
1185	6.81	15.51	1.18	4.71	0.69	0.64	0.52	0.82	-1.17	-3.18	0.78	-1.20
1317	7.94	17.44	3.19	6.93	1.95	0.94	0.97	0.26	-0.47	-2.48	1.26	-0.72
1415	6.18	14.80	-0.56	3.56	0.92	3.15	1.72	0.46	0.00	-2.13	1.57	-0.52
1435	6.06	13.53	0.42	4.03	0.60	2.72	2.04	0.03	0.26	-1.60	1.80	-0.03
1530	7.67	17.52	2.71	6.20	0.50	0.18	0.59	0.28	0.23	-1.33	1.64	0.11
1688	7.90	18.40	2.39	6.80	1.24	0.64	0.67	0.01	-0.67	-2.37	0.57	-1.11
1821	8.19	17.86	2.48	6.40	0.41	1.32	1.22	0.39	0.49	-1.44	1.39	-0.53
2102	3.17	9.69	-4.78	0.26	0.79	0.13	0.20	0.87	0.13	-1.52	1.99	0.37
2259	5.16	14.68	-3.04	3.21	2.18	6.51	3.16	0.84	-0.34	-0.85	0.31	-0.20
2289	5.70	14.18	-1.15	3.51	1.09	2.19	0.39	0.58	0.28	-0.77	0.90	-0.14
2323	5.78	15.66	-1.04	4.19	2.12	4.53	2.06	0.44	0.29	-0.65	0.89	-0.05
2345	5.28	14.87	-2.10	2.64	1.07	3.60	2.40	0.31	0.54	-0.45	1.12	0.13
2404	5.52	14.23	-2.35	3.45	2.27	4.31	1.48	0.27	0.20	-0.73	0.72	-0.20
2472	5.52	14.22	-1.90	3.30	1.89	2.69	0.69	0.12	0.64	-0.29	1.11	0.18
2514	6.49	15.05	0.39	4.51	2.43	4.77	1.76	0.21	0.67	-0.34	0.99	-0.02
2617	6.50	15.97	0.02	4.68	2.47	6.52	2.54	0.71	0.96	0.48	1.01	0.52
2791	6.70	16.85	-0.39	4.50	3.22	9.27	3.76	1.12	0.25	0.45	-0.30	-0.10
2850	7.46	18.04	1.88	6.90	4.97	11.76	1.94	2.62	0.86	1.46	0.26	0.86
4264	8.13	16.13	1.63	5.70	7.57	15.47	1.61	5.05	0.04	1.72	-2.46	-0.74
media	6.40	14.50	0.37	4.13	1.63	3.78	1.51	0.88	0.00	-1.42	1.04	-0.36

#### 2.5.2.1.2 Livello di isolamento Liv-Iso-1

L'energia primaria determinata con l'asset rating è riportata in Figura 71 per la tipologia costruttiva in muratura (E<sub>M</sub>) e in Figura 72 per quella in cemento armato (E<sub>CA</sub>), in funzione dei Gradi Giorno dei venticinque comuni di simulazione e considerando un livello di isolamento Liv-Iso-1. Questa categoria di casi studio rappresenta costruzioni tipiche degli anni 90' o antecedenti che sono state oggetto di ristrutturazione in quegli anni.

Dal grafico si evidenzia come i valori di energia primaria siano tra loro molto simili sia per le combinazioni E<sub>M</sub> e E<sub>CA</sub>, con una differenza che varia tra un minimo di 250 kWh (corrispondente con il minor valore dei Gradi Giorno) a un massimo di 1200 kWh (corrispondente con il massimo valore dei Gradi Giorno). La differenza percentuale varia tra il 4-5% e, essendo molto esigua, ha portato alla determinazioni di equazioni molto simili tra loro. Per questo motivo, le analisi per tutte le configurazioni della categoria E.1 con livello di isolamento Liv-Iso-1 prescindono dalla tipologia costruttiva.

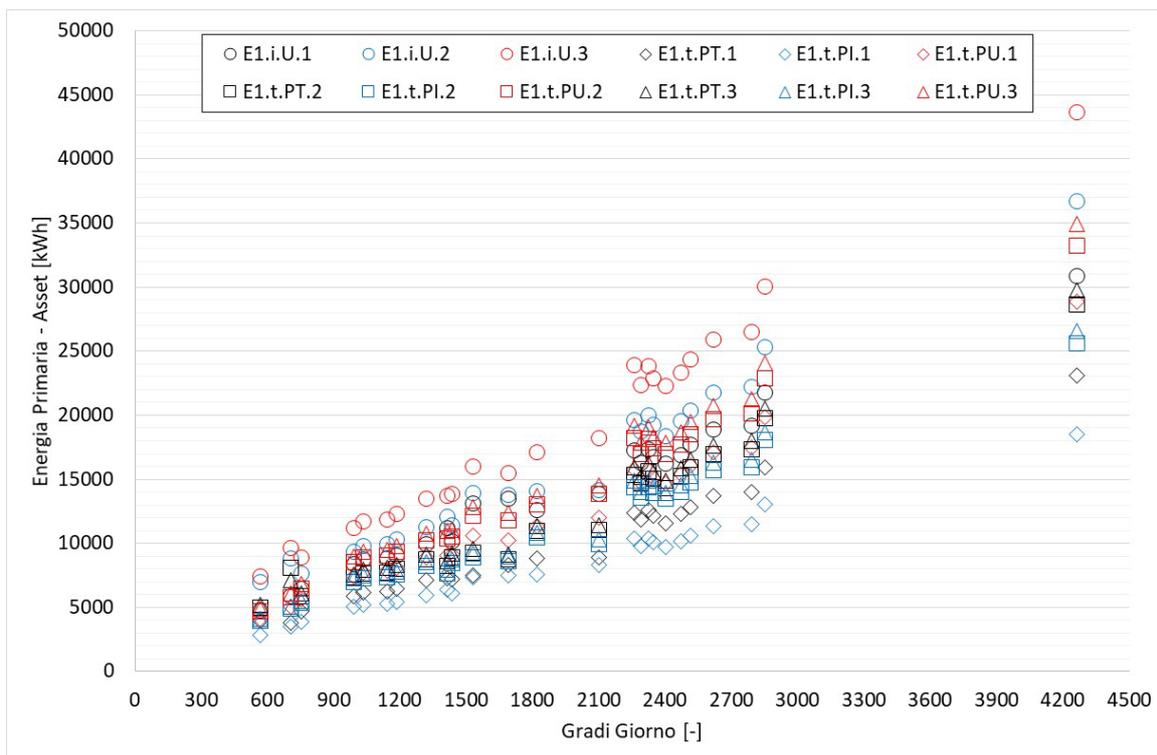


Figura 71 – Trend dell’energia primaria calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-1.

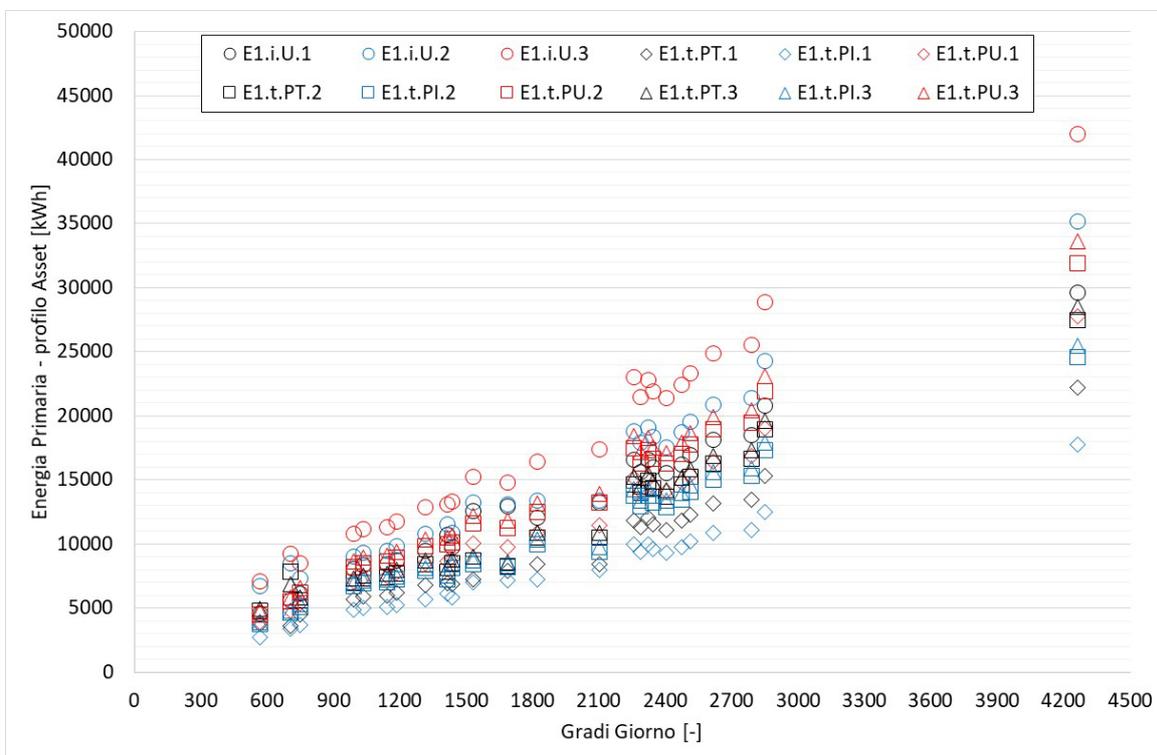


Figura 72 – Trend dell’energia primaria calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-1.

I valori di energia primaria calcolati con l’asset rating sono stati confrontati con quelli ricavati dai tre profili tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ), i cui valori medi delle due tipologie costruttive esaminate ( $E_M$  e  $E_{CA}$ ) sono mostrati in Figura 73. Il legame, in questo caso, è molto più lineare rispetto ai casi studio con livello di

isolamento Liv-Iso-0, in quanto tutti i profili tailored permettono di coprire ampiamente il fabbisogno energetico; unica eccezione è il caso E1.i.U.3, per il quale si riscontra un leggero scostamento dalla retta di interpolazione dei dati.

I valori di energia primaria calcolata con i tre profili tailored sono stati quindi normalizzati come specificato al paragrafo 2.5.2 ricavando gli indici energetici normalizzati che, confrontati con i valori derivanti dall'asset rating (Figura 74), evidenziano un trend approssimabile con delle curve del tipo descritto dall'Equazione 11. Tutti i valori sono delimitati dalle curve che descrivono i valori del profilo  $P_{risc-max}$  e il profilo  $P_{risc-min}$ . Anche in questo caso, all'aumentare dei Gradi Giorno le curve tendono a convergere verso un unico valore mentre al diminuire della gravità delle condizioni climatiche esse tendono a divergere. Il trend ottenuto risulta essere del tutto coerente con gli edifici non isolati.

Per ciascun profilo tailored e per ogni località sono stati evidenziati i valori minimo, medio e massimo dell'indicatore energetico normalizzato medio ricavati dai valori medi di tutti i casi studio analizzati, ottenendo il trend mostrato in Figura 75. Anche in questo caso, quindi, è possibile correlare il profilo asset a quelli tailored attraverso una famiglia di tre equazioni esprimibili con l'Equazione 12, dove IEN<sub>x</sub> è espressa dall'Equazione 11 in cui il pedice x rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore calcolabile attraverso i coefficienti *a* e *b* riportati in Tabella 57.

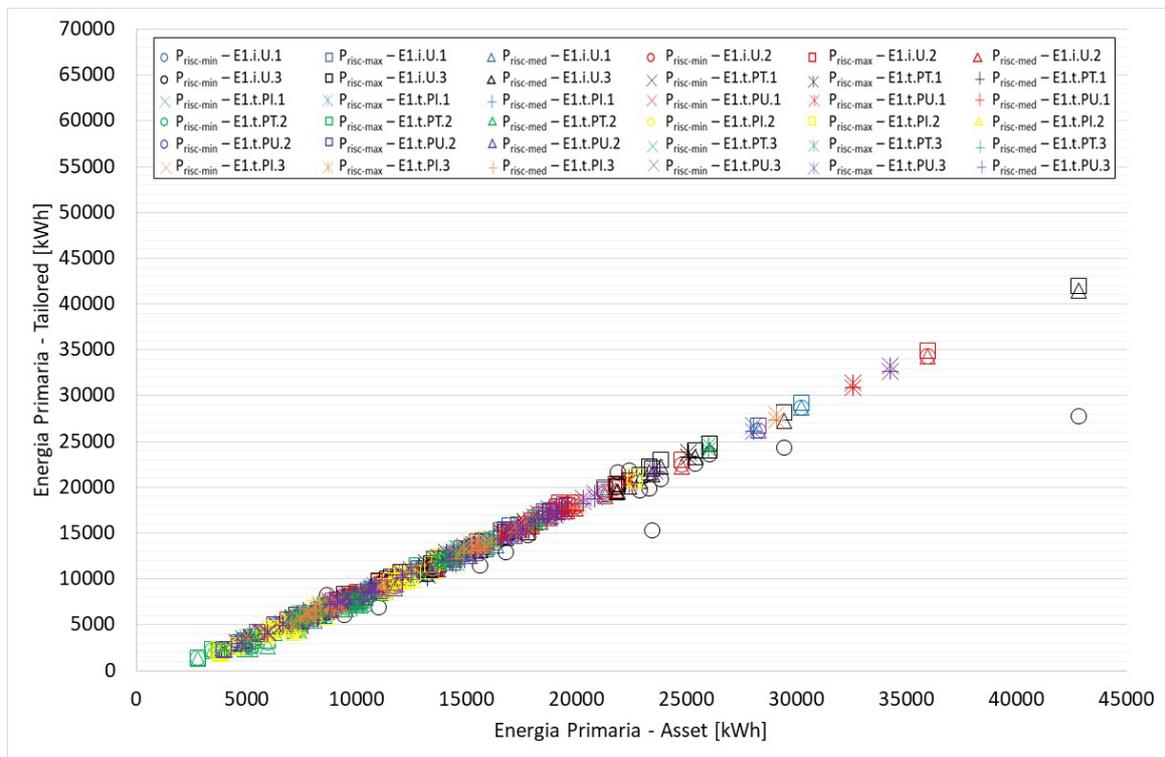


Figura 73 – Confronto tra energia primaria calcolata con l'asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

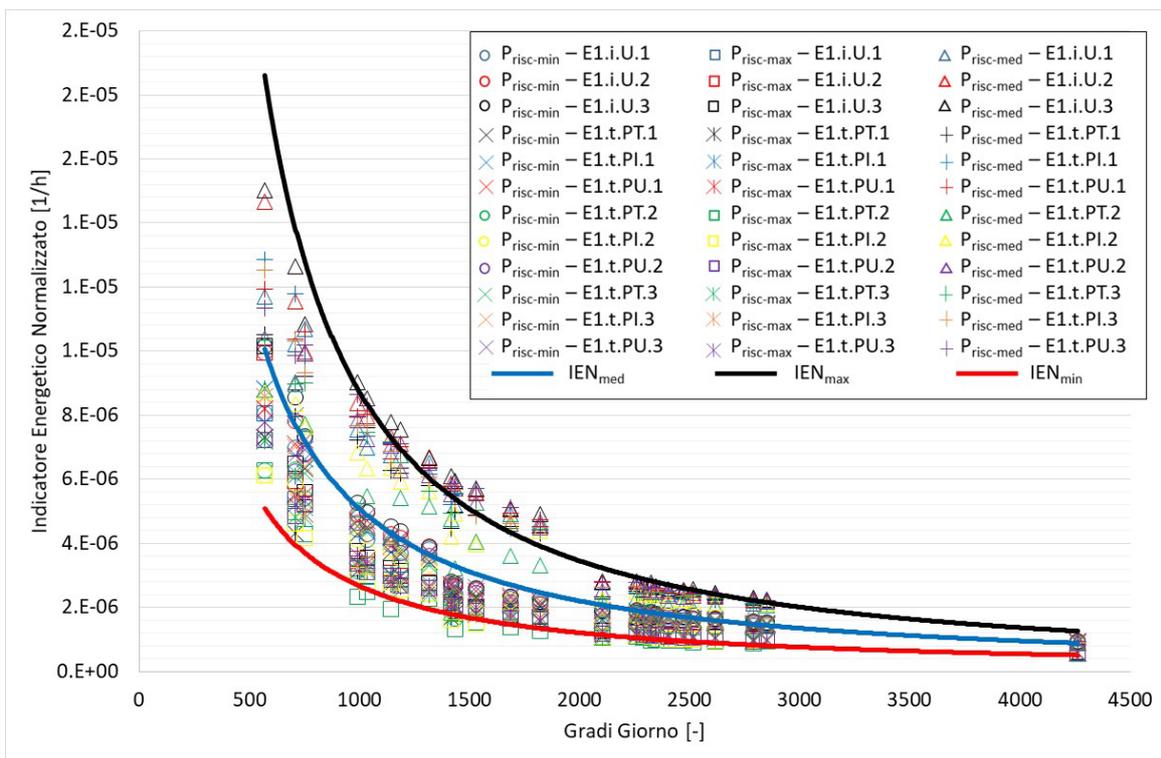


Figura 74 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

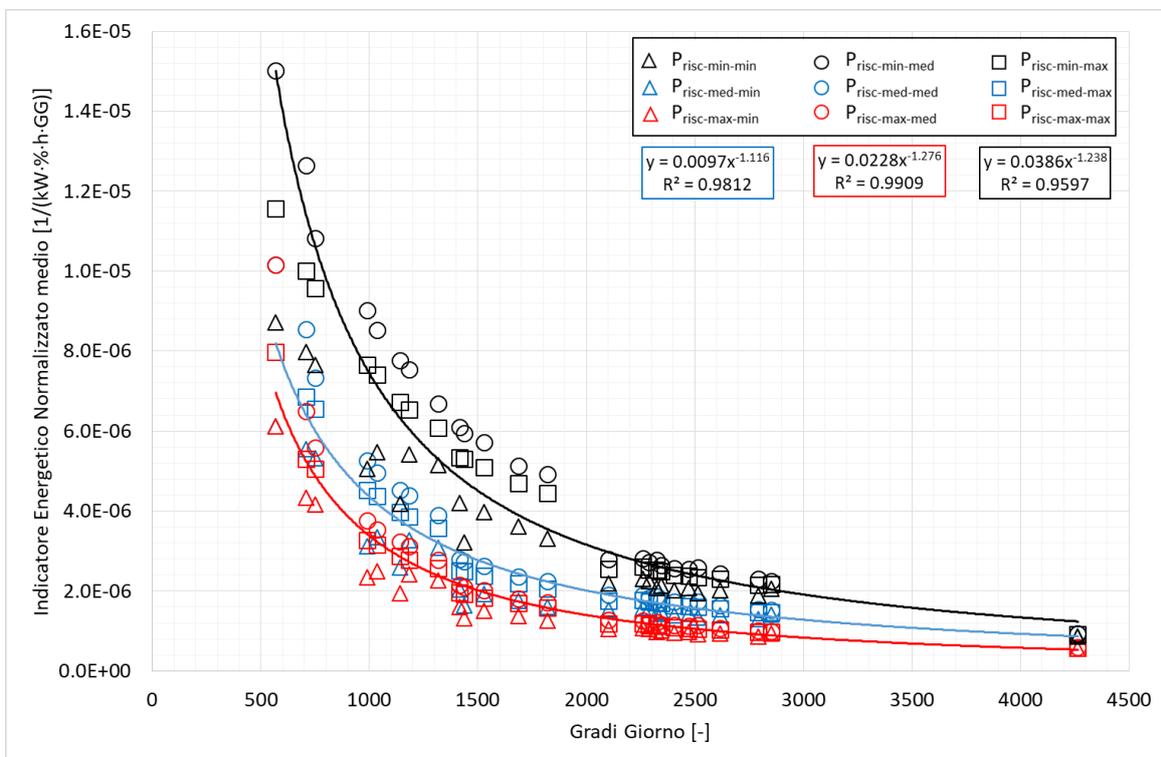


Figura 75 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

Tabella 57 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-1		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0386	-1.238	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0097	-1.116	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0228	-1.276	IEN <sub>max</sub>

L'analisi è proseguita identificando il valore dei coefficienti correttivi con cui moltiplicare i risultati delle equazioni per IEN<sub>min</sub>, IEN<sub>med</sub> ed IEN<sub>max</sub> e approssimarle il più possibile ai risultati delle simulazioni per ogni località. Questi sono stati determinati applicando lo stesso approccio metodologico specificato al paragrafo 2.5.2.1.1.

Un volta definiti i coefficienti correttivi, si è condotta la successiva fase di verifica della metodologia e dei risultati; in particolare, i valori di IEN<sub>min</sub>, IEN<sub>med</sub> ed IEN<sub>max</sub> ricavati dalle tre equazioni moltiplicate per i rispettivi coefficienti correttivi, sono stati confrontati con gli indicatori delle simulazioni energetiche per gli stessi casi studio. La verifica, riportata come valore medio di tutti i casi studio nelle venticinque località di simulazione in Tabella 59, ha dato esito positivo con un errore relativo medio del 1-2%.

Si precisa che l'errore relativo riscontrato tende a crescere con il diminuire dell'energia primaria fino a un valore massimo del 5% restituito per i valori minori dei Gradi Giorno. Questo errore non determina una significativa variazione dell'energia primaria degli edifici, pertanto è stato considerato accettabile.

Tabella 58 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura (E<sub>M</sub>) e in cemento armato (E<sub>CA</sub>) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

Gradi Giorno	Prisc-min			Prisc-med			Prisc-max		
	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>
568	0.58	0.32	0.10	0.01	0.99	0.01	0.01	0.99	0.01
707	0.81	0.09	0.10	0.15	0.80	0.15	0.00	0.17	0.00
751	0.84	0.00	0.16	0.20	0.57	0.20	0.00	0.22	0.00
990	1.04	0.00	0.00	0.10	0.80	0.10	0.00	0.00	0.00
1034	1.06	0.00	0.00	0.10	0.85	0.10	0.00	0.00	0.00
1142	1.08	0.00	0.00	0.13	0.80	0.13	0.00	0.06	0.00
1185	1.10	0.00	0.00	0.15	0.80	0.15	0.00	0.11	0.00
1317	1.16	0.00	0.00	0.20	0.80	0.20	0.00	0.26	0.00
1415	1.12	0.00	0.00	0.10	0.15	0.10	0.00	0.00	0.00
1435	1.13	0.00	0.00	0.10	0.16	0.10	0.00	0.00	0.00
1530	1.18	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00
1688	1.22	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00
1821	1.27	0.00	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.03	0.00
2102	0.74	0.10	0.16	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00
2259	0.91	0.09	0.00	0.04	0.96	0.04	0.00	0.00	0.00
2289	0.88	0.12	0.00	0.04	0.90	0.04	0.00	0.00	0.00
2323	0.93	0.07	0.00	0.05	0.94	0.05	0.00	0.00	0.00
2345	0.92	0.08	0.00	0.02	0.98	0.02	0.00	0.00	0.00
2404	0.90	0.10	0.00	0.02	0.98	0.02	0.00	0.00	0.00
2472	0.95	0.05	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.02	0.00
2514	1.00	0.00	0.00	0.06	0.94	0.06	0.00	0.04	0.00
2617	1.02	0.00	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.07	0.00
2791	1.04	0.00	0.00	0.12	0.88	0.12	0.00	0.12	0.00
2850	1.07	0.00	0.00	0.25	0.65	0.25	0.00	0.17	0.00
4264	0.15	0.85	0.00	0.15	0.85	0.15	0.00	0.15	0.00

Tabella 59 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie di equazioni trovate (Eq. E<sub>M</sub> e Eq. E<sub>CA</sub>): confronto tra edifici in muratura (E<sub>M</sub>) e in cemento armato (E<sub>CA</sub>) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

Gradi Giorno	<i>P<sub>risc-min</sub></i>				<i>P<sub>risc-med</sub></i>				<i>P<sub>risc-max</sub></i>			
	Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>		Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>		Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>	
	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>
568	5.91	8.31	5.91	7.01	5.10	7.17	5.10	5.18	5.10	7.17	5.10	5.18
707	4.56	4.89	4.56	5.68	4.61	4.78	4.61	4.60	4.31	4.33	4.31	3.57
751	0.96	5.05	0.96	3.92	0.97	4.80	0.97	3.76	0.14	3.40	0.14	2.26
990	1.34	5.36	1.34	4.40	1.69	5.28	1.69	4.44	1.19	4.38	1.19	4.37
1034	0.13	5.22	0.13	4.30	0.01	4.84	0.01	2.92	0.12	4.54	0.12	3.48
1142	0.19	4.02	0.19	5.08	0.02	3.36	0.02	4.38	0.57	3.51	0.57	2.54
1185	0.80	1.24	0.80	2.25	0.97	1.21	0.97	1.62	1.08	1.15	1.08	1.17
1317	1.93	3.87	1.93	2.22	1.30	3.05	1.30	2.01	1.49	3.07	1.49	0.61
1415	1.79	6.03	1.79	3.42	1.75	5.37	1.75	2.95	1.47	4.76	1.47	2.73
1435	2.54	7.31	2.54	3.74	1.54	5.56	1.54	3.12	1.21	4.85	1.21	3.96
1530	0.83	3.53	0.83	2.86	0.16	2.45	0.16	3.37	0.63	2.71	0.63	1.88
1688	2.15	2.84	2.15	2.24	1.98	2.42	1.98	1.85	1.33	1.63	1.33	0.85
1821	2.01	1.05	2.01	1.29	1.57	0.50	1.57	0.63	0.61	0.51	0.61	1.23
2102	1.43	2.54	1.43	2.72	1.41	2.30	1.41	1.87	1.08	1.65	1.08	2.09
2259	1.06	2.06	1.06	0.52	0.69	1.60	0.69	0.69	1.04	1.81	1.04	0.16
2289	0.76	1.83	0.76	1.79	0.67	1.62	0.67	1.26	0.10	0.87	0.10	0.25
2323	1.94	1.17	1.94	1.50	2.22	1.38	2.22	1.03	2.07	1.11	2.07	0.50
2345	1.06	1.48	1.06	2.18	0.12	0.45	0.12	1.73	0.31	0.50	0.31	0.90
2404	1.51	1.00	1.51	1.36	1.47	0.89	1.47	2.17	1.10	0.40	1.10	0.82
2472	1.05	1.97	1.05	1.61	1.26	2.08	1.26	0.18	1.08	1.75	1.08	0.19
2514	1.26	2.20	1.26	1.84	0.49	1.31	0.49	0.49	0.67	1.32	0.67	0.28
2617	0.47	2.22	0.47	1.89	0.36	1.98	0.36	1.69	0.33	1.10	0.33	0.57
2791	1.42	1.52	1.42	1.22	1.00	1.04	1.00	0.79	1.01	0.95	1.01	0.48
2850	0.83	1.45	0.83	1.17	0.83	1.55	0.83	1.28	0.48	1.07	0.48	0.35
4264	0.95	0.63	0.95	0.59	0.77	0.53	0.77	0.49	0.03	0.28	0.03	0.53
media	1.55	3.15	1.55	2.67	1.32	2.70	1.32	2.18	1.14	2.35	1.14	1.64

### 2.5.2.1.3 Livello di isolamento Liv-Iso-2

La terza casistica esaminata prende in considerazione le costruzioni tipiche degli anni 2000 o di epoca anche precedentemente ma oggetto di ristrutturazione con livelli di isolamento caratteristici del Liv-Iso-2.

I risultati del procedimento di analisi descritto al paragrafo 2.5.2 non sono stati mostrati nella loro interezza, in quanto i trend ottenuti sono del tutto analoghi al caso discusso al precedente paragrafo 2.5.2.1.2.

L'energia primaria di questa casistica è stata determinata con l'asset rating per E<sub>M</sub> e E<sub>CA</sub>, sempre al variare dei Gradi Giorno delle località di simulazione confermando il trend osservato in precedenza. Come per i casi studio con livello di isolamento Liv-Iso-1, si riscontrano dei valori di energia primaria molto simili tra loro per entrambe le casistiche (E<sub>M</sub> e E<sub>CA</sub>), con una differenza che varia da un minimo di 150 kWh (corrispondente con il minor valore dei Gradi Giorno) a un massimo di 800 kWh (corrispondente con il massimo valore dei Gradi Giorno). La differenza percentuale è tra il 3-4% quindi i valori di energia primaria considerati per l'analisi sono stati mediati tra le due configurazioni; pertanto anche l'analisi per Liv-iso-2 prescindere dalla tipologia costruttiva non influenzando questa in maniera significativa i risultati.

Analizzata l'energia primaria secondo l'asset rating, si è proceduto con l'analisi di correlazione con i tre profili tailored che ha confermato un legame più lineare rispetto gli edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0 in quanto le ore ipotizzate nei profili di utilizzo tailored permettono di coprire ampiamente il

fabbisogno energetico dell'edificio; anche in questo caso, solo per il caso studio E1.i.U.3 si evidenzia un leggero scostamento dalla retta di interpolazione dei dati. Per il trend del confronto tra asset rating e tailored rating si faccia riferimento ai risultati della stessa analisi mostrati al paragrafo 2.5.2.1.2.

I valori dell'energia primaria calcolati con i profili tailored sono stati quindi normalizzati come descritto al paragrafo 2.5.2 evidenziando un trend approssimabile con delle curve descritte dall'Equazione 11. Sulla base di questo risultato, per ciascun profilo tailored e per ogni località di simulazione sono stati considerati i valori minimo, medio e massimo a partire dai valori medi di tutti i casi studio analizzati, ottenendo il trend mostrato in Figura 76.

Il sistema tre equazioni che permette di correlare l'asset rating con i tre profili tailored è anche in questo caso esprimibile attraverso l'Equazione 12, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11, in cui con il pedice  $x$  rappresenta il valore desiderato dell'indicatore ( $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$ ) calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  mostrati in Tabella 58.

Anche in questo caso, sono stati definiti dei coefficienti correttivi per ogni equazione al variare delle ore di accensione dell'impianto e dei Gradi Giorno, ottenendo le costanti riportate in Tabella 60.

Infine, le tre equazioni moltiplicate per i rispettivi coefficienti correttivi sono state verificate rispetto i valori restituiti dalle simulazioni energetiche per la stessa configurazione del caso studio. La verifica (Tabella 62) ha evidenziato un errore relativo medio più elevato rispetto al caso precedente (7-8%), ma considerabile accettabile in termini assoluti, come evidenziato nella stessa Figura 77 dove i risultati sono tutti molto vicini alla retta nera (bisettrice) che rappresenta la perfetta correlazione dei risultati. Pertanto, nonostante un errore relativo medio leggermente superiore, i risultati attesi possono comunque essere considerati attendibili.

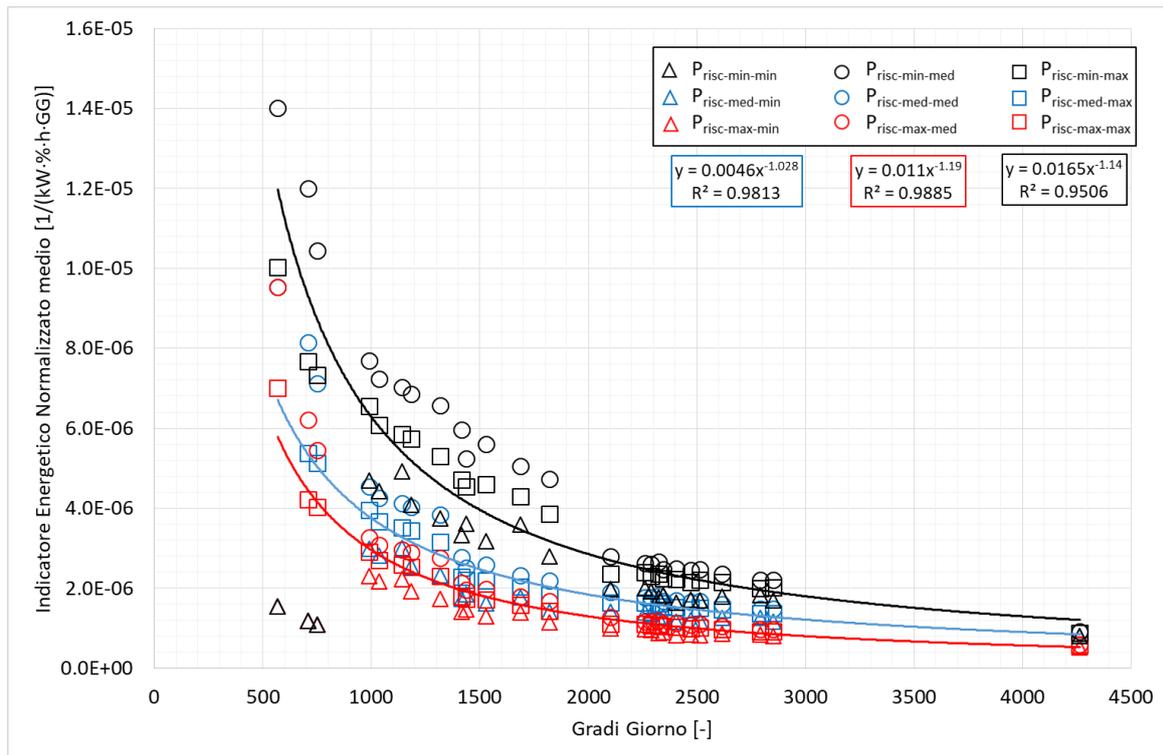


Figura 76 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

Tabella 60 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-2		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0165	-1.14	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0046	-1.028	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.011	-1.19	IEN <sub>max</sub>

Tabella 61 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura (E<sub>M</sub>) e in cemento armato (E<sub>CA</sub>) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

Gradi Giorno	Prisc-min			Prisc-med			Prisc-max		
	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>
568	0.81	0.00	0.19	0.15	0.80	0.15	0.15	0.80	0.15
707	0.82	0.18	0.00	0.15	0.85	0.15	0.00	0.20	0.00
751	0.75	0.25	0.00	0.09	0.91	0.09	0.00	0.08	0.00
990	1.05	0.00	0.00	0.10	0.82	0.10	0.00	0.00	0.00
1034	1.03	0.00	0.00	0.08	0.78	0.08	0.00	0.00	0.00
1142	1.10	0.00	0.00	0.15	0.78	0.15	0.00	0.10	0.00
1185	1.13	0.00	0.00	0.16	0.84	0.16	0.00	0.19	0.00
1317	1.19	0.00	0.00	0.22	0.78	0.22	0.00	0.30	0.00
1415	1.15	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00
1435	1.11	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
1530	1.21	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
1688	1.27	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.05	0.00
1821	1.25	0.00	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00
2102	0.80	0.00	0.20	0.00	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00
2259	0.96	0.00	0.04	0.02	0.98	0.02	0.00	0.00	0.00
2289	0.90	0.05	0.05	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00
2323	0.98	0.02	0.00	0.07	0.90	0.07	0.00	0.02	0.00
2345	0.89	0.11	0.00	0.01	0.95	0.01	0.00	0.00	0.00
2404	0.95	0.05	0.00	0.05	0.90	0.05	0.00	0.00	0.00
2472	0.94	0.06	0.00	0.05	0.89	0.05	0.00	0.00	0.00
2514	1.02	0.00	0.00	0.13	0.80	0.13	0.00	0.08	0.00
2617	1.04	0.00	0.00	0.11	0.87	0.11	0.00	0.10	0.00
2791	1.04	0.00	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.12	0.00
2850	1.07	0.00	0.00	0.20	0.73	0.20	0.00	0.15	0.00
4264	0.10	0.90	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.13	0.00

Tabella 62 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie di equazioni trovate (Eq.  $E_M$  e Eq.  $E_{CA}$ ): confronto tra edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

Gradi Giorno	<i>P<sub>risc-min</sub></i>				<i>P<sub>risc-med</sub></i>				<i>P<sub>risc-max</sub></i>			
	Eq. $E_M$		Eq. $E_{CA}$		Eq. $E_M$		Eq. $E_{CA}$		Eq. $E_M$		Eq. $E_{CA}$	
	$E_M$	$E_{CA}$	$E_M$	$E_{CA}$	$E_M$	$E_{CA}$	$E_M$	$E_{CA}$	$E_M$	$E_{CA}$	$E_M$	$E_{CA}$
568	5.91	8.31	5.91	7.01	5.10	7.17	5.10	5.18	5.10	7.17	5.10	5.18
707	4.56	4.89	4.56	5.68	4.61	4.78	4.61	4.60	4.31	4.33	4.31	3.57
751	0.96	5.05	0.96	3.92	0.97	4.80	0.97	3.76	0.14	3.40	0.14	2.26
990	1.34	5.36	1.34	4.40	1.69	5.28	1.69	4.44	1.19	4.38	1.19	4.37
1034	0.13	5.22	0.13	4.30	0.01	4.84	0.01	2.92	0.12	4.54	0.12	3.48
1142	0.19	4.02	0.19	5.08	0.02	3.36	0.02	4.38	0.57	3.51	0.57	2.54
1185	0.80	1.24	0.80	2.25	0.97	1.21	0.97	1.62	1.08	1.15	1.08	1.17
1317	1.93	3.87	1.93	2.22	1.30	3.05	1.30	2.01	1.49	3.07	1.49	0.61
1415	1.79	6.03	1.79	3.42	1.75	5.37	1.75	2.95	1.47	4.76	1.47	2.73
1435	2.54	7.31	2.54	3.74	1.54	5.56	1.54	3.12	1.21	4.85	1.21	3.96
1530	0.83	3.53	0.83	2.86	0.16	2.45	0.16	3.37	0.63	2.71	0.63	1.88
1688	2.15	2.84	2.15	2.24	1.98	2.42	1.98	1.85	1.33	1.63	1.33	0.85
1821	2.01	1.05	2.01	1.29	1.57	0.50	1.57	0.63	0.61	0.51	0.61	1.23
2102	1.43	2.54	1.43	2.72	1.41	2.30	1.41	1.87	1.08	1.65	1.08	2.09
2259	1.06	2.06	1.06	0.52	0.69	1.60	0.69	0.69	1.04	1.81	1.04	0.16
2289	0.76	1.83	0.76	1.79	0.67	1.62	0.67	1.26	0.10	0.87	0.10	0.25
2323	1.94	1.17	1.94	1.50	2.22	1.38	2.22	1.03	2.07	1.11	2.07	0.50
2345	1.06	1.48	1.06	2.18	0.12	0.45	0.12	1.73	0.31	0.50	0.31	0.90
2404	1.51	1.00	1.51	1.36	1.47	0.89	1.47	2.17	1.10	0.40	1.10	0.82
2472	1.05	1.97	1.05	1.61	1.26	2.08	1.26	0.18	1.08	1.75	1.08	0.19
2514	1.26	2.20	1.26	1.84	0.49	1.31	0.49	0.49	0.67	1.32	0.67	0.28
2617	0.47	2.22	0.47	1.89	0.36	1.98	0.36	1.69	0.33	1.10	0.33	0.57
2791	1.42	1.52	1.42	1.22	1.00	1.04	1.00	0.79	1.01	0.95	1.01	0.48
2850	0.83	1.45	0.83	1.17	0.83	1.55	0.83	1.28	0.48	1.07	0.48	0.35
4264	0.95	0.63	0.95	0.59	0.77	0.53	0.77	0.49	0.03	0.28	0.03	0.53
media	1.55	3.15	1.55	2.67	1.32	2.70	1.32	2.18	1.14	2.35	1.14	1.64

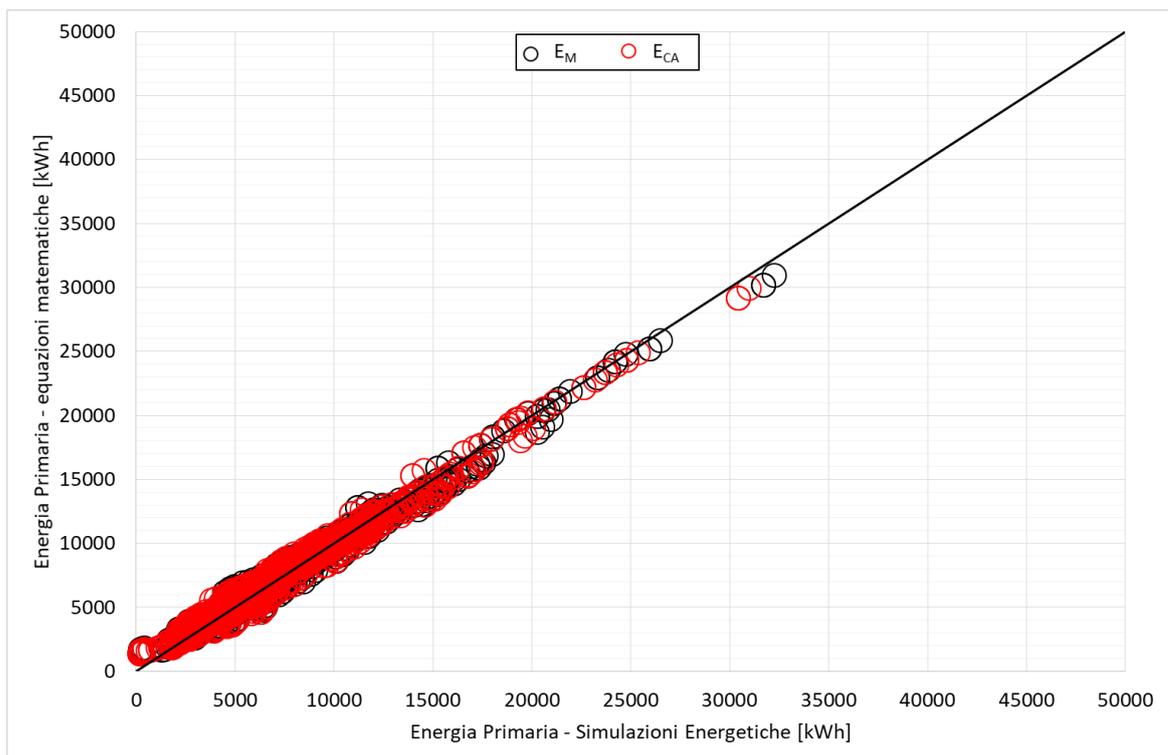


Figura 77 – Confronto tra energia primaria simulata e restituita dalle relazioni matematiche per edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

#### 2.5.2.1.1 Livello di isolamento Liv-Iso-3

L'energia primaria richiesta per le nuove costruzioni, indicate con un livello di isolamento Liv-Iso-3, determinata con l'asset rating è stata determinata al variare dei Gradi Giorno dei venticinque comuni di simulazione selezionati, evidenziando lo stesso trend osservato per i casi precedenti.

Anche in questo caso, i risultati del procedimento di analisi descritto al paragrafo 2.5.2 non sono stati mostrati nella loro interezza, in quanto i trend ottenuti sono del tutto analoghi al caso discusso al paragrafo 2.5.2.1.2. I risultati dell'asset rating sono stati confrontati con quelli ottenuti con i tre profili tailored, confermando lo stesso legame lineare evidenziato nei casi con livello di isolamento Liv-Iso-1 e Liv-Iso-2. Per il trend del confronto tra asset rating e tailored rating si faccia riferimento ai risultati della stessa analisi mostrati al paragrafo 2.5.2.1.2.

Come per i casi precedenti, si è proceduto con la normalizzazione di tutti i valori di energia primaria, come descritto al paragrafo 2.5.2, ottenendo gli indici energetici normalizzati che evidenziando, anche in questo caso, lo stesso trend approssimabile con le curve descritte dall'Equazione 11.

Sulla base di questo risultato, si sono considerati per ciascun profilo tailored e ogni località i valori minimo, medio e massimo a partire dai valori medi di tutti i casi studio, ottenendo il trend mostrato in Figura 78. In accordo con i grafici riportati, è possibile definire un sistema di tre equazioni espresse dall'Equazione 12 dove  $IEN_x$  è sempre espresso dall'Equazione 11 in con il pedice x si è indicato il valore dello stesso indicatore ( $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$ ) calcolabile con i coefficienti  $a$  e  $b$  mostrati in Tabella 63.

Come fatto per le casistiche studiate in precedenza, anche per le nuove costruzioni è stato necessario definire dei coefficienti correttivi per ognuna delle tre equazioni con lo scopo di minimizzare l'errore tra l'energia stimata dalle relazioni matematiche e quella delle simulazioni energetiche. Questi sono sinteticamente riportati in Tabella 64.

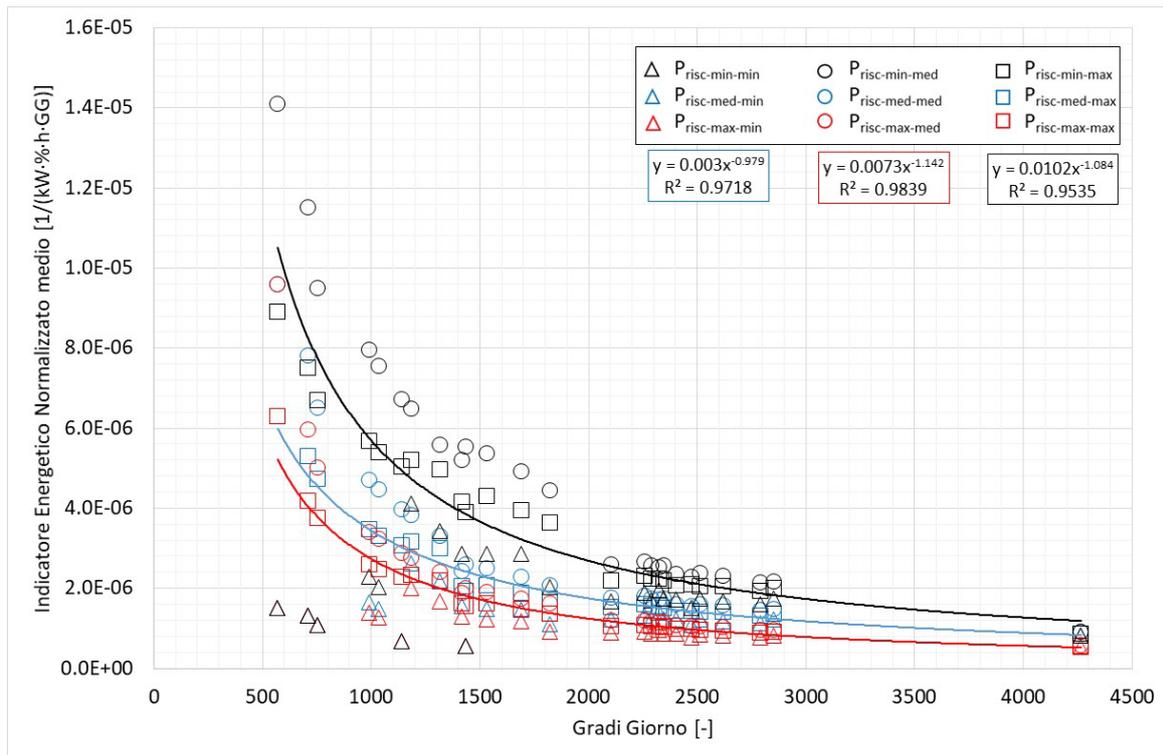


Figura 78 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici di nuova costruzione caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

Tabella 63 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-3		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0102	-1.084	IEN <sub>min</sub>
medio	0.003	-0.979	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0073	-1.142	IEN <sub>max</sub>

Infine, le equazioni per IEN<sub>min</sub>, IEN<sub>med</sub> ed IEN<sub>max</sub> moltiplicate per i rispettivi fattori correttivi sono state oggetto di verifica mettendo a confronto i risultati con quelli ottenuti nelle simulazioni energetiche effettuate. Questa analisi ha fatto emergere un errore relativo medio del 10%, quindi maggiore rispetto alle precedenti casistiche, ma in termini assoluti molto piccolo come evidenziato stesso in Figura 79 in cui sono riportati i risultati di tutti i casi studio indagati. Come si evince, il valore di energia primaria restituito dal sistema di equazioni è sempre prossimo alla retta bisettrice che rappresenta la perfetta coincidenza con le simulazioni energetiche. Pertanto, i risultati attesi possono comunque essere considerati attendibili.

Si tiene a precisare che gli scostamenti maggiori sono stati riscontrati per bassi valori dei Gradi Giorno e per un piccolo numero di ore di accensione dell'impianto a cui corrispondono generalmente bassi valori di energia primaria.

Tabella 64 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici di nuova costruzione caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

<b>Gradi Giorno</b>	<b><i>P<sub>risc-min</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-med</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-max</sub></i></b>		
	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>
568	0.86	0.14	0.00	0.32	0.00	0.32	0.32	0.00	0.32
707	1.01	0.00	0.00	0.29	0.71	0.29	0.00	0.66	0.00
751	0.79	0.21	0.00	0.13	0.87	0.13	0.00	0.19	0.00
990	1.03	0.00	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
1034	1.02	0.00	0.00	0.04	0.96	0.04	0.00	0.00	0.00
1142	1.07	0.00	0.00	0.09	0.91	0.09	0.00	0.03	0.00
1185	1.12	0.00	0.00	0.16	0.84	0.16	0.00	0.18	0.00
1317	1.20	0.00	0.00	0.25	0.75	0.25	0.00	0.36	0.00
1415	1.09	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00
1435	1.07	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
1530	1.24	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00
1688	1.26	0.00	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.02	0.00
1821	1.26	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	0.04	0.00
2102	0.64	0.36	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00
2259	0.99	0.00	0.01	0.07	0.93	0.07	0.00	0.02	0.00
2289	0.95	0.04	0.01	0.04	0.96	0.04	0.00	0.01	0.00
2323	0.99	0.01	0.00	0.06	0.94	0.06	0.00	0.03	0.00
2345	0.95	0.05	0.00	0.05	0.94	0.05	0.00	0.02	0.00
2404	0.87	0.13	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00
2472	0.97	0.03	0.00	0.04	0.96	0.04	0.00	0.03	0.00
2514	1.00	0.00	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.04	0.00
2617	1.04	0.00	0.00	0.12	0.88	0.12	0.00	0.11	0.00
2791	1.05	0.00	0.00	0.12	0.88	0.12	0.00	0.13	0.00
2850	1.10	0.00	0.00	0.22	0.78	0.22	0.00	0.21	0.00
4264	0.12	0.88	0.00	0.12	0.88	0.12	0.00	0.14	0.00

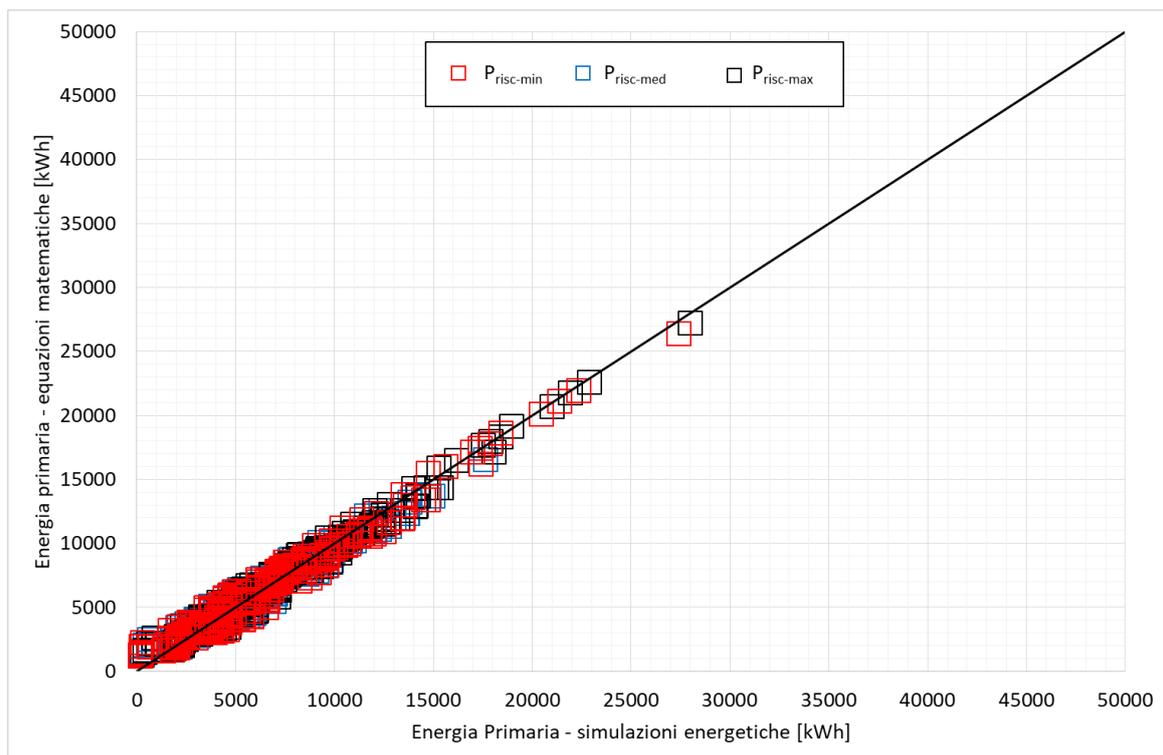


Figura 79 – Confronto tra energia primaria simulata e restituita dalle relazioni matematiche per: edifici di nuova costruzione caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

### 2.5.2.2 Correlazione tra generatori di calore a combustione

Una volta definite le relazioni di correlazione per il primo generatore di calore, le analisi sono state replicate per gli altri generatori di calore considerati.

In considerazione delle analisi preliminari condotte (paragrafo 2.5.2), si è evinto come i generatori a combustione di tipo standard restituiscano dei risultati molto simili tra loro a meno di una costante che dipende proprio dalle caratteristiche del generatore di calore stesso. Questo importante riscontro, quindi, ha portato a ipotizzare la possibilità di utilizzare le stesse relazioni fin qui determinate anche per gli altri generatori di calore. A tale riguardo, si è quindi proceduto con un'analisi dettagliata dei risultati ottenuti con i generatori di calore definiti in Tabella 35 per i casi studio riportati in Tabella 52 per tutti i livelli di isolamento (Tabella 29) e le località di simulazione (Tabella 19).

#### 2.5.2.2.1 Livello di isolamento Liv-Iso-0

I casi studio E1.i ed E1.t sono stati analizzati in tutte le loro configurazioni dimensionali al variare dei Gradi Giorno dei venticinque comuni di simulazione prescelti, considerando il livello di isolamento Liv-Iso-0 e al variare della tipologia di generatore di calore.

I valori di energia primaria calcolati con l'asset rating per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura (tre standard e uno a condensazione), mostrati in Figura 80, hanno permesso di elaborare le seguenti considerazioni:

- 1) generatore 1, generatore 2 e generatore 3 restituiscono un'energia primaria pressoché coincidente a meno di una costante che dipende dalle caratteristiche del generatore stesso (potenza e rendimento);
- 2) generatore 4, a condensazione operante ad alta temperatura e cioè avente i radiatori come terminali di emissione, presenta un andamento che diverge dagli altri generatori per bassi valori dei Gradi Giorno, mentre converge per valori dei Gradi Giorno elevati.

Le stesse considerazioni possono essere estese ai profili tailored  $P_{risc-min}$  (Figura 81),  $P_{risc-med}$  (Figura 82),  $P_{risc-max}$  (Figura 83) per i quali si riscontra un trend del tutto simile a quello dell'asset rating.

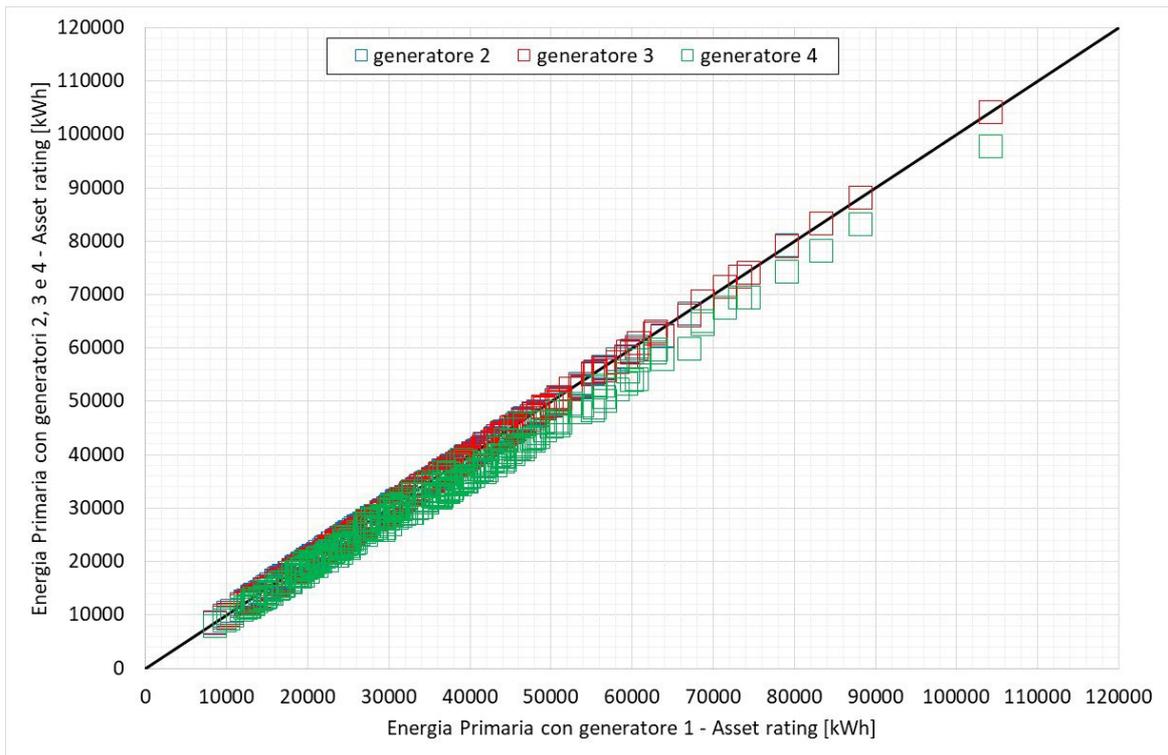


Figura 80 – Confronto tra l’energia primaria simulata con l’asset rating per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

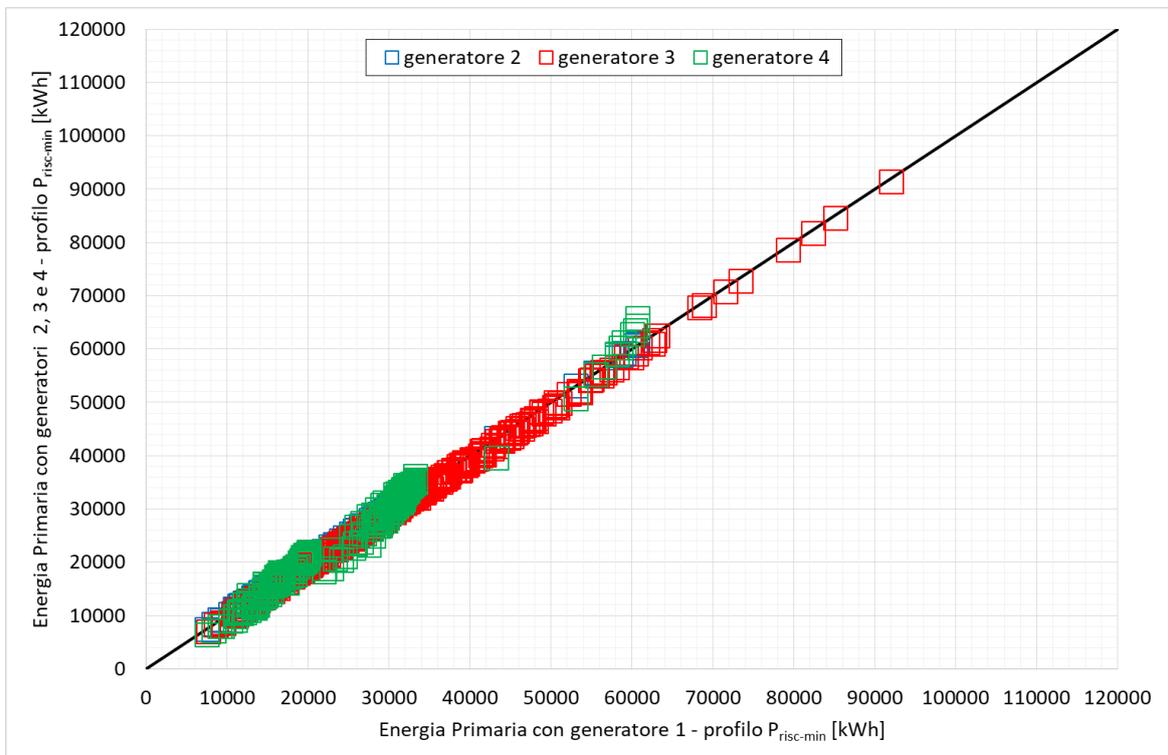


Figura 81 – Confronto tra l’energia primaria simulata con il profilo  $P_{risc-min}$  per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

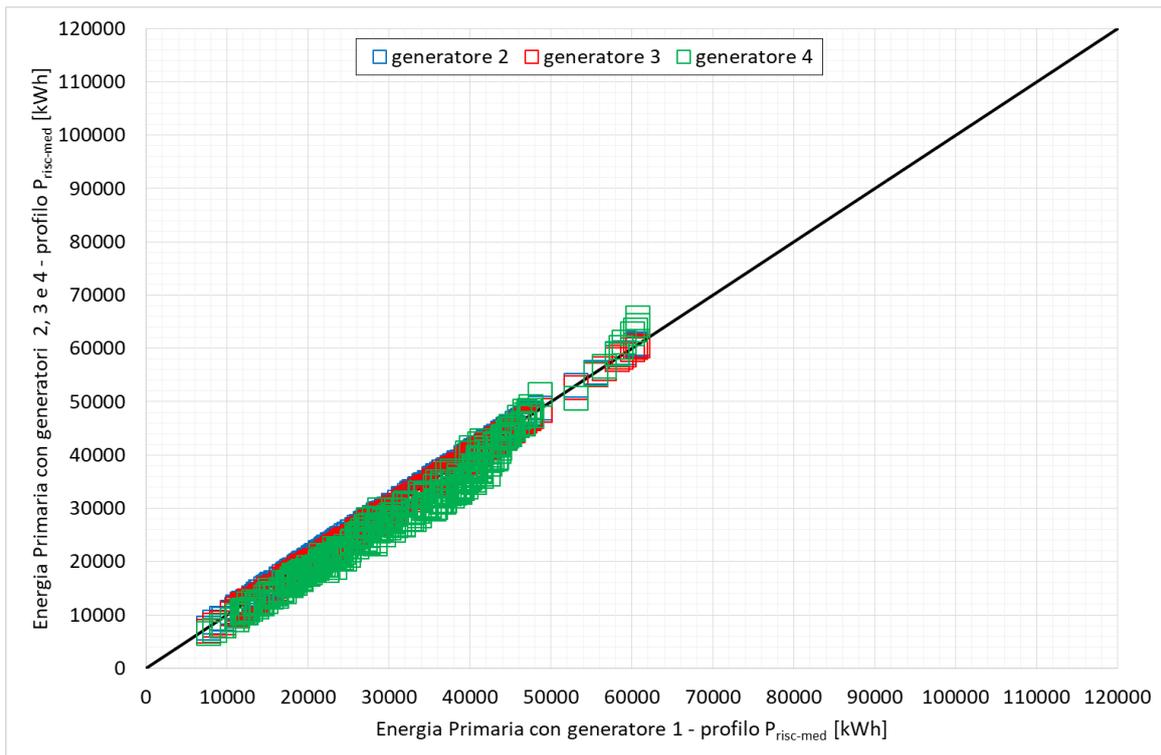


Figura 82 – Confronto tra l’energia primaria simulata con il profilo Prisc-med per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

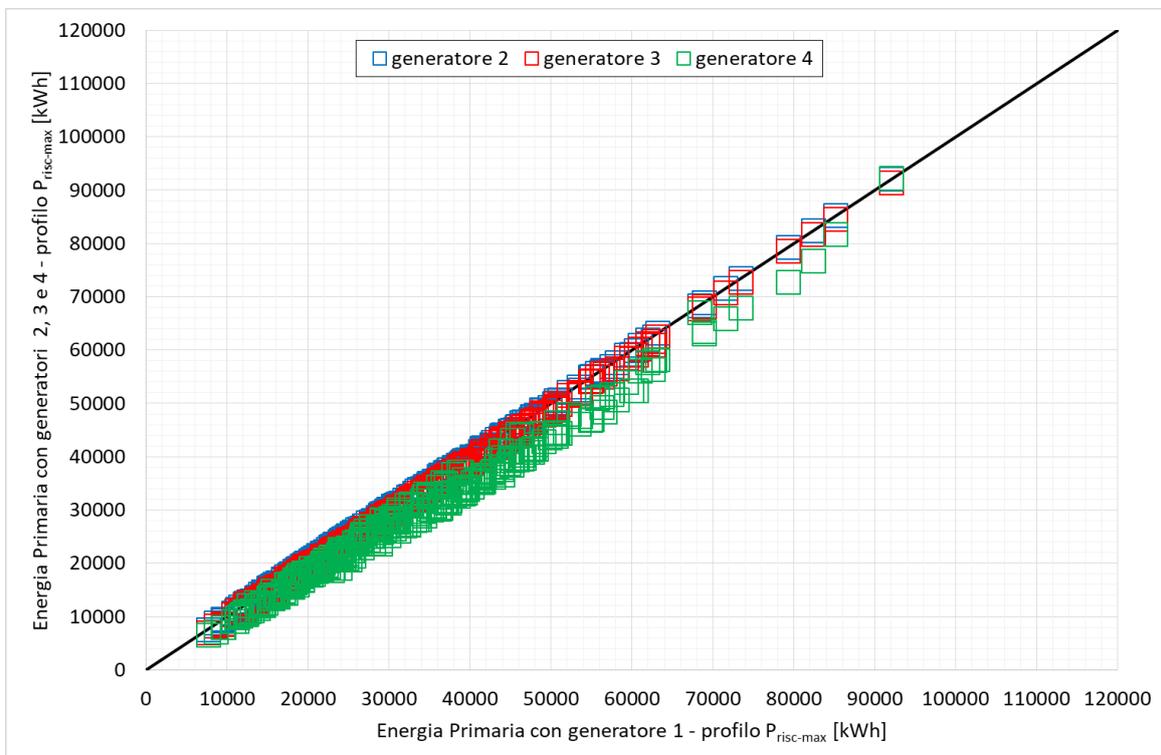


Figura 83 – Confronto tra l’energia primaria simulata con il profilo Prisc-max per i quattro generatori di calore operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

In accordo i risultati ottenuti, le relazioni matematiche determinate per il generatore 1 sono state applicate e verificate anche per gli altri generatori di calore. L’Equazione 12 è stata quindi applicata ai vari casi studio

utilizzando i profili tailored  $P_{risc-min}$  (Figura 84),  $P_{risc-med}$  (Figura 85),  $P_{risc-max}$  (Figura 86) applicati ai diversi generatori di calore. Già dalla sola restituzione grafica dei trend dell'energia primaria dei generatori 2, 3 e 4 rispetto a quella del generatore 1 risulta evidente come solo i valori relativi al generatore 4 mostrino degli scostamenti maggiori.

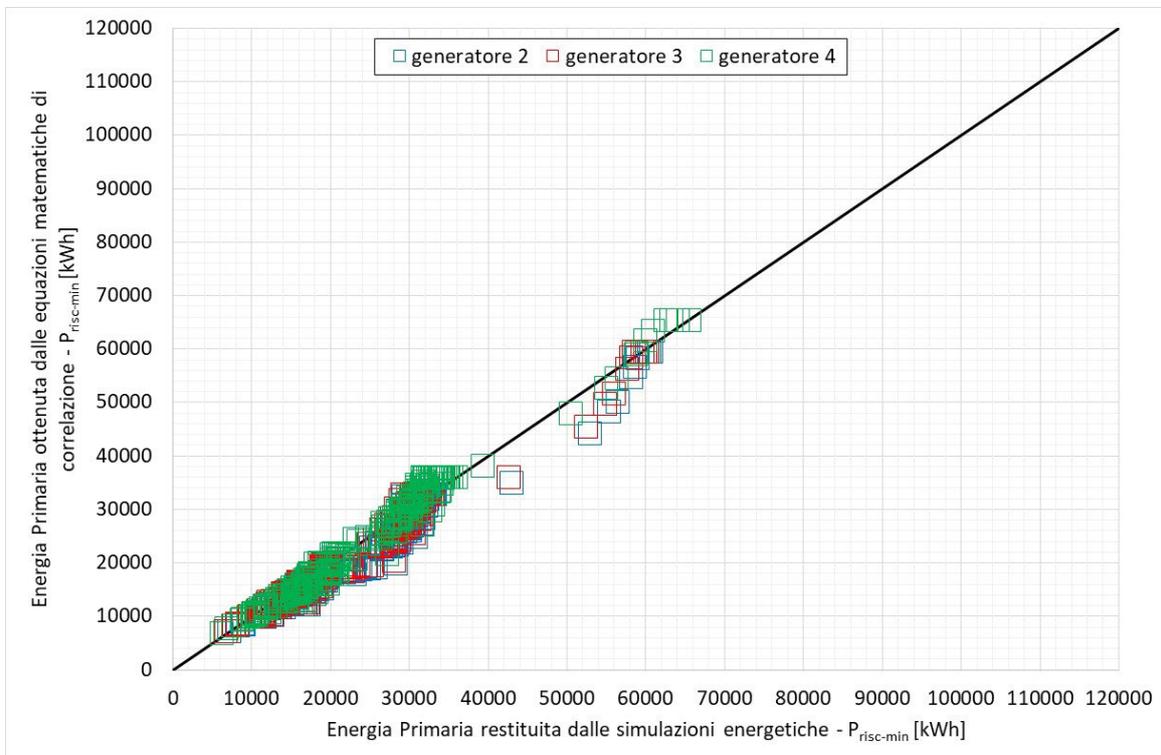


Figura 84 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dall’Equazione 12 con il profilo  $P_{risc-min}$  per i generatori di calore 2, 3 e 4 operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

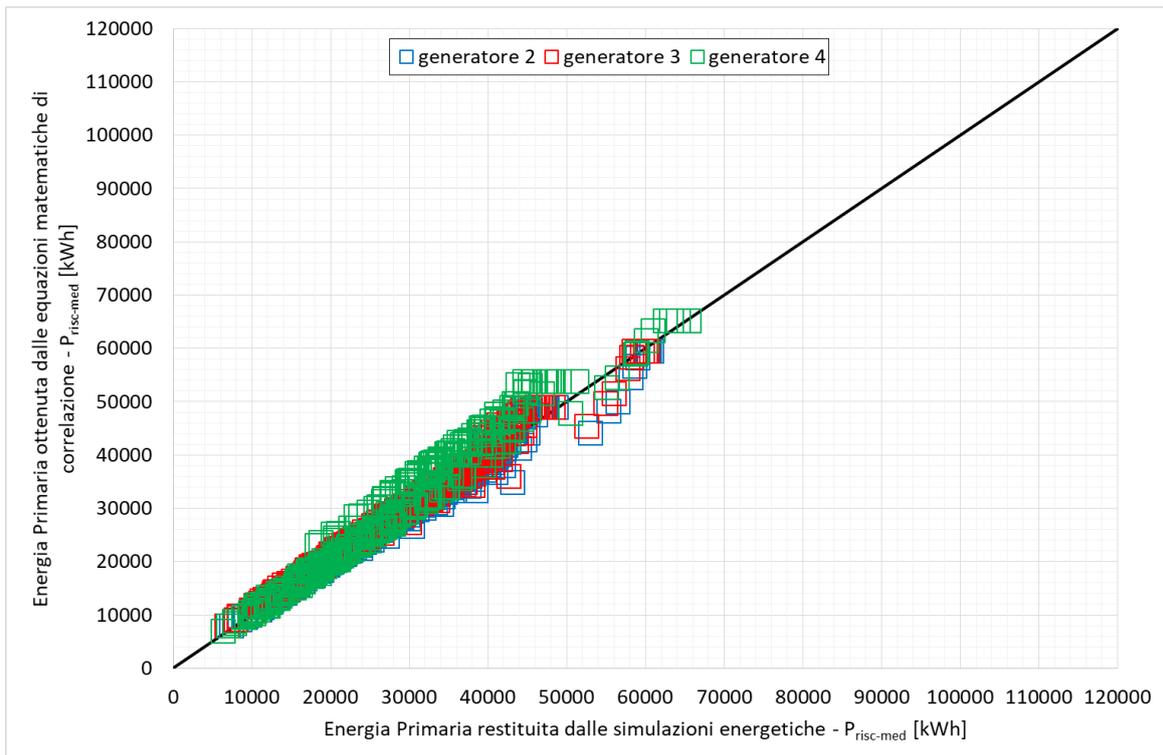


Figura 85 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dall’Equazione 12 con il profilo  $P_{risc-med}$  per i generatori di calore 2, 3 e 4 operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

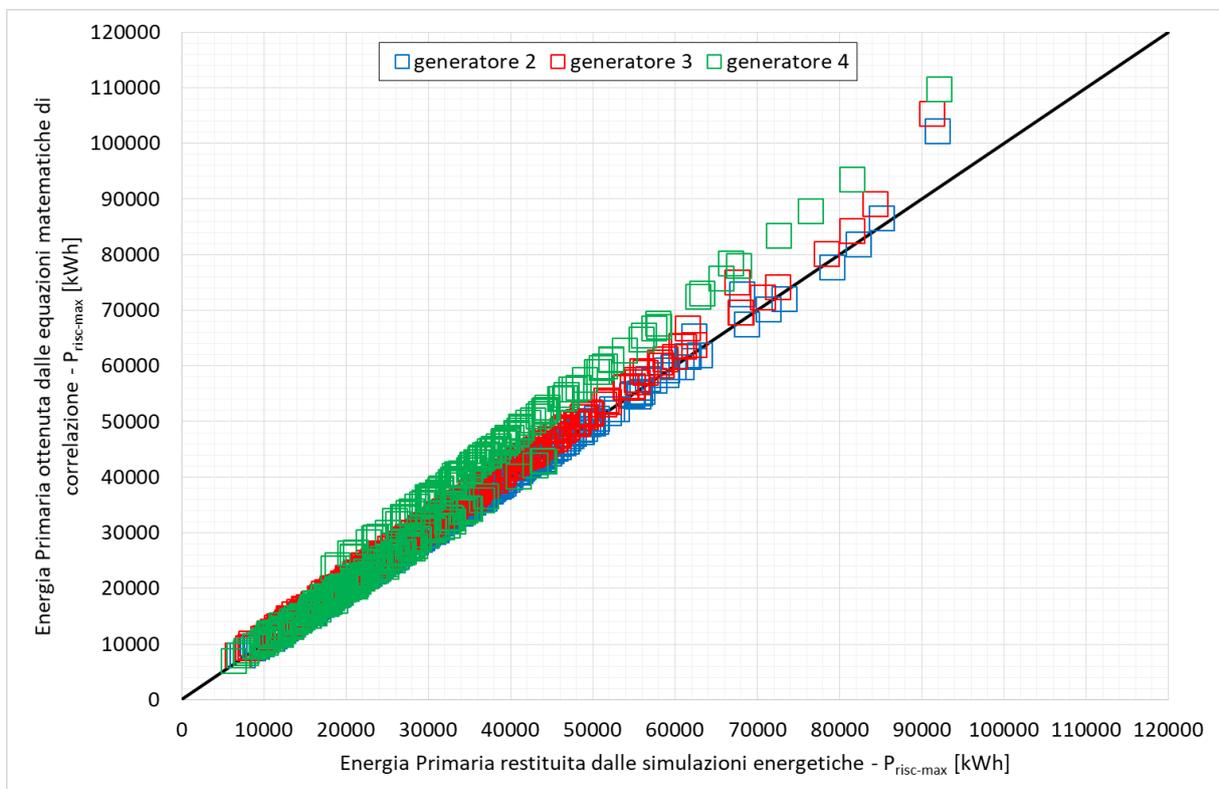


Figura 86 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dall’Equazione 12 con il profilo  $P_{risc-max}$  per i generatori di calore 2, 3 e 4 operanti ad alta temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

L'analisi è stata approfondita valutando l'effettiva incidenza dell'errore restituito dall'utilizzo dei quattro generatori per i tre profili di utilizzo tailored nelle diverse località di simulazione rispetto al valore ottenuto nelle rispettive simulazioni energetiche (Tabella 65).

Come evidenziato nell'analisi dell'asset rating, le relazioni valide per il generatore 1 non risultano essere attendibili per il generatore 4, dove gli scostamenti medi risultano essere superiori al 20% e tendono a crescere con l'aumentare del reale valore dell'energia primaria. I risultati per i generatori 2 e 3, invece, mostrano differenze accettabili, leggermente più elevate per pochi casi specifici che sono caratterizzati da valori di energia primaria maggiore perché legata ad un maggiore valore dei Gradi Giorno. Il maggiore discostamento con i risultati del generatore 1 si ottiene per il generatore 3, nello specifico caso di un numero di ore giornaliere di accensione dell'impianto maggiore di 8 h (quindi per il  $P_{risc-med}$  o  $P_{risc-max}$  in funzione della zona climatica).

Il confronto dei risultati ottenuti permette di confermare quanto atteso: le relazioni matematiche trovate per il generatore 1 possono essere quindi estese anche a generatori multistadio e modulanti (generatore 2 e 3) tenendo conto delle rispettive caratteristiche tecniche in termini di potenza e rendimento alla temperatura di esercizio; per il generatore 4, invece, è necessario identificare delle nuove relazioni matematiche.

Si tiene a precisare, che sebbene l'errore relativo ottenuto per il generatore 3 sia superiore a quello riscontrato per il generatore 1 (per il quale sono state desunte le equazioni) e per il generatore 2, esso raggiunge un valore medio di circa il 4% che può essere considerato comunque un errore accettabile.

Tabella 65 – Errore relativo (espresso in percentuale) restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-0.

Gradi Giorno	Generatore 1			Generatore 2			Generatore 3			Generatore 4		
	$P_{risc-min}$	$P_{risc-med}$	$P_{risc-max}$									
568	4.3	-0.2	-0.2	4.2	-0.7	-0.7	1.5	-5.2	-5.2	3.3	0.9	0.9
707	4.5	0.1	0.0	4.4	-0.5	-0.7	2.0	-4.3	-4.9	2.8	0.2	1.1
751	6.4	0.9	-0.2	6.6	0.7	-0.4	4.3	-3.3	-4.9	6.7	-0.7	0.3
990	5.8	-0.1	0.2	5.9	-0.1	0.2	3.7	-4.7	-5.0	8.3	-0.9	-0.1
1034	7.1	0.2	0.1	7.2	0.1	0.1	5.3	-4.0	-4.7	12.8	-0.1	-1.0
1142	7.2	0.5	0.1	7.2	0.6	0.1	5.8	-3.5	-4.7	13.6	0.2	0.5
1185	6.6	0.5	0.2	6.7	0.4	0.1	5.1	-3.1	-4.1	12.6	-0.2	-0.5
1317	8.0	1.4	0.0	8.2	1.3	-0.1	6.5	-2.6	-4.8	18.6	-0.5	-0.2
1415	5.4	0.1	0.2	5.7	0.4	0.5	4.2	-4.2	-4.6	9.4	-1.1	0.9
1435	5.8	0.1	-0.4	5.8	0.2	-0.3	4.3	-4.2	-5.1	11.0	1.0	1.5
1530	7.9	-0.3	0.1	8.3	-0.1	0.2	6.2	-4.2	-4.4	18.0	0.8	1.1
1688	8.0	0.0	0.3	8.5	-0.1	0.3	6.3	-3.8	-4.2	20.0	1.7	-0.1
1821	7.8	0.1	-0.1	7.9	-0.3	-0.5	6.1	-4.4	-5.0	16.6	-0.6	0.5
2102	1.9	0.1	-0.2	2.4	0.4	0.0	-1.0	-3.9	-4.9	3.3	0.8	1.3
2259	4.2	1.2	0.1	4.8	1.6	0.2	2.3	-2.0	-4.4	-11.7	-41.4	-55.9
2289	5.3	1.2	0.1	5.4	1.2	0.0	2.9	-2.6	-4.7	-11.5	-49.0	-54.7
2323	5.6	1.5	-0.3	6.0	1.6	-0.4	3.8	-1.8	-4.8	-6.7	-44.9	-57.7
2345	5.0	1.0	0.0	5.2	1.1	-0.1	2.8	-2.5	-4.8	-8.3	-43.8	-54.9
2404	4.3	0.6	-0.2	4.4	0.6	-0.2	1.9	-3.0	-4.8	-16.4	-51.4	-56.4
2472	4.6	0.7	0.0	4.7	0.7	0.0	2.1	-3.0	-4.6	-15.6	-52.5	-57.0
2514	6.0	1.7	0.0	6.3	2.0	0.0	3.9	-1.6	-4.6	-5.4	-43.2	-56.7
2617	6.2	2.0	-0.1	7.0	2.6	-0.2	4.7	-0.9	-4.5	-2.2	-35.5	-55.5
2791	6.1	2.1	0.4	6.4	2.3	0.4	4.2	-0.7	-3.9	-1.4	-30.6	-53.7
2850	7.5	3.9	0.1	7.8	4.1	0.2	5.7	1.3	-4.0	10.4	-17.2	-51.1
4264	6.8	6.8	0.0	6.9	6.9	0.1	4.4	4.4	-4.0	0.2	0.2	-46.8
media	5.9	1.4	0.0	6.1	1.5	0.0	3.9	-2.1	-4.5	1.4	-20.0	-31.8

### 2.5.2.2.2 Livello di isolamento Liv-Iso-1

I casi studio E1.i ed E1.t sono stati analizzati in tutte le loro configurazioni dimensionali al variare dei Gradi Giorno dei venticinque comuni di simulazione prescelti, considerando il livello di isolamento Liv-Iso-1 e al variare della tipologia di generatore di calore.

L'analisi è stata condotta come fatto per gli edifici identificati con Liv-Iso-0 e, per brevità di trattazione, i risultati ottenuti sono stati riportati in Tabella 66 in forma di errore relativo medio in percentuale.

Le equazioni di correlazione identificate per il generatore 1 approssimano bene il comportamento di tutti i generatori con errori relativi molto più bassi rispetto al caso precedente, in particolare per il generatore 4. Questo risultato potrebbe dipendere dal fatto che questa configurazione di edifici (Liv-Iso-1) presentano un consumo nettamente inferiore comportando una minor discrepanza tra i quattro generatori operanti ad alta temperatura.

Si è quindi deciso di estendere le equazioni trovate per gli edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1 anche alle altre tipologie di generatori di calore in quanto l'errore risulta essere comunque limitato tra lo 0% e il 5%.

Tabella 66 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-1.

Gradi Giorno	Generatore 1			Generatore 2			Generatore 3			Generatore 4		
	<i>P<sub>risc-min</sub></i>	<i>P<sub>risc-med</sub></i>	<i>P<sub>risc-max</sub></i>									
568	0.0	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	2.5	4.2	4.2
707	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.6	-0.7	-0.1	-0.6	-0.7	2.1	3.1	3.4
751	0.3	0.0	0.0	0.6	-0.2	-0.2	0.6	-0.2	-0.2	2.8	3.6	4.2
990	-0.4	-0.1	0.2	-0.3	-0.1	0.1	-0.3	-0.1	0.1	1.7	4.2	5.0
1034	-0.5	0.1	-0.2	-0.4	0.1	-0.3	-0.4	0.1	-0.3	1.4	4.0	4.3
1142	0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	1.6	4.1	4.4
1185	0.1	-0.3	-0.2	0.1	-0.4	-0.3	0.1	-0.4	-0.3	1.7	3.0	3.8
1317	0.3	-0.1	0.0	0.5	-0.2	-0.1	0.5	-0.2	-0.1	2.2	3.6	4.4
1415	0.4	0.0	0.0	0.8	0.3	0.3	0.8	0.3	0.3	2.2	4.7	5.1
1435	0.1	0.2	0.5	0.2	0.3	0.6	0.2	0.3	0.6	1.8	4.5	5.2
1530	0.2	-0.2	-0.3	0.7	0.0	-0.2	0.7	0.0	-0.2	2.8	4.0	4.1
1688	0.0	-0.2	0.2	0.5	-0.3	0.1	0.5	-0.3	0.1	2.6	3.3	4.4
1821	-0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.4	-0.2	0.1	-0.4	-0.2	1.9	3.5	4.1
2102	-0.1	-0.2	-0.2	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	3.7	4.1	4.6
2259	0.3	0.0	0.0	1.0	0.5	0.1	1.0	0.5	0.1	3.5	3.9	4.4
2289	-0.2	0.3	-0.1	-0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.3	-0.3	2.4	3.9	4.2
2323	0.0	-0.1	-0.5	0.5	0.1	-0.6	0.5	0.1	-0.6	2.7	3.4	3.7
2345	-0.3	0.6	0.2	-0.1	0.7	0.2	-0.1	0.7	0.2	2.3	4.2	4.6
2404	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	-0.3	-0.5	-0.3	2.1	3.0	4.0
2472	0.5	0.2	0.2	0.5	0.2	0.1	0.5	0.2	0.1	3.0	3.7	4.6
2514	-0.2	0.4	0.1	0.2	0.7	0.1	0.2	0.7	0.1	2.5	4.1	4.5
2617	0.1	0.1	0.7	0.9	0.7	0.6	0.9	0.7	0.6	3.3	4.1	4.8
2791	-0.2	0.1	-0.1	0.1	0.3	-0.1	0.1	0.3	-0.1	2.3	3.2	4.0
2850	-0.1	-0.2	0.1	0.2	0.0	0.2	0.2	0.0	0.2	2.3	2.8	4.2
4264	-0.2	-0.2	0.4	-0.1	-0.1	0.5	-0.1	-0.1	0.5	2.3	2.3	4.4
<i>media</i>	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	2.5	3.6	4.3

### 2.5.2.2.3 Livello di isolamento Liv-Iso-2

Si è proseguita l'analisi dei casi studio E1.i ed E1.t considerando il livello di isolamento Liv-Iso-2 sempre al variare delle loro configurazioni dimensionali, della località di simulazione e della tipologia di generatore di calore.

Anche in questo caso le equazioni di correlazione trovate a partire dal generatore 1 sono state applicate agli altri generatori di calore ottenendo degli errori relativi medi in percentuale (Tabella 67) sempre accettabili, con un range di errore analogo a quello ottenuto per edifici con Liv-Iso-1. L'errore più elevato è riscontrabile sempre per il generatore 4, ma risulta essere comunque limitato e accettabile, con una variazione tra il 2% e il 5% e con una media di circa il 3%.

In accordo con i risultati ottenuti, si è deciso di estendere le equazioni anche alle tipologie di generatori di calore 2, 3 e 4.

In considerazione del buon livello di isolamento (circa di 10 cm) che caratterizza queste configurazioni di casi studio, è stata analizzata un'ulteriore combinazione impiantistica rappresentata dal generatore di calore a condensazione operante a bassa temperatura, avente cioè i pannelli radianti come terminali di emissione. Questa non era stata presa in considerazione prima perché poco credibile con livelli di isolamento più bassi.

Tabella 67 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-2.

Gradi Giorno	Generatore 1			Generatore 2			Generatore 3			Generatore 4		
	Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max									
568	-0.1	-0.3	-0.3	0.0	-0.6	-0.6	0.0	-0.6	-0.6	2.3	3.7	3.7
707	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.6	-0.4	0.2	-0.6	-0.4	2.1	2.9	3.6
751	-0.2	0.1	0.0	0.3	0.0	-0.2	0.3	0.0	-0.2	2.1	3.5	4.0
990	0.4	0.1	-0.4	0.5	0.1	-0.5	0.5	0.1	-0.5	2.5	4.4	4.4
1034	-0.2	-0.2	0.5	-0.2	-0.2	0.4	-0.2	-0.2	0.4	1.6	3.7	4.9
1142	0.0	-0.3	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	-0.3	0.0	1.4	3.6	4.6
1185	0.3	0.0	-0.2	0.4	-0.1	-0.3	0.4	-0.1	-0.3	1.8	3.2	3.7
1317	-0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	1.7	3.7	4.6
1415	0.2	-0.3	0.3	0.5	0.0	0.6	0.5	0.0	0.6	2.0	4.4	5.4
1435	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	1.5	4.2	4.5
1530	0.2	0.1	-0.3	0.7	0.4	-0.2	0.7	0.4	-0.2	2.8	4.3	4.1
1688	-0.4	-0.2	0.0	0.2	-0.3	0.0	0.2	-0.3	0.0	2.3	3.3	4.3
1821	-0.2	-0.3	0.2	0.0	-0.5	-0.2	0.0	-0.5	-0.2	1.9	3.4	4.1
2102	0.1	-0.3	0.4	0.7	0.0	0.5	0.7	0.0	0.5	3.9	4.1	5.2
2259	0.2	0.3	0.2	0.9	0.7	0.3	0.9	0.7	0.3	3.5	4.2	4.6
2289	0.1	-0.4	-0.4	0.2	-0.4	-0.5	0.2	-0.4	-0.5	2.7	3.2	4.0
2323	0.4	0.1	0.1	0.8	0.3	0.0	0.8	0.3	0.0	3.0	3.6	4.2
2345	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	2.2	3.5	4.3
2404	-0.3	-0.1	0.1	-0.2	0.0	0.1	-0.2	0.0	0.1	2.3	3.5	4.4
2472	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.3	-0.2	-0.1	-0.3	-0.2	2.3	3.3	4.2
2514	0.1	0.1	-0.3	0.5	0.3	-0.2	0.5	0.3	-0.2	2.8	3.7	4.1
2617	-0.3	0.3	-0.1	0.6	1.0	-0.1	0.6	1.0	-0.1	2.9	4.3	4.1
2791	0.1	0.0	-0.5	0.4	0.2	-0.5	0.4	0.2	-0.5	2.6	3.1	3.6
2850	0.3	0.3	0.3	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	2.7	3.3	4.4
4264	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	2.4	3.9
media	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	-0.1	0.3	0.1	-0.1	2.5	3.5	4.2

I risultati, espressi come errore relativo medio in percentuale (Tabella 68), non restituiscono delle approssimazioni accettabili, con discrepanze anche del 20-30%. Per il generatore a condensazione operante a bassa temperatura, quindi, sarà necessario estrapolare delle nuove relazioni matematiche.

Tabella 68 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per il caso di un generatore a condensazione operante a bassa temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-2.

Gradi Giorno	Generatore a condensazione operante a bassa temperatura		
	<i>Prisc-min</i>	<i>Prisc-med</i>	<i>Prisc-max</i>
568	1.6	-11.8	-11.8
707	-5.1	-19.1	-22.9
751	-5.3	-21.0	-27.4
990	-4.3	-22.6	-27.9
1034	-1.6	-19.1	-22.8
1142	-6.2	-24.1	-29.2
1185	-3.1	-19.4	-24.8
1317	-5.4	-18.4	-24.6
1415	2.4	-17.4	-20.9
1435	-4.2	-26.1	-30.9
1530	-5.8	-19.0	-23.1
1688	-4.9	-19.4	-21.1
1821	-9.5	-25.5	-29.7
2102	-14.2	-22.5	-27.7
2259	3.6	1.8	-2.3
2289	6.0	1.9	-3.5
2323	4.0	1.3	-3.4
2345	2.9	0.2	-4.0
2404	7.1	3.4	-2.1
2472	8.2	3.5	-1.2
2514	4.9	2.5	-2.3
2617	2.0	2.0	-1.7
2791	5.3	2.8	-1.2
2850	1.9	1.5	0.2
4264	2.6	2.6	1.6
<i>media</i>	1.1	-5.4	-9.2

#### 2.5.2.2.4 Livello di isolamento Liv-Iso-3

L'ultima casistica indagata per le configurazioni dei casi studio E1.i ed E1.t presenta un livello di isolamento Liv-Iso-3, ovvero sono edifici di nuova costruzione.

I risultati delle verifiche delle equazioni di correlazione, estese a tutte le tipologie di generatore, sono riportati in Tabella 69 espressi come errore relativo medio in percentuale. Anche in questo caso, l'esito delle verifiche è stato considerato positivo, con le discrepanze più elevate, ma sempre accettabili, per il generatore 4 (tra il 2% e il 5%, con un errore medio di circa il 3%).

Tabella 69 – Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per i quattro generatori di calore: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-3.

Gradi Giorno	Generatore 1			Generatore 2			Generatore 3			Generatore 4		
	<i>P</i> <sub>isc-min</sub>	<i>P</i> <sub>isc-med</sub>	<i>P</i> <sub>isc-max</sub>	<i>P</i> <sub>isc-min</sub>	<i>P</i> <sub>isc-med</sub>	<i>P</i> <sub>isc-max</sub>	<i>P</i> <sub>isc-min</sub>	<i>P</i> <sub>isc-med</sub>	<i>P</i> <sub>isc-max</sub>	<i>P</i> <sub>isc-min</sub>	<i>P</i> <sub>isc-med</sub>	<i>P</i> <sub>isc-max</sub>
568	-0.1	0.0	0.0	0.2	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	2.1	3.8	3.8
707	0.2	-0.1	-0.2	0.2	-0.5	-0.7	0.2	-0.5	-0.7	2.1	3.2	3.4
751	-0.1	-0.1	-0.1	0.5	-0.2	-0.2	0.5	-0.2	-0.2	2.4	3.4	4.0
990	-0.2	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.1	1.8	4.2	4.8
1034	0.3	-0.3	-0.1	0.4	-0.4	-0.2	0.4	-0.4	-0.2	2.0	3.5	4.3
1142	-0.2	-0.3	0.3	-0.2	-0.3	0.3	-0.2	-0.3	0.3	1.2	3.7	4.9
1185	0.4	0.0	0.1	0.5	-0.1	0.1	0.5	-0.1	0.1	2.0	3.2	4.1
1317	-0.1	0.0	0.0	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	1.8	3.7	4.4
1415	0.0	-0.3	-0.5	0.4	0.0	-0.2	0.4	0.0	-0.2	1.9	4.5	4.7
1435	-0.3	0.1	0.1	-0.3	0.2	0.2	-0.3	0.2	0.2	1.3	4.4	4.8
1530	0.0	0.2	0.1	0.5	0.4	0.2	0.5	0.4	0.2	2.6	4.4	4.5
1688	0.1	-0.2	0.3	0.6	-0.2	0.2	0.6	-0.2	0.2	2.7	3.4	4.5
1821	0.0	0.1	0.3	0.2	-0.3	-0.1	0.2	-0.3	-0.1	2.1	3.6	4.2
2102	0.0	0.1	0.4	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4	0.6	3.8	4.5	5.2
2259	0.2	-0.2	0.0	0.9	0.3	0.1	0.9	0.3	0.1	3.4	3.8	4.4
2289	0.1	0.1	-0.1	0.2	0.0	-0.2	0.2	0.0	-0.2	2.7	3.6	4.3
2323	-0.1	0.1	-0.1	0.4	0.3	-0.2	0.4	0.3	-0.2	2.6	3.5	4.0
2345	0.4	0.1	-0.1	0.6	0.2	-0.1	0.6	0.2	-0.1	2.9	3.7	4.3
2404	0.1	-0.2	0.3	0.3	-0.2	0.3	0.3	-0.2	0.3	2.7	3.3	4.7
2472	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	2.6	3.7	4.4
2514	-0.1	0.0	-0.1	0.3	0.3	-0.1	0.3	0.3	-0.1	2.6	3.7	4.3
2617	-0.2	-0.1	-0.1	0.7	0.5	-0.1	0.7	0.5	-0.1	3.1	3.9	4.0
2791	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	0.3	-0.1	-0.1	0.3	-0.1	2.1	3.2	3.9
2850	-0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	2.3	3.0	4.2
4264	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	2.6	2.6	4.0
<i>media</i>	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.3	0.1	0.0	2.5	3.5	4.3

Anche per gli edifici di nuova costruzione è stato considerato realistico l'utilizzo di generatori di calore a condensazione operanti a bassa temperatura, aventi cioè pannelli radianti come terminali di emissione. I risultati ottenuti (Tabella 70) confermano che le equazioni di correlazione trovate per il generatore 1 non permettano di approssimare correttamente il generatore a condensazione operante a bassa temperatura, per il quale si sono ottenute discrepanze anche del 15-20%. Anche per gli edifici identificati con Liv-Iso-3 sarà quindi necessario estrapolare delle nuove relazioni matematiche.

Tabella 70 - Errore relativo restituito dalle relazioni matematiche per il caso di un generatore a condensazione operante a bassa temperatura: casi studio E1.i ed E1.t con livello di isolamento Liv-Iso-3.

Gradi Giorno	Generatore a condensazione operante a bassa temperatura		
	$P_{risc-min}$	$P_{risc-med}$	$P_{risc-max}$
568	16.0	4.2	4.2
707	5.8	-7.3	-11.6
751	14.2	0.1	-5.9
990	17.8	2.5	-2.3
1034	19.7	4.0	-0.5
1142	17.3	2.2	-2.7
1185	17.4	3.2	-1.7
1317	13.5	2.0	-4.1
1415	21.5	4.2	-0.5
1435	17.9	-1.0	-5.9
1530	8.2	-4.0	-7.7
1688	10.2	-3.7	-5.5
1821	8.6	-5.9	-10.3
2102	3.6	-3.5	-9.4
2259	16.9	14.7	10.7
2289	18.9	15.3	9.9
2323	18.7	16.4	11.7
2345	16.6	13.6	9.1
2404	23.2	19.2	14.2
2472	21.7	17.4	12.6
2514	20.8	18.5	14.0
2617	16.2	15.4	12.0
2791	18.8	16.8	13.1
2850	13.4	13.0	11.4
4264	13.4	13.4	12.2
media	16.1	10.2	6.4

### 2.5.2.3 Categoria E.1 e impianto autonomo con generatore di calore a condensazione

In accordo con le analisi di comparazione delle equazioni ottenute per il generatore 1 (2.5.2.2), è emersa la necessità di estrapolare nuove relazioni matematiche per le configurazioni dei casi studio E1.i ed E1.t nelle seguenti casistiche:

- 1) generatore a condensazione operante ad alta temperatura (generatore 4) e livello di isolamento Liv-Iso-0 del fabbricato;
- 2) generatore a condensazione operante a bassa temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-2 del fabbricato;
- 3) generatore a condensazione operante a bassa temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-3 del fabbricato.

I risultati del procedimento di analisi descritto al paragrafo 2.5.2 non sono stati mostrati nella loro interezza, in quanto i trend ottenuti sono del tutto analoghi al caso discusso al paragrafo 2.5.2.1.2.

#### 2.5.2.3.1 Generatore a condensazione ad alta temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-0

Le valutazioni sulle configurazioni dei casi studio con generatore 4 e livello di isolamento Liv-Iso-0 sono state basate sul procedimento descritto in 2.5.2. In un primo momento sono stati confrontati i valori di energia primaria calcolata con l'asset rating e quelli ottenuti con i tre profili tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ) per tutte le località di simulazione e per le due macro-tipologie costruttive  $E_M$  (muratura) e  $E_{CA}$  (cemento armato). Sulla base dei trend ottenuti, sono stati determinati gli Indicatori Energetici Normalizzati  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$ ,

IEN<sub>max</sub>. I grafici relativi ai trend dei tre IEN rispetto ai Gradi Giorno per E<sub>M</sub> e per E<sub>CA</sub> sono mostrati rispettivamente in Figura 87 e in Figura 88.

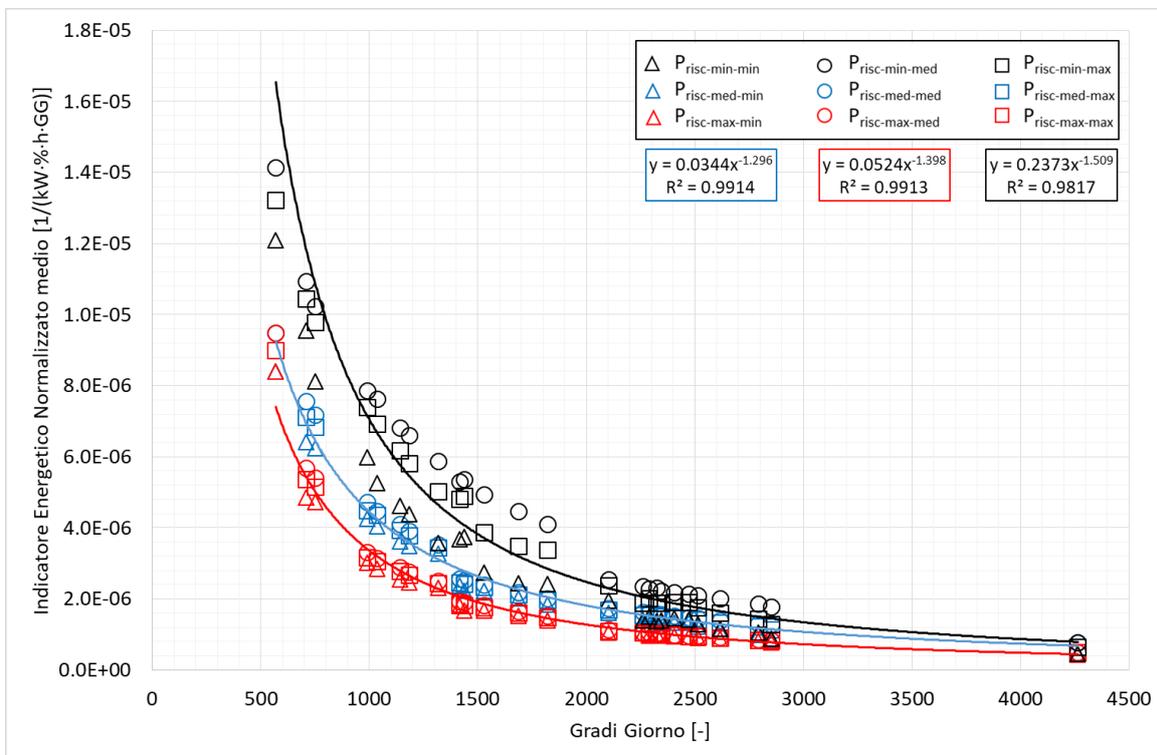


Figura 87 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in muratura portante con livello di isolamento Liv-Iso-0.

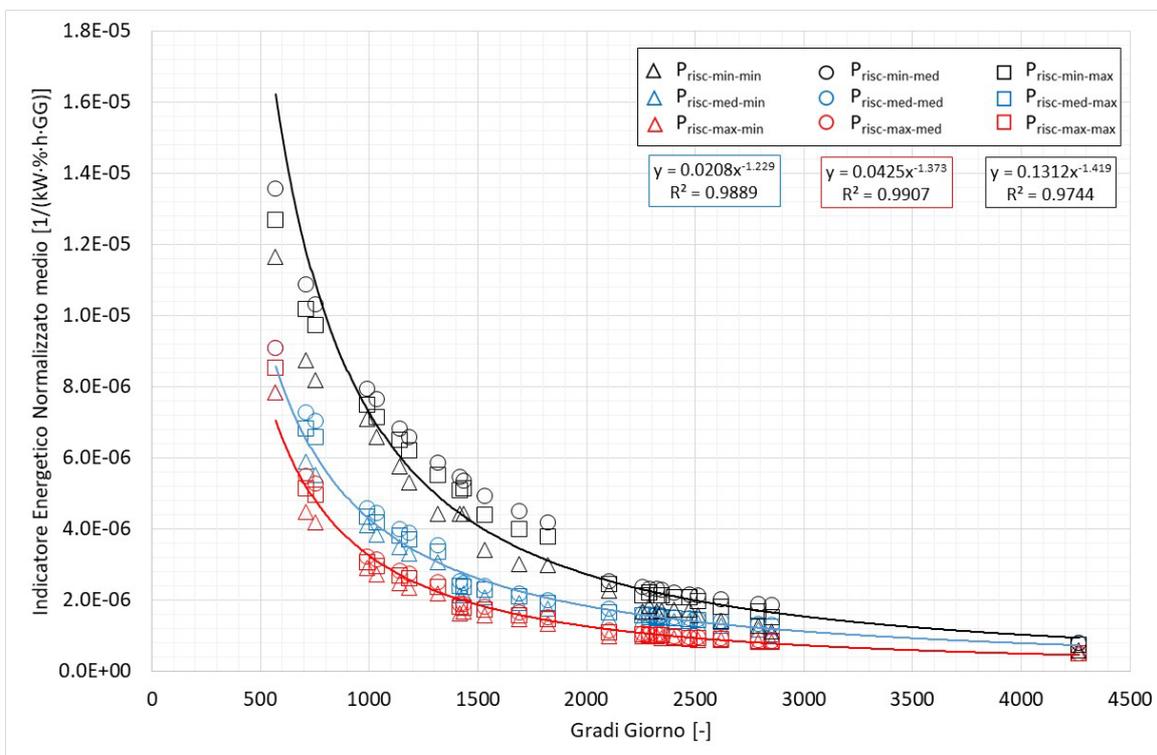


Figura 88 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici in cemento armato con livello di isolamento Liv-Iso-0.

Anche in questo caso, i trend di  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{max}$  sono descritti da una famiglia di tre equazioni che lega l'asset rating con quello tailored. Queste equazioni possono essere espresse attraverso l'Equazione 12, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11, in cui il pedice  $x$  rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore, calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  (Tabella 71) che variano in funzione della tipologia costruttiva considerata.

Una volta trovate le relazioni matematiche di correlazione, sono stati definiti i coefficienti correttivi moltiplicativi delle equazioni per  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{min}$  ed  $IEN_{max}$  con lo scopo di determinare un indicatore energetico normalizzato medio pesato che differisca il meno possibile da quello simulato in ogni caso studio. I coefficienti correttivi sono stati desunti a partire dai valori ricavati dalle tre equazioni, per ogni profilo di utilizzo tailored considerato ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$ ,  $P_{risc-max}$ ), e sono riportati in Tabella 72 per  $E_M$  e in Tabella 73 per  $E_{CA}$ .

Tabella 71 – Coefficienti  $a$  e  $b$  in funzione della tipologia costruttiva e del valore ricercato.

Valore Indicatore Normalizzato	Tipologia costruttiva				Codice identificativo
	Muratura portante		Cemento armato		
	$a$	$b$	$a$	$b$	
<i>minimo</i>	0.2373	-1.509	0.0131	-1.419	$IEN_{min}$
<i>medio</i>	0.0344	-1.296	0.0208	-1.229	$IEN_{med}$
<i>massimo</i>	0.0524	-1.398	0.0425	-1.373	$IEN_{max}$

Tabella 72 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in muratura ( $E_M$ ) con livello di isolamento Liv-Iso-0.

Gradi Giorno	$P_{risc-min}$			$P_{risc-med}$			$P_{risc-max}$		
	$IEN_{min}$	$IEN_{med}$	$IEN_{max}$	$IEN_{min}$	$IEN_{med}$	$IEN_{max}$	$IEN_{min}$	$IEN_{med}$	$IEN_{max}$
568	0.52	0.30	0.18	0.01	0.98	0.01	0.01	0.98	0.01
707	0.73	0.00	0.27	0.12	0.79	0.12	0.00	0.07	0.00
751	0.67	0.00	0.33	0.18	0.62	0.18	0.00	0.19	0.00
990	0.86	0.00	0.14	0.07	0.83	0.07	0.00	0.00	0.00
1034	0.83	0.00	0.17	0.10	0.78	0.10	0.00	0.00	0.00
1142	0.87	0.00	0.13	0.10	0.90	0.10	0.00	0.03	0.00
1185	0.85	0.00	0.15	0.13	0.82	0.13	0.01	0.03	0.01
1317	0.83	0.01	0.16	0.19	0.78	0.19	0.00	0.21	0.00
1415	0.95	0.04	0.01	0.11	0.25	0.11	0.00	0.00	0.00
1435	1.03	0.00	0.00	0.13	0.21	0.13	0.00	0.00	0.00
1530	0.78	0.00	0.22	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
1688	0.78	0.12	0.10	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
1821	0.98	0.00	0.02	0.00	0.82	0.00	0.00	0.08	0.00
2102	0.80	0.09	0.11	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00
2259	0.60	0.08	0.32	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00
2289	0.60	0.35	0.05	0.06	0.83	0.06	0.00	0.00	0.00
2323	0.69	0.00	0.31	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00
2345	0.70	0.05	0.25	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00
2404	0.74	0.10	0.16	0.05	0.88	0.05	0.00	0.00	0.00
2472	0.80	0.10	0.10	0.10	0.84	0.10	0.00	0.02	0.00
2514	0.70	0.14	0.16	0.10	0.78	0.10	0.00	0.04	0.00
2617	0.65	0.12	0.23	0.10	0.74	0.10	0.00	0.07	0.00
2791	0.58	0.18	0.24	0.00	0.89	0.00	0.00	0.12	0.00
2850	0.37	0.41	0.22	0.00	0.82	0.00	0.00	0.12	0.00
4264	0.00	0.69	0.31	0.00	0.69	0.00	0.00	0.15	0.00

Tabella 73 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici in cemento armato ( $E_{CA}$ ) con livello di isolamento Liv-Iso-0.

Gradi Giorno	$P_{risc-min}$			$P_{risc-med}$			$P_{risc-max}$		
	$IEN_{min}$	$IEN_{med}$	$IEN_{max}$	$IEN_{min}$	$IEN_{med}$	$IEN_{max}$	$IEN_{min}$	$IEN_{med}$	$IEN_{max}$
568	0.60	0.20	0.20	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
707	0.76	0.00	0.24	0.10	0.77	0.10	0.00	0.00	0.00
751	0.82	0.00	0.18	0.25	0.60	0.25	0.00	0.15	0.00
990	1.01	0.00	0.00	0.05	0.85	0.05	0.00	0.00	0.00
1034	1.03	0.00	0.00	0.10	0.73	0.10	0.00	0.00	0.00
1142	1.08	0.00	0.00	0.08	0.92	0.08	0.00	0.01	0.00
1185	1.08	0.00	0.00	0.14	0.77	0.14	0.00	0.05	0.00
1317	1.11	0.00	0.00	0.17	0.83	0.17	0.00	0.00	0.00
1415	1.14	0.00	0.00	0.10	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00
1435	1.17	0.00	0.00	0.10	0.22	0.10	0.00	0.00	0.00
1530	1.09	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00
1688	1.13	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00
1821	1.20	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.05	0.00
2102	0.90	0.08	0.02	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
2259	0.76	0.16	0.08	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
2289	0.91	0.09	0.00	0.05	0.91	0.05	0.00	0.00	0.00
2323	0.92	0.00	0.08	0.04	0.96	0.04	0.00	0.00	0.00
2345	0.89	0.11	0.00	0.04	0.96	0.04	0.00	0.00	0.00
2404	0.94	0.06	0.00	0.05	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00
2472	1.02	0.00	0.00	0.08	0.92	0.08	0.00	0.01	0.00
2514	0.93	0.07	0.00	0.08	0.92	0.08	0.00	0.03	0.00
2617	0.85	0.15	0.00	0.10	0.90	0.10	0.00	0.07	0.00
2791	0.84	0.16	0.00	0.12	0.88	0.12	0.00	0.13	0.00
2850	0.65	0.35	0.00	0.09	0.91	0.09	0.00	0.15	0.00
4264	0.00	0.98	0.02	0.00	0.98	0.00	0.00	0.18	0.00

Come per le casistiche analizzate in precedenza e in ottica di semplificazione, si è inoltre verificata la possibilità di utilizzare una sola delle due famiglie di equazioni trovate per entrambe le macro-tipologie costruttive  $E_M$  e  $E_{CA}$ .

I valori di  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{min}$  ed  $IEN_{max}$  sono stati ricalcolati per tutti i casi studio con livello di isolamento Liv-Iso-0 e tipologia costruttiva sia  $E_M$  che  $E_{CA}$  per tutte le località di simulazione applicando entrambe le famiglie di equazioni per  $E_M$  e  $E_{CA}$ .

I valori ricavati sono stati confrontati calcolando un errore relativo medio (Tabella 74) rispetto ai valori restituiti dalla simulazioni energetiche, evidenziando le stesse percentuali di errore osservate per il caso studio con generatore 1 e Liv-Iso-0.

Tabella 74 – Errore relativo medio (valori in percentuale) restituito dalle due famiglie delle equazioni trovate (Eq. E<sub>M</sub> e Eq. E<sub>CA</sub>) per generatori di calore a condensazione operanti ad alta temperatura (E<sub>M</sub> e E<sub>CA</sub>).

Gradi Giorno	<i>P<sub>risc-min</sub></i>				<i>P<sub>risc-med</sub></i>				<i>P<sub>risc-max</sub></i>			
	Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>		Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>		Eq. E <sub>M</sub>		Eq. E <sub>CA</sub>	
	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>	E <sub>M</sub>	E <sub>CA</sub>
568	0.66	4.39	3.29	1.38	0.45	6.26	4.65	0.87	0.45	6.26	4.65	0.87
707	0.37	3.27	2.12	1.30	0.83	5.23	2.74	1.51	0.50	4.72	2.78	1.31
751	2.03	0.41	1.52	1.04	1.06	5.39	3.11	1.04	0.70	4.87	3.08	0.94
990	2.84	2.26	1.37	0.57	0.96	4.32	2.42	0.83	0.65	3.82	2.47	0.61
1034	4.41	4.83	1.49	0.84	0.58	4.73	2.66	0.86	0.85	4.82	3.19	0.62
1142	4.66	6.69	0.62	0.81	0.65	4.26	1.77	0.50	0.52	3.95	2.87	0.79
1185	4.48	8.00	0.32	1.32	0.62	3.57	1.39	0.64	0.75	3.67	2.12	0.51
1317	6.55	11.65	1.23	2.68	0.42	3.52	1.74	0.73	0.54	4.05	2.69	0.70
1415	3.66	7.29	1.58	0.96	0.94	5.04	2.55	1.40	0.22	4.11	3.02	0.75
1435	3.91	6.65	0.41	1.27	0.39	3.02	1.90	0.67	0.18	2.65	1.98	0.44
1530	6.56	14.66	0.25	3.55	0.14	2.32	1.75	0.39	0.15	2.54	1.89	0.44
1688	7.07	15.90	0.65	4.73	0.30	1.44	1.89	0.47	0.44	2.45	1.65	0.30
1821	6.00	13.19	0.12	3.22	0.64	3.20	1.93	0.57	0.31	2.84	1.82	0.66
2102	1.56	3.70	2.20	0.36	0.09	2.43	1.54	0.75	0.01	2.37	2.12	0.19
2259	4.04	12.11	3.42	2.26	1.11	3.17	1.32	0.21	0.00	1.63	1.01	0.60
2289	4.36	10.86	2.15	2.08	0.41	0.12	0.41	0.21	0.02	1.66	1.03	0.63
2323	4.90	13.49	2.59	2.60	1.25	1.63	0.35	0.13	0.06	1.75	1.43	0.24
2345	4.39	12.56	3.71	1.77	0.86	1.25	1.14	0.50	0.26	2.04	1.24	0.52
2404	3.46	9.94	2.73	1.85	0.17	0.17	0.60	0.60	0.14	1.93	1.85	0.09
2472	3.93	9.80	2.60	1.43	0.31	0.48	0.11	0.90	0.03	1.90	1.47	0.38
2514	5.42	12.75	1.17	3.09	1.29	1.31	0.21	0.34	0.32	2.23	1.66	0.21
2617	5.46	14.03	1.34	3.60	1.82	3.94	1.85	0.04	0.25	1.57	1.24	0.06
2791	5.53	14.87	1.84	3.63	2.21	6.22	3.08	0.36	0.03	0.80	0.53	0.30
2850	7.13	17.78	0.56	5.44	3.75	9.63	2.57	1.75	0.33	0.23	0.33	0.23
4264	7.11	14.36	0.28	4.35	6.54	13.82	0.29	3.66	0.88	1.77	0.84	0.07
media	0.66	4.39	3.29	1.38	0.45	6.26	4.65	0.87	0.45	6.26	4.65	0.87

In accordo con i risultati ottenuti e in ottica di semplificazione, si è quindi deciso di fare riferimento ai coefficienti correttivi trovati per gli edifici E<sub>CA</sub> in quanto la famiglia di equazioni che si è ottenuta permette di approssimare anche i risultati della casistica in E<sub>M</sub> commettendo un errore relativo medio del circa 2%, che tende a crescere con il diminuire delle ore di accensione dell'impianto e con l'aumentare dei Gradi Giorno. Pertanto, per la valutazione dell'energia primaria di tutte le configurazioni del caso studio E1.i con livello di isolamento Liv-Iso-0 si farà riferimento alle equazioni riportate in Figura 88 e ai coefficienti correttivi mostrati in Tabella 73.

#### 2.5.2.3.2 Generatori a condensazione a bassa temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-2

La seconda casistica analizzata dei generatori a condensazione riguarda gli impianti operanti a bassa temperatura, dotati cioè di pannelli radianti come terminali di emissione, relativamente ai casi studio con livello di isolamento Liv-Iso-2.

A seguito del confronto dei valori di energia primaria calcolata con l'asset rating e quelli ottenuti con i tre profili tailored (*P<sub>risc-min</sub>*, *P<sub>risc-med</sub>* e *P<sub>risc-max</sub>*) per tutte le località di simulazione e per le due macro-tipologie costruttive E<sub>M</sub> e E<sub>CA</sub>, sono stati determinati gli Indicatori Energetici Normalizzati IEN<sub>min</sub>, IEN<sub>med</sub> e IEN<sub>max</sub>.

Come già descritto in 2.5.2.1.2, la differenza tra i valori di energia primaria associati agli edifici E<sub>M</sub> e quelli E<sub>CA</sub> è minima; si è deciso di fare riferimento a un valore medio delle due tipologie per la determinazione delle

equazioni di correlazione. Per brevità di trattazione, si riportano solo i grafici relativi ai trend dei tre IEN rispetto ai Gradi Giorno (Figura 89).

I trend di  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{max}$  sono descritti da una famiglia di tre equazioni che lega il profilo asset con quello tailored. Queste equazioni possono essere espresse attraverso l'Equazione 12, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11 in cui il pedice  $x$  rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore, calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  (Tabella 75 Tabella 75) che variano in funzione del valore ricercato.

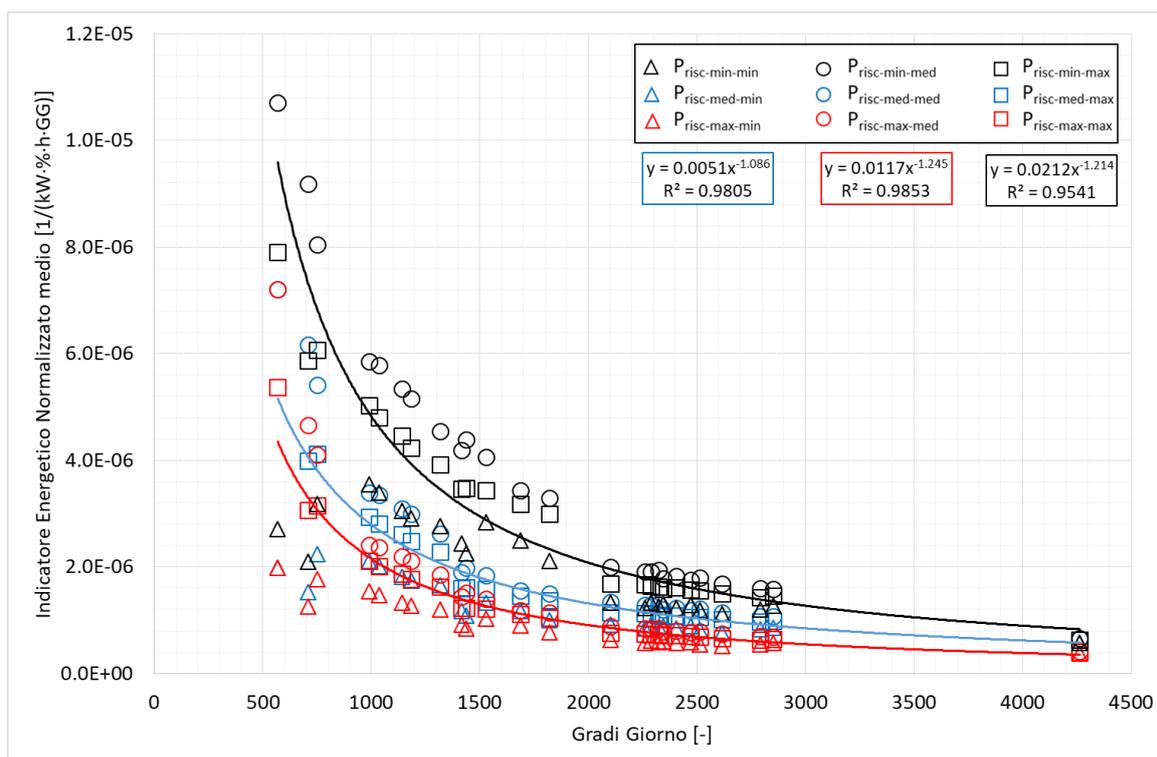


Figura 89 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici con livello di isolamento Liv-Iso-02.

Tabella 75 – Coefficienti  $a$  e  $b$  in funzione del valore ricercato

Valore Indicatore Normalizzato	Livello di isolamento Liv-Iso-2		Codice identificativo
	$a$	$b$	
<i>minimo</i>	0.0212	-1.214	$IEN_{min}$
<i>medio</i>	0.0051	-1.086	$IEN_{med}$
<i>massimo</i>	0.0117	-1.245	$IEN_{max}$

L'analisi è proseguita identificando il valore dei coefficienti correttivi con cui moltiplicare i risultati delle equazioni per  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$  e approssimarle il più possibile ai risultati delle simulazioni per ogni località (Tabella 76).

Infine, i valori di  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$  ricavati dalle equazioni cui sono stati applicati i coefficienti correttivi, sono stati oggetto di verifica con gli indicatori ottenuti dalle simulazioni energetiche per le stesse combinazioni di caso studio. La verifica ha dato esito positivo (Figura 90) con un errore relativo medio del 5%. Si precisa che l'errore relativo riscontrato tende a crescere con il diminuire dell'energia primaria fino a un valore massimo del 10-15% restituito per i valori minori dei Gradi Giorno, mentre tende a decrescere fino all'1-2% per valori crescenti dei Gradi Giorno e dell'energia primaria. Questo errore non determina una significativa variazione dell'energia primaria degli edifici, pertanto è stato considerato accettabile.

Tabella 76 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici con livello di isolamento Liv-Iso-2.

<b>Gradi Giorno</b>	<b><i>P<sub>risc-min</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-med</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-max</sub></i></b>		
	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>
568	0.73	0.27	0.00	0.12	0.88	0.00	0.12	0.88	0.00
707	0.78	0.03	0.19	0.10	0.90	0.00	0.00	0.05	0.95
751	0.85	0.00	0.15	0.20	0.55	0.25	0.00	0.22	0.78
990	1.05	0.00	0.00	0.10	0.82	0.08	0.00	0.00	0.99
1034	1.06	0.00	0.00	0.10	0.84	0.06	0.00	0.00	1.00
1142	1.11	0.00	0.00	0.14	0.85	0.01	0.00	0.12	0.88
1185	1.10	0.00	0.00	0.14	0.80	0.06	0.00	0.10	0.90
1317	1.16	0.00	0.00	0.18	0.82	0.00	0.00	0.25	0.75
1415	1.12	0.00	0.00	0.00	0.43	0.57	0.00	0.00	0.89
1435	1.15	0.00	0.00	0.10	0.20	0.70	0.00	0.00	0.92
1530	1.21	0.00	0.00	0.00	0.66	0.34	0.00	0.00	0.97
1688	1.26	0.00	0.00	0.00	0.75	0.25	0.00	0.01	0.99
1821	1.30	0.00	0.00	0.00	0.82	0.18	0.00	0.10	0.90
2102	0.75	0.10	0.15	0.00	0.78	0.22	0.00	0.00	0.91
2259	0.85	0.15	0.00	0.00	0.97	0.03	0.00	0.00	0.97
2289	0.85	0.15	0.00	0.00	0.95	0.05	0.00	0.00	0.97
2323	0.90	0.05	0.05	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.98
2345	0.85	0.10	0.05	0.00	0.93	0.07	0.00	0.00	0.96
2404	0.94	0.06	0.00	0.05	0.95	0.00	0.00	0.02	0.98
2472	0.95	0.05	0.00	0.10	0.80	0.10	0.00	0.02	0.98
2514	1.00	0.00	0.00	0.08	0.91	0.01	0.00	0.05	0.95
2617	1.01	0.00	0.00	0.08	0.92	0.00	0.00	0.08	0.92
2791	1.04	0.00	0.00	0.12	0.88	0.00	0.00	0.13	0.87
2850	1.09	0.00	0.00	0.10	0.95	0.00	0.00	0.20	0.80
4264	0.19	0.81	0.00	0.19	0.81	0.00	0.00	0.20	0.80

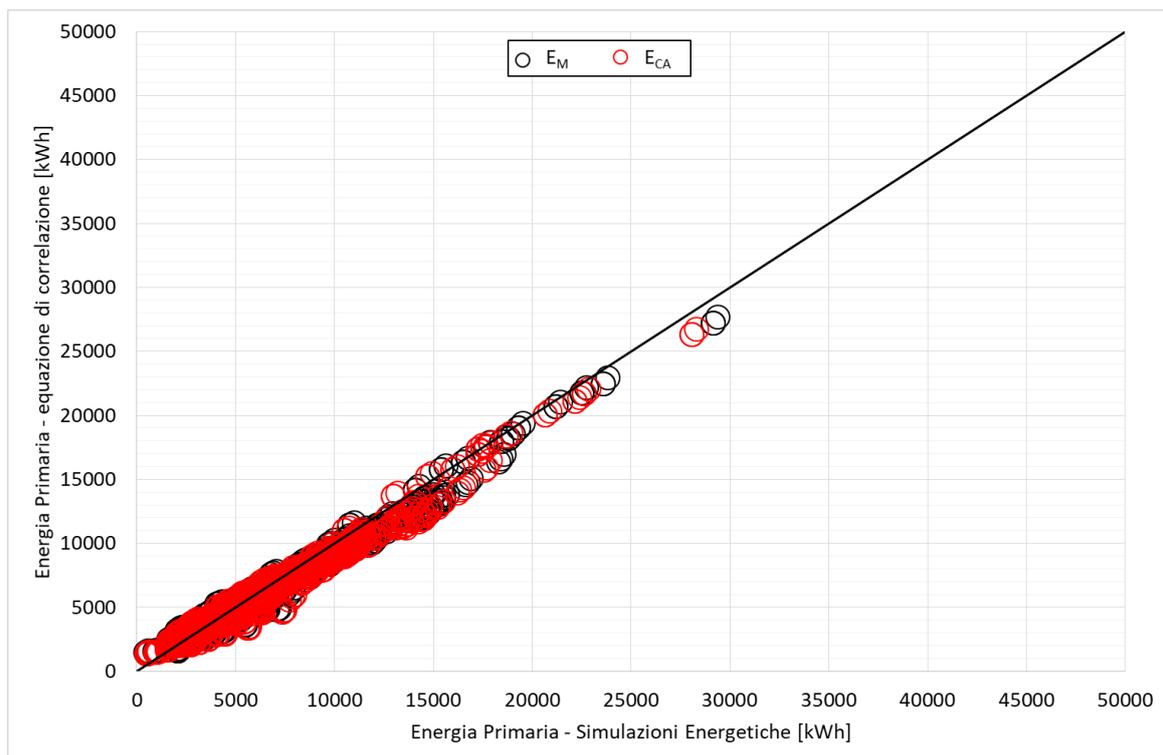


Figura 90 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici in muratura ( $E_M$ ) e in cemento armato ( $E_{CA}$ ) caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

### 2.5.2.3.3 Generatori a condensazione a bassa temperatura e livello di isolamento Liv-Iso-3

L'ultima casistica analizzata dei generatori a condensazione riguarda gli impianti analoghi al caso precedente, quindi a bassa temperatura, ma relativamente a casi studio con livello di isolamento Liv-Iso-3, quindi nuove costruzioni.

I valori di energia primaria calcolata con profilo di utilizzo asset sono stati confrontati con quelli ottenuti con i tre profili tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ) per tutte le località di simulazione, sulla base dei quali sono stati determinati gli Indicatori Energetici Normalizzati  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{max}$ . Per brevità di trattazione, si riportano solo i grafici relativi ai trend dei tre IEN rispetto ai Gradi Giorno (Figura 91).

Gli andamenti di  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{max}$  sono descritti da una famiglia di tre equazioni che lega il profilo asset con quello tailored. Queste equazioni possono essere espresse attraverso l'Equazione 12, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11 in cui il pedice  $x$  rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore, calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  (Tabella 77

Tabella 77) che variano in funzione del valore ricercato.

L'analisi è proseguita identificando il valore dei coefficienti correttivi con cui moltiplicare i risultati delle equazioni per  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$  e approssimarle il più possibile ai risultati delle simulazioni per ogni località (Tabella 78).

Infine, i valori di  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$  ricavati dalle equazioni cui sono stati applicati i coefficienti correttivi, sono stati oggetto di verifica con gli indicatori ottenuti dalle simulazioni energetiche per le stesse combinazioni di caso studio. La verifica ha dato esito positivo (Figura 92) con un errore relativo medio del -5%, in cui il segno meno indica una sovrastima dell'energia primaria rispetto alla simulazione energetica. Si precisa che l'errore relativo riscontrato tende a crescere con il diminuire dell'energia primaria per i valori minori dei Gradi Giorno ed è quindi estremamente ridotto in termini assoluti. Questo errore non determina una significativa variazione dell'energia primaria degli edifici, pertanto è stato considerato accettabile.

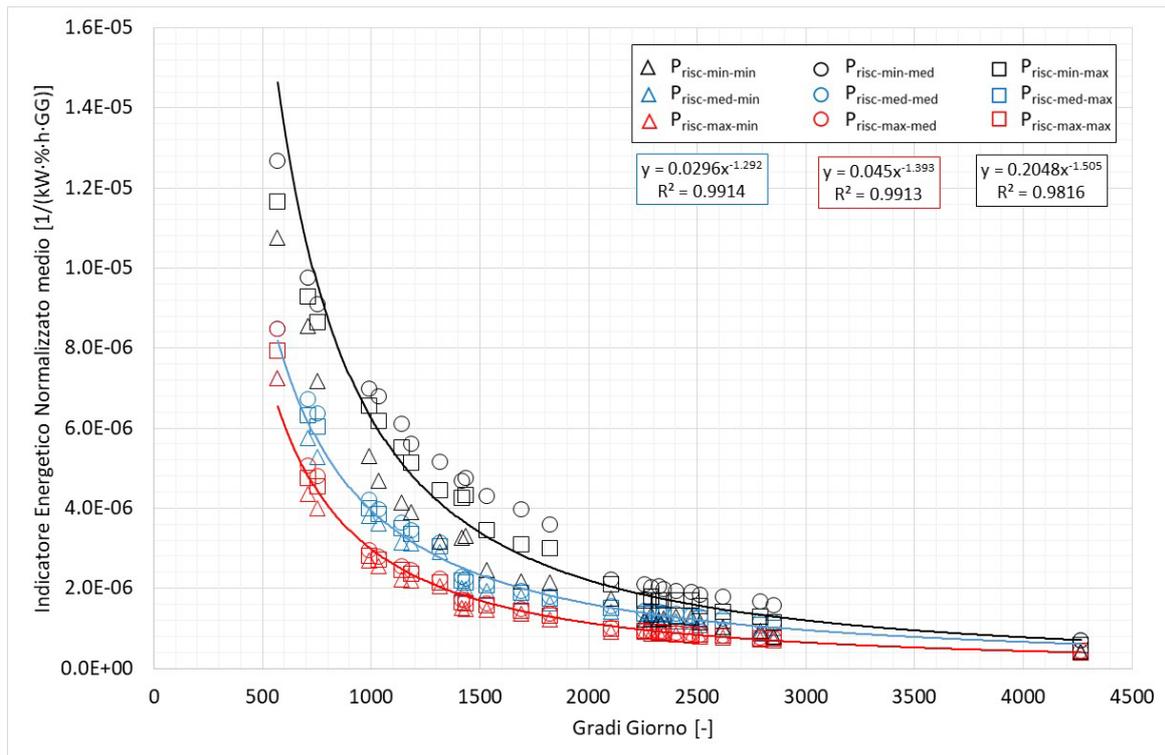


Figura 91 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici con livello di isolamento Liv-Iso-03.

Tabella 77 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-3		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0205	-1.505	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0296	-1.292	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0450	-1.393	IEN <sub>max</sub>

Tabella 78 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: coefficienti per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

<b>Gradi Giorno</b>	<b><i>P<sub>risc-min</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-med</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-max</sub></i></b>		
	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>
568	0.00	0.87	0.13	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.82
707	0.00	0.95	0.05	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	0.65
751	0.00	0.78	0.22	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.63
990	0.40	0.40	0.20	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	0.66
1034	0.40	0.45	0.15	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.67
1142	0.45	0.55	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.70
1185	0.58	0.42	0.00	0.00	0.09	0.91	0.00	0.00	0.74
1317	0.77	0.23	0.00	0.00	0.27	0.73	0.00	0.00	0.79
1415	0.83	0.17	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.68
1435	0.67	0.33	0.00	0.00	0.00	0.84	0.00	0.00	0.65
1530	0.96	0.04	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.70
1688	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.75
1821	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00	0.74
2102	0.50	0.18	0.32	0.00	0.10	0.90	0.00	0.00	0.70
2259	0.70	0.20	0.10	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.78
2289	0.70	0.20	0.10	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.77
2323	0.70	0.23	0.07	0.00	0.39	0.61	0.00	0.00	0.78
2345	0.70	0.23	0.07	0.00	0.39	0.61	0.00	0.00	0.78
2404	0.68	0.22	0.10	0.00	0.36	0.64	0.00	0.00	0.77
2472	0.80	0.12	0.08	0.00	0.45	0.55	0.00	0.00	0.80
2514	0.77	0.23	0.00	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.81
2617	0.88	0.12	0.00	0.00	0.55	0.45	0.00	0.00	0.82
2791	1.05	0.00	0.00	0.00	0.71	0.29	0.00	0.00	0.87
2850	1.08	0.00	0.00	0.00	0.77	0.23	0.00	0.00	0.90
4264	0.17	0.83	0.00	0.17	0.83	0.00	0.00	0.00	1.00

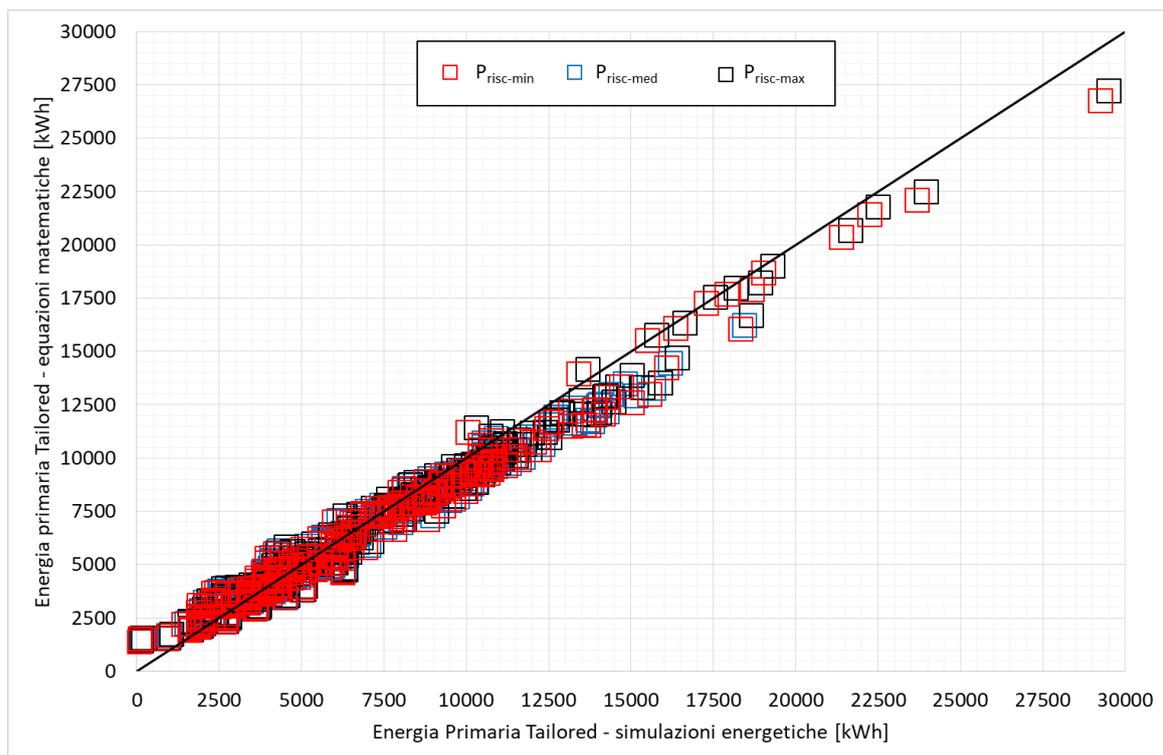


Figura 92 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

#### 2.5.2.4 Categoria E.1 e generatori di calore a pompa di calore

L'ultima tipologia impiantistica investigata è quella dell'impianto a pompa di calore, che generalmente permette di coprire il fabbisogno energetico dell'edificio solo se questo è poco disperdente. In accordo con le analisi condotte in [1], infatti, era emerso che la potenza media di queste tipologie impiantistiche oscilla tra 5-15 kW, pertanto risultano essere configurazioni prevalentemente di tipo autonomo.

Per questo motivo, le pompe di calore idroniche sono state considerate per i casi studio E1.i ed E1.t caratterizzati da un livello di isolamento elevato (Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3), quindi associabili a edifici oggetto di importante ristrutturazione energetica o nuove costruzioni.

A differenza di quanto fatto per i generatori a combustione, l'analisi è stata condotta considerando direttamente l'energia primaria non rinnovabile restituita dalle simulazioni energetiche in base all'asset rating e i profili di utilizzo tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ) per le diverse configurazioni dei casi studio (E1.i ed E1.t), in tutte le località di simulazione e con due livelli di isolamento del fabbricato (Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3); l'impianto di riscaldamento installato è una pompa di calore le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 36. Come per le precedenti analisi, il procedimento seguito per ottenere le relazioni matematiche tra i tre profilo di utilizzo tailored e l'asset rating è descritto in 2.5.2.

##### 2.5.2.4.1 Livello di isolamento Liv-Iso-2

L'energia primaria non rinnovabile determinata con l'asset rating è riportata in Figura 93 come valore medio tra quella calcolata per gli edifici in muratura ( $E_M$ ) e per quelli in cemento armato ( $E_{CA}$ ), al variare della località dei venticinque comuni di simulazione e considerando un livello di isolamento Liv-Iso-2. Il grafico permette di evidenziare come anche per la pompa di calore si ottenga lo stesso trend osservato per i casi precedenti, sebbene i valori ottenuti siano sensibilmente più bassi.

A partire dall'energia prima non rinnovabile dell'asset rating, si è proceduto con l'analisi di correlazione con i tre profili tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ), grazie alla quale si è evinto un legame non lineare fortemente dipendente dal numero di ore di accensione dell'impianto e dall'energia che la pompa di calore riesce effettivamente a produrre in quella fascia oraria (Figura 94).

Analogamente a quanto fatto per i generatori a combustione, i valori dell'energia primaria non rinnovabile determinati con i tre profili tailored sono stati normalizzati rispetto ai seguenti parametri:

1. energia primaria non rinnovabile calcolata secondo la metodologia asset;
2. potenza fornita dalla pompa di calore alla temperatura interna di esercizio e quella esterna di 7°C;
3. COP della macchina alle stesse condizioni di riferimento della potenza;
4. numero di ore di accensione ipotizzate per lo specifico profilo tailored considerato;
5. Gradi Giorno teorici della località di riferimento.

I risultati della normalizzazione sono mostrati in Figura 95 da dove si evince un trend esattamente come quelli evidenziati in precedenza.

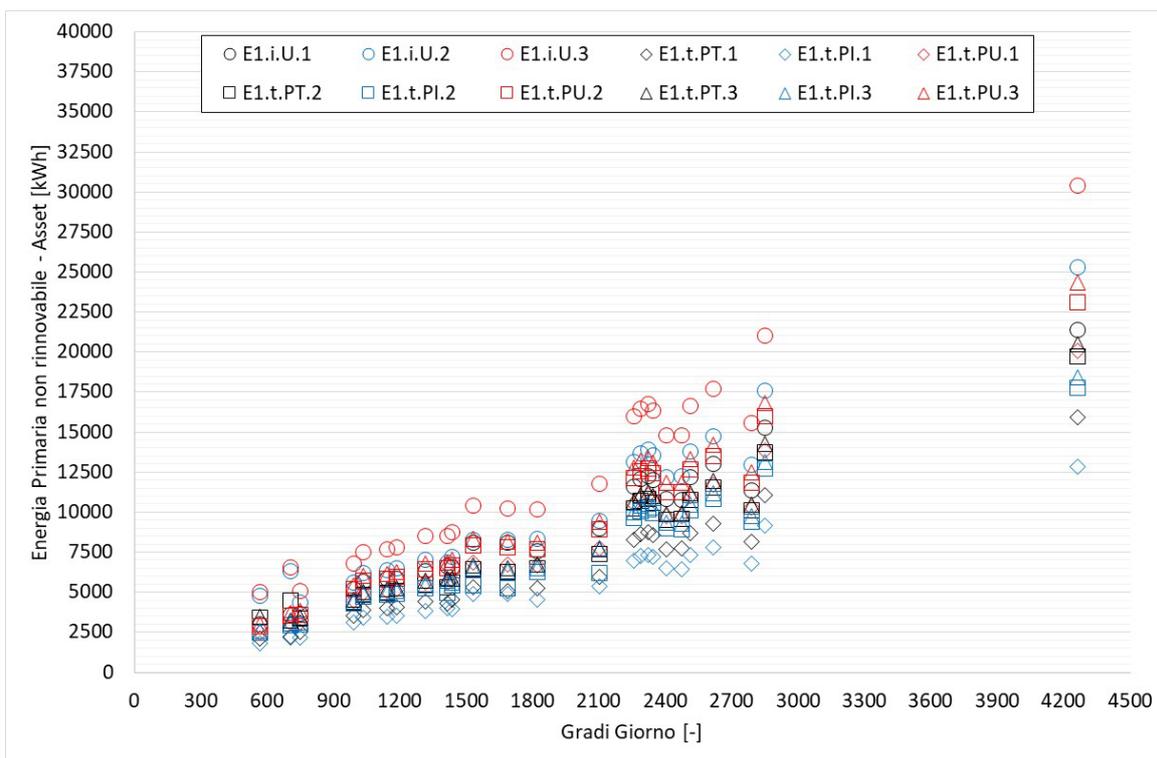


Figura 93 – Trend dell'energia primaria calcolata con il profilo asset rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici caratterizzati da livello di isolamento Liv-Iso-2.

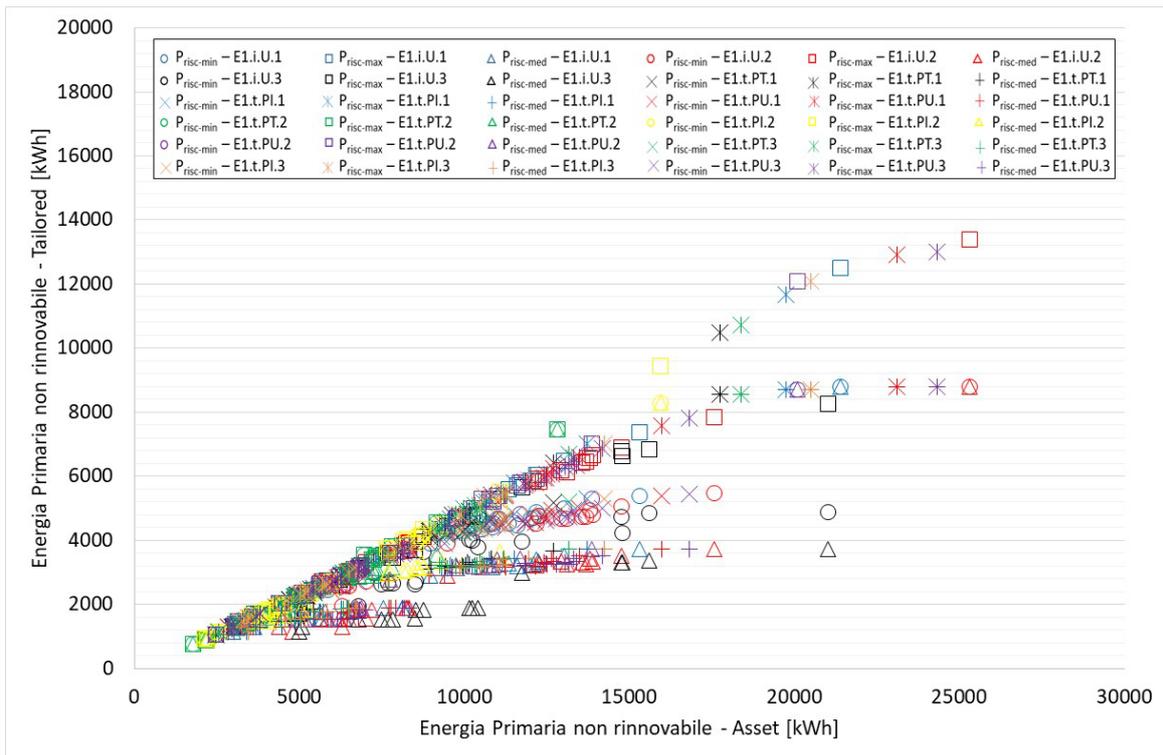


Figura 94 – Confronto tra energia primaria calcolata con l’asset rating e quella restituita con i tre profili tailored: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

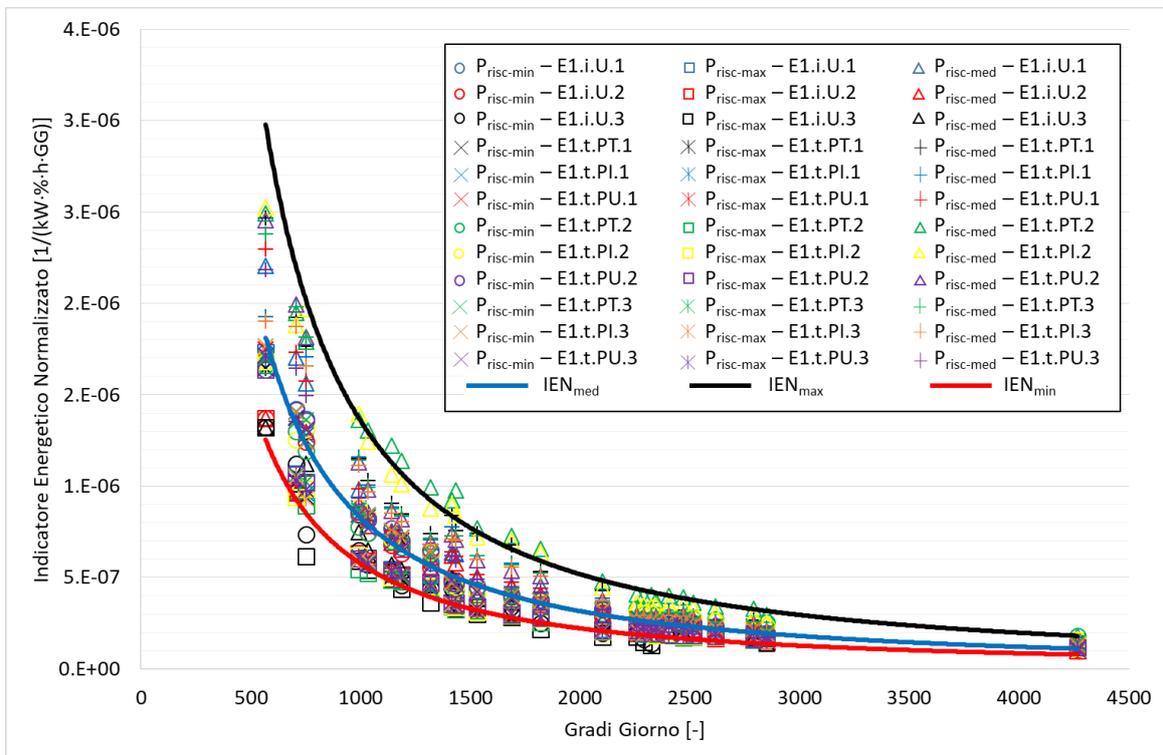


Figura 95 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

Sulla base di questi risultati si sono considerati per ciascun profilo tailored e per ogni località i valori minimo, medio e massimo dell’Indicatore Energetico Normalizzato (IEN), i cui trend sono mostrati in Figura 96. I

risultati evidenziano una famiglia di tre equazioni che permette di correlare l'asset rating con quelli tailored; essa è esprimibile sempre attraverso l'Equazione 12, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11 in cui il pedice x rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore, calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  mostrati in Tabella 79 rispettivamente per  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$ .

In questo caso, la definizione dei coefficienti correttivi, per ognuna delle tre equazioni al variare delle ore di accensione dell'impianto e dei Gradi Giorno, è stata basata sull'analisi dell'energia primaria non rinnovabile restituita da ogni equazione rispetto il valore restituito dalle simulazioni energetiche (Tabella 80).

Infine, le equazioni moltiplicate per i rispettivi coefficienti correttivi sono state messe a confronto con i valori restituiti dalle simulazioni energetiche per la stessa configurazione del caso studio (Figura 97). L'errore relativo medio restituito risulta essere intono al 2% pertanto i risultati restituiti dalle relazioni matematiche possono essere considerati attendibili.

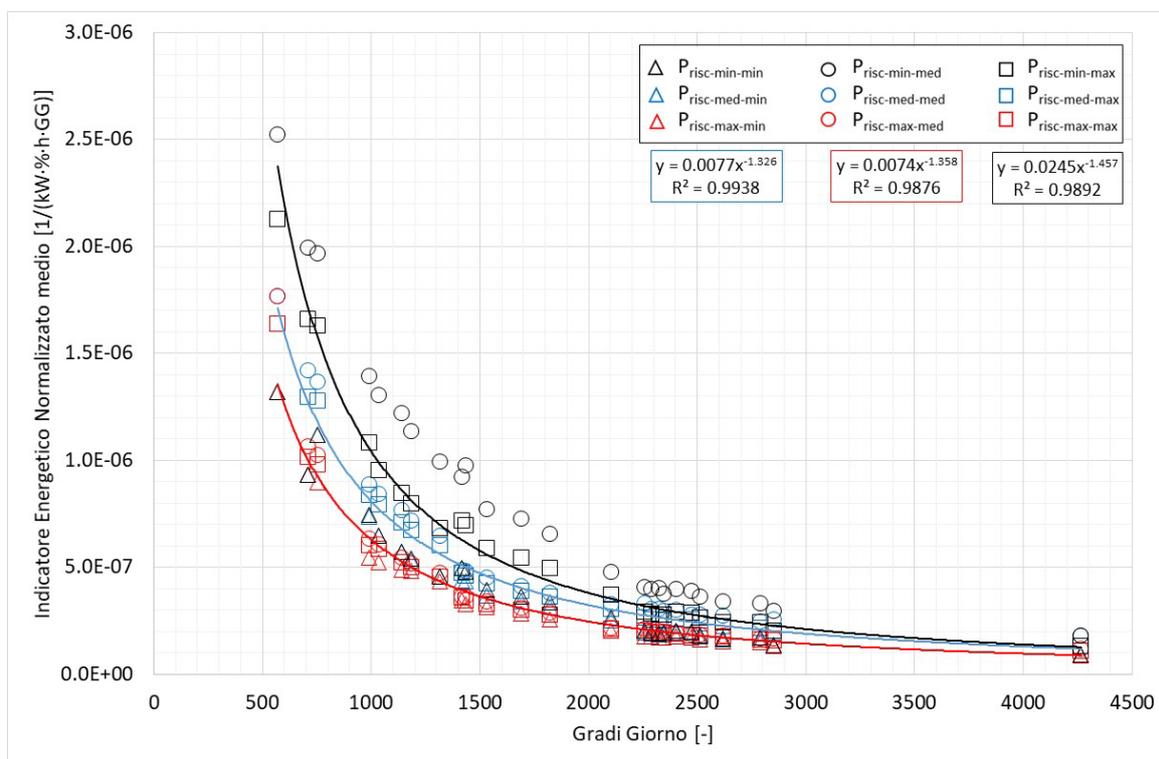


Figura 96 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

Tabella 79 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-2		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0245	-1.457	$IEN_{min}$
medio	0.0077	-1.326	$IEN_{med}$
massimo	0.0074	-1.358	$IEN_{max}$

Tabella 80 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

<b>Gradi Giorno</b>	<b><i>P<sub>risc-min</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-med</sub></i></b>			<b><i>P<sub>risc-max</sub></i></b>		
	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>med</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>max</sub></i></b>	<b><i>IEN<sub>min</sub></i></b>
568	0.57	0.43	0.00	0.00	0.90	0.10	0.00	0.05	0.95
707	1.00	0.00	0.00	0.30	0.60	0.10	0.00	0.23	0.77
751	0.98	0.00	0.02	0.12	0.80	0.08	0.00	0.00	0.95
990	0.81	0.00	0.19	0.10	0.84	0.06	0.00	0.00	0.98
1034	0.86	0.00	0.14	0.14	0.85	0.01	0.00	0.02	0.98
1142	0.85	0.00	0.15	0.18	0.76	0.06	0.00	0.05	0.95
1185	0.83	0.00	0.17	0.20	0.80	0.00	0.00	0.21	0.79
1317	1.10	0.00	0.00	0.00	0.66	0.34	0.00	0.00	0.92
1415	1.09	0.00	0.00	0.00	0.64	0.36	0.00	0.00	0.91
1435	0.15	0.85	0.00	0.00	0.74	0.26	0.00	0.00	0.97
1530	0.05	0.95	0.00	0.00	0.73	0.27	0.00	0.00	0.96
1688	0.70	0.30	0.00	0.00	0.98	0.02	0.00	0.00	0.99
1821	0.95	0.05	0.00	0.14	0.86	0.00	0.00	0.00	0.99
2102	0.30	0.70	0.00	0.00	0.85	0.15	0.00	0.08	0.92
2259	1.00	0.00	0.00	0.11	0.89	0.00	0.00	0.12	0.88
2289	0.60	0.00	0.40	0.00	0.68	0.32	0.00	0.15	0.85
2323	1.01	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.68	0.32
2345	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2404	0.57	0.43	0.00	0.00	0.90	0.10	0.00	0.05	0.95
2472	1.00	0.00	0.00	0.30	0.60	0.10	0.00	0.23	0.77
2514	0.98	0.00	0.02	0.12	0.80	0.08	0.00	0.00	0.95
2617	0.81	0.00	0.19	0.10	0.84	0.06	0.00	0.00	0.98
2791	0.86	0.00	0.14	0.14	0.85	0.01	0.00	0.02	0.98
2850	0.85	0.00	0.15	0.18	0.76	0.06	0.00	0.05	0.95
4264	0.83	0.00	0.17	0.20	0.80	0.00	0.00	0.21	0.79

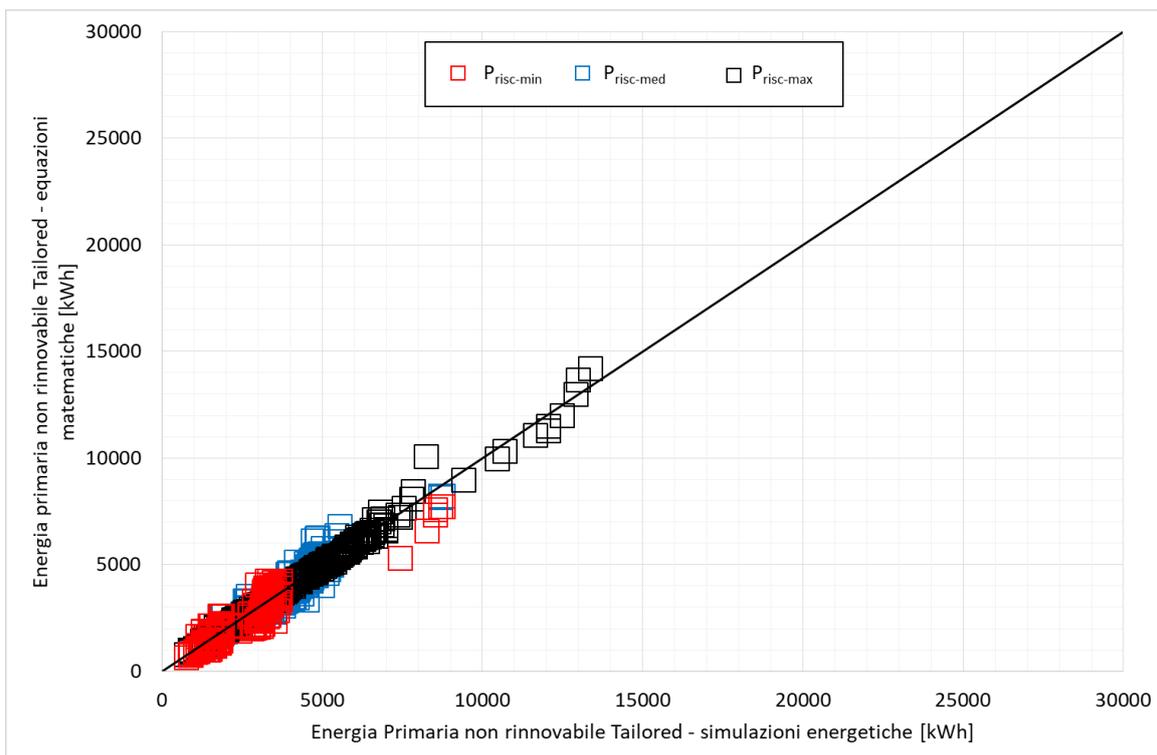


Figura 97 – Confronto tra energia primaria non rinnovabile simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

2.5.2.4.2 Livello di isolamento Liv-Iso-3

La seconda casistica indagata con la pompa di calore a servizio del riscaldamento dei casi studio E1.i ed E1.t presenta un livello di isolamento Liv-Iso-3, ovvero sono edifici di nuova costruzione. I valori dell’energia primaria non rinnovabile determinata con l’asset rating in tutte le località di simulazione sono assimilabili in Figura 98.

Analizzata l’energia primaria non rinnovabile secondo l’asset rating, si è proceduto con l’analisi di correlazione con i tre profili tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ) grazie alla quale è stato possibile confermare un legame non lineare e fortemente dipendente dal numero di ore di accensione dell’impianto e dall’energia che la pompa di calore riesce effettivamente a produrre in quella fascia oraria (Figura 99).

I valori dell’energia primaria non rinnovabile sono stati quindi normalizzati rispetto agli stessi parametri considerati per il caso precedente (2.5.2.4.1) i cui risultati sono mostrati in (Figura 100).

Sulla base di questo trend, si sono considerati per ciascun profilo tailored e per ogni località i valori minimo, medio e massimo dell’Indicatore Energetico Normalizzato (IEN), ottenendo il trend mostrato in Figura 101.

I risultati evidenziano anche in questo caso una famiglia costituita da minimo tre equazioni che permette di correlare l’asset rating ai tre profili tailored; questa è esprimibile attraverso l’Equazione 12 dove  $IEN_x$  è espressa dall’Equazione 11 in cui il pedice x rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell’indicatore, calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  mostrati in Tabella 81 rispettivamente per  $IEN_{min}$ ,  $IEN_{med}$  ed  $IEN_{max}$ .

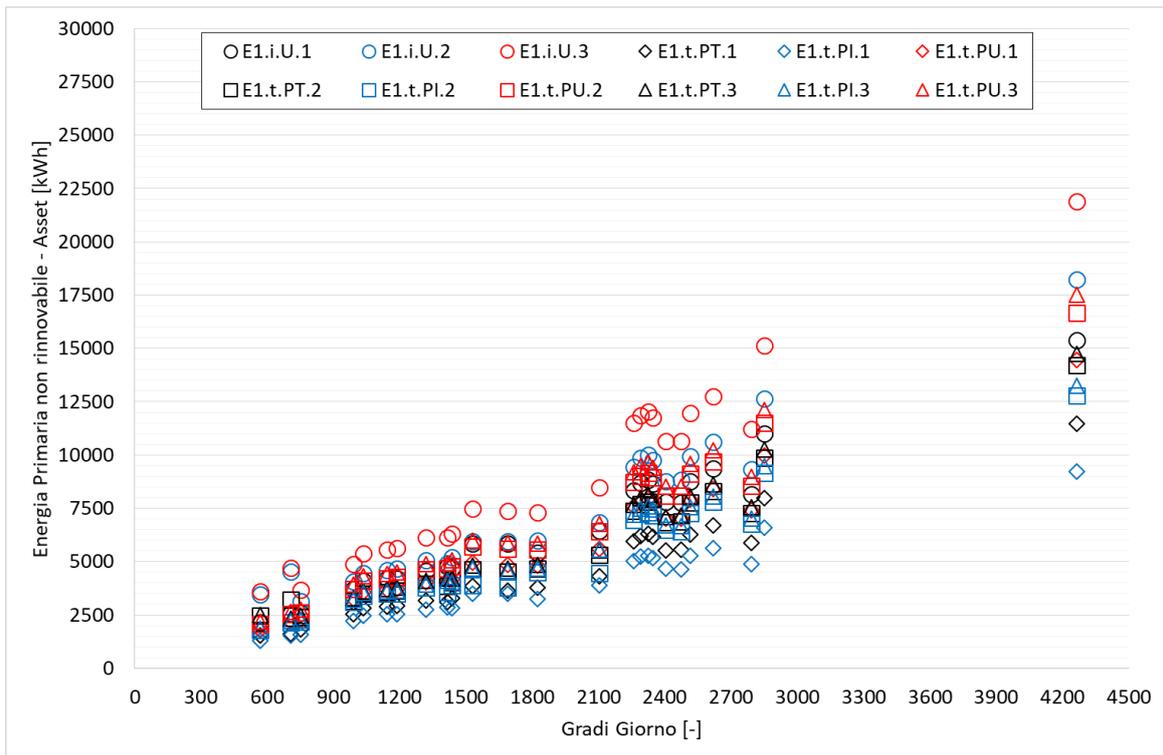


Figura 98 – Trend dell’energia primaria calcolata con il profilo asset rispetto i Gradi Giorno della località di simulazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

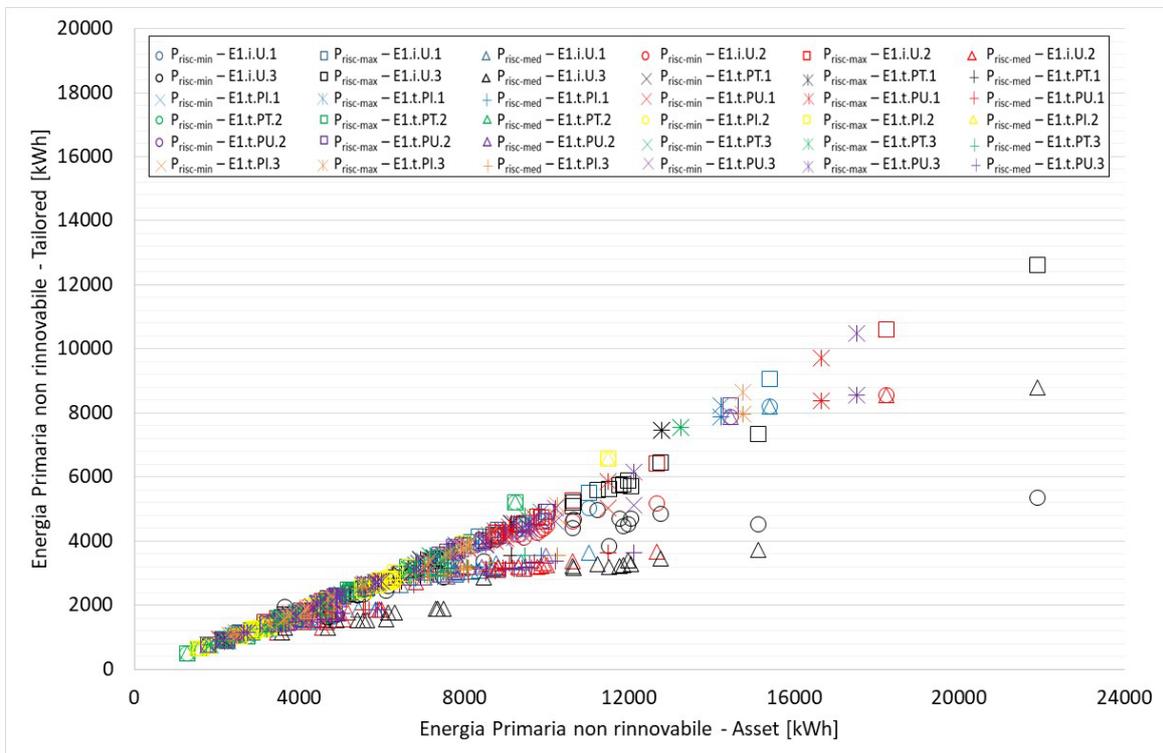


Figura 99 – Confronto tra energia primaria calcolata con il profilo asset e quella restituita con i tre profili tailored: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

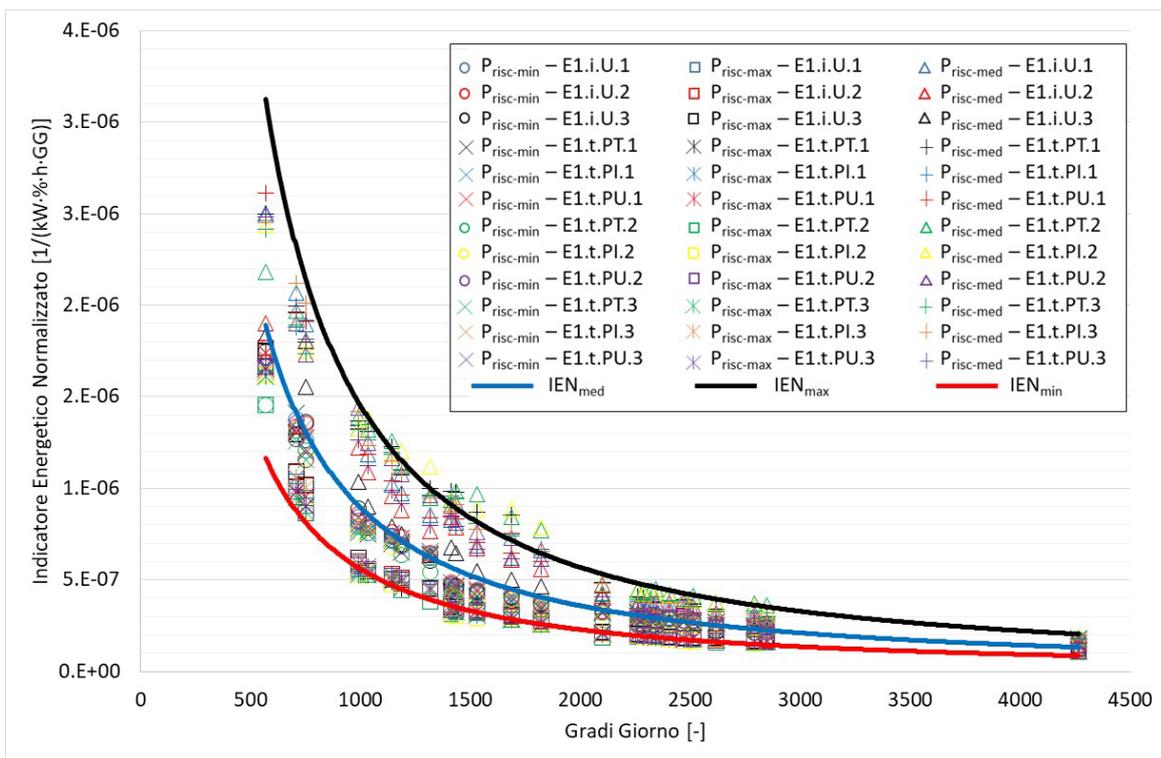


Figura 100 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

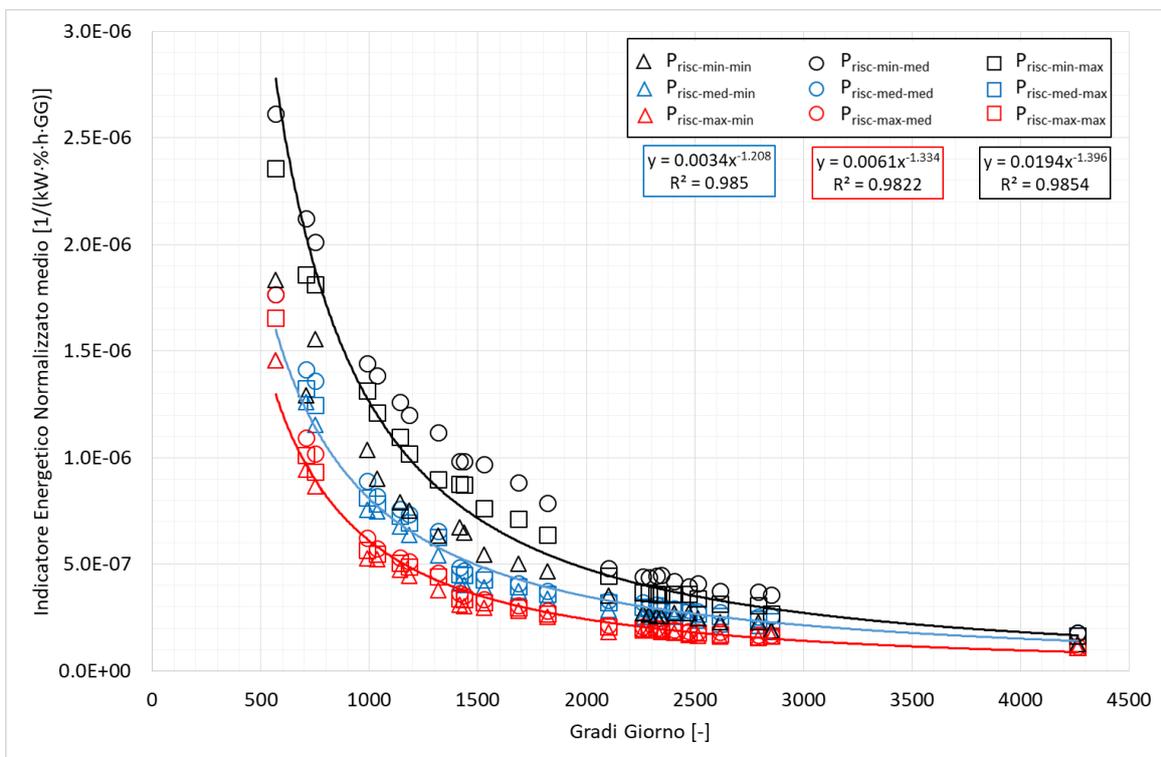


Figura 101 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

Tabella 81 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-2		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0194	-1.396	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0034	-1.208	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0061	-1.334	IEN <sub>max</sub>

Anche in questo caso, la definizione dei coefficienti correttivi, per ognuna delle equazioni trovate, sono stati definiti in considerazione delle ore di accensione dell'impianto e dei Gradi Giorno; l'analisi si è basata considerando l'energia primaria non rinnovabile calcolata da ogni equazione rispetto al valore restituito dalle simulazioni energetiche (Tabella 82).

Infine, le tre equazioni moltiplicate per i rispettivi coefficienti correttivi, sono state oggetto di controllo rispetto i valori ricavati dalle simulazioni energetiche per la stessa configurazione del caso studio (Figura 102). L'errore relativo medio ottenuto risulta essere intono al 2% pertanto i risultati restituiti dalle relazioni matematiche possono essere considerati attendibili.

Tabella 82 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: coefficienti per: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

Gradi Giorno	P <sub>risc-min</sub>			P <sub>risc-med</sub>			P <sub>risc-max</sub>		
	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>
568	0.60	0.40	0.00	0.06	0.94	0.00	0.06	0.94	0.00
707	0.67	0.33	0.00	0.12	0.88	0.00	0.00	0.22	0.78
751	0.90	0.10	0.00	0.20	0.68	0.12	0.00	0.22	0.78
990	1.02	0.00	0.00	0.00	0.99	0.01	0.00	0.00	0.93
1034	0.96	0.04	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	0.95
1142	1.02	0.00	0.00	0.12	0.85	0.03	0.00	0.02	0.98
1185	1.00	0.00	0.00	0.15	0.80	0.05	0.00	0.05	0.95
1317	1.02	0.00	0.00	0.19	0.81	0.00	0.00	0.15	0.85
1415	1.11	0.00	0.00	0.00	0.51	0.49	0.00	0.00	0.90
1435	1.12	0.00	0.00	0.00	0.51	0.49	0.00	0.00	0.90
1530	1.06	0.00	0.00	0.00	0.60	0.40	0.00	0.00	0.93
1688	1.14	0.00	0.00	0.00	0.74	0.26	0.00	0.00	0.99
1821	1.14	0.00	0.00	0.00	0.74	0.26	0.00	0.00	0.99
2102	0.91	0.09	0.00	0.00	0.91	0.09	0.00	0.00	0.92
2259	0.62	0.29	0.11	0.00	0.94	0.06	0.00	0.00	0.99
2289	0.55	0.45	0.00	0.00	0.94	0.06	0.00	0.00	0.97
2323	0.59	0.41	0.00	0.00	0.98	0.02	0.00	0.00	0.98
2345	0.60	0.40	0.00	0.00	0.97	0.03	0.00	0.00	0.98
2404	0.80	0.20	0.00	0.00	0.98	0.02	0.00	0.00	0.98
2472	0.95	0.05	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.00	0.98
2514	0.80	0.20	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.01	0.99
2617	0.70	0.30	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.07	0.93
2791	0.96	0.04	0.00	0.11	0.89	0.00	0.00	0.10	0.90
2850	0.60	0.32	0.08	0.02	0.98	0.00	0.00	0.19	0.81
4264	0.78	0.22	0.00	0.78	0.22	0.00	0.00	0.47	0.53

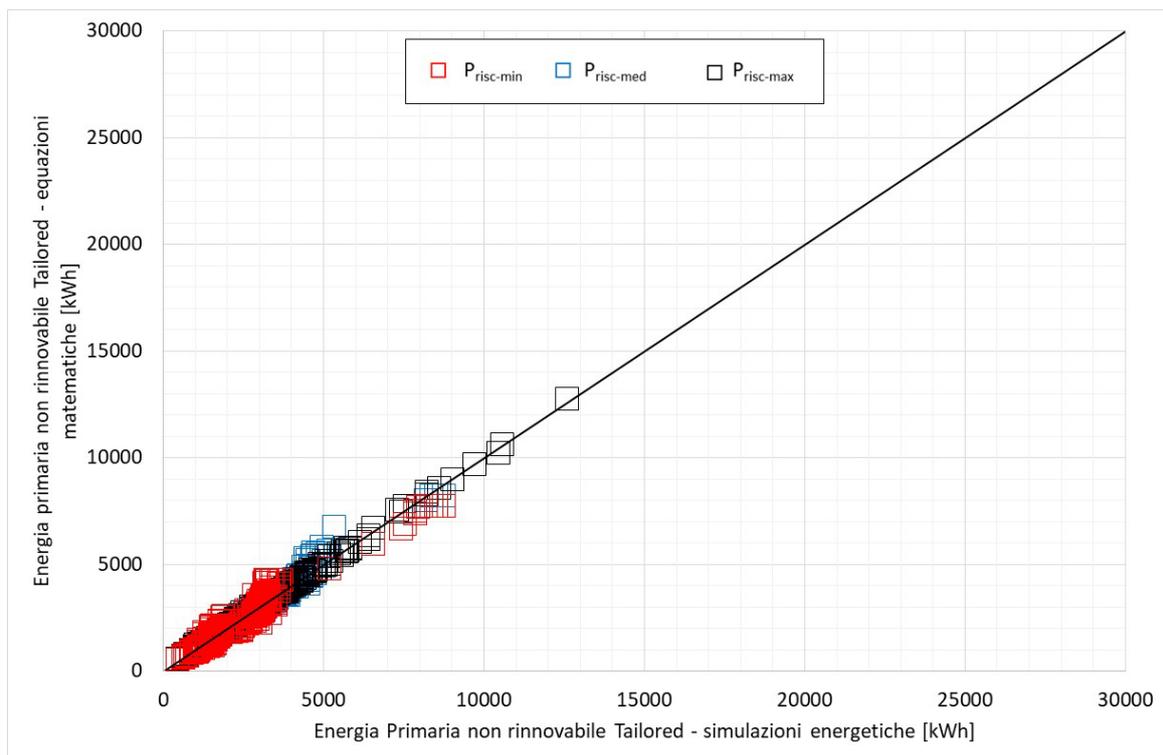


Figura 102 – Confronto tra energia primaria non rinnovabile simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

#### 2.5.2.5 Correlazione tra impianti autonomi e centralizzati

Una volta definite le relazioni di correlazione per la tipologia di impianto autonomo, le stesse sono state oggetto di verifica per la tipologia centralizzata. La trasposizione delle equazioni trovate per il generatore 1 nella configurazione autonoma è stata già precedentemente applicata per gli altri generatori di calore a combustione autonomi e i risultati restituiti, come si è visto, sono molto simili.

Per questo motivo è stato plausibile ipotizzare, già in fase preliminare, che le stesse equazioni fin qui desunte potessero essere utilizzate anche per la configurazione centralizzata.

Le analisi condotte nei successivi paragrafi sono basate sulle seguenti ipotesi:

- escludendo le caratteristiche dell'impianto di generazione, le due tipologie di impianto differiscono leggermente nel rendimento di distribuzione e di generazione. Pertanto, in base alle normative vigenti, i risultati si discosteranno di una costante dipendente dalla differenza dei valori di questi rendimenti;
- l'impianto adottato soddisfa in ogni istante la richiesta energetica per arrivare a coprire il reale fabbisogno energetico dei casi studio indagati. Si tiene a precisare che per una corretta applicazione delle equazioni è necessario considerare la potenza del generatore di calore centralizzato ripartito per le unità immobiliari effettivamente servite. Per i casi esaminati si è ottenuta una potenza di circa 25 kW, valore inferiore a quello assunto per i generatori autonomi
- la tipologia impiantistica centralizzata è stata considerata solo per alte temperature di esercizio, ossia quella che ha radiatori come terminali di emissione, essendo quella a bassa temperatura una configurazione poco probabile. Quindi, le equazioni oggetto di verificate saranno quelle identificate per questa tipologia di generatori di calore.

Si precisa, inoltre, che la differenza di generatore di calore è stata già tenuta in considerazione nella normalizzazione dei valori di energia primaria per la potenza e il rendimento del generatore di calore, come esposto in 2.5.2. Quindi l'unico parametro di cui non si è tenuto conto esplicitamente è proprio il rendimento di distribuzione.

I casi studio E1.i e E1.t sono stati indagati in tutte le configurazioni geometriche e dimensionali selezionate, al variare del livello di isolamento (Tabella 29) e in tutte le località di simulazione.

Per brevità di trattazione, essendo stata già descritta la trasposizione delle equazioni nei precedenti paragrafi, si riportano i risultati complessivi delle verifiche per i quattro livelli di isolamento espressi come confronto tra l'energia primaria ottenuta con le equazioni e con le simulazioni energetiche (Figura 103-Figura 106) e come errore relativo medio (Tabella 83) al variare dei Gradi Giorno e dei profili di utilizzo tailored ( $P_{\text{risc-min}}$ ,  $P_{\text{risc-med}}$ ,  $P_{\text{risc-max}}$ ).

Tutti i grafici evidenziano che le stesse equazioni trovate per gli impianti autonomi approssimano correttamente anche l'energia primaria degli immobili con impianto centralizzato. In particolare, l'errore relativo medio che si ottiene tende a crescere con l'aumentare del livello di isolamento a partire da un valore minimo di circa 2% (Liv-Iso-0) a un massimo del circa 11% (Liv-Iso-3).

A livello generale, l'errore relativo è mediamente inferiore al 5% per gli edifici più energivori e inferiore al 10% per quelli più performanti, confermando la validità di applicazione delle equazioni trovate anche per configurazioni centralizzate.

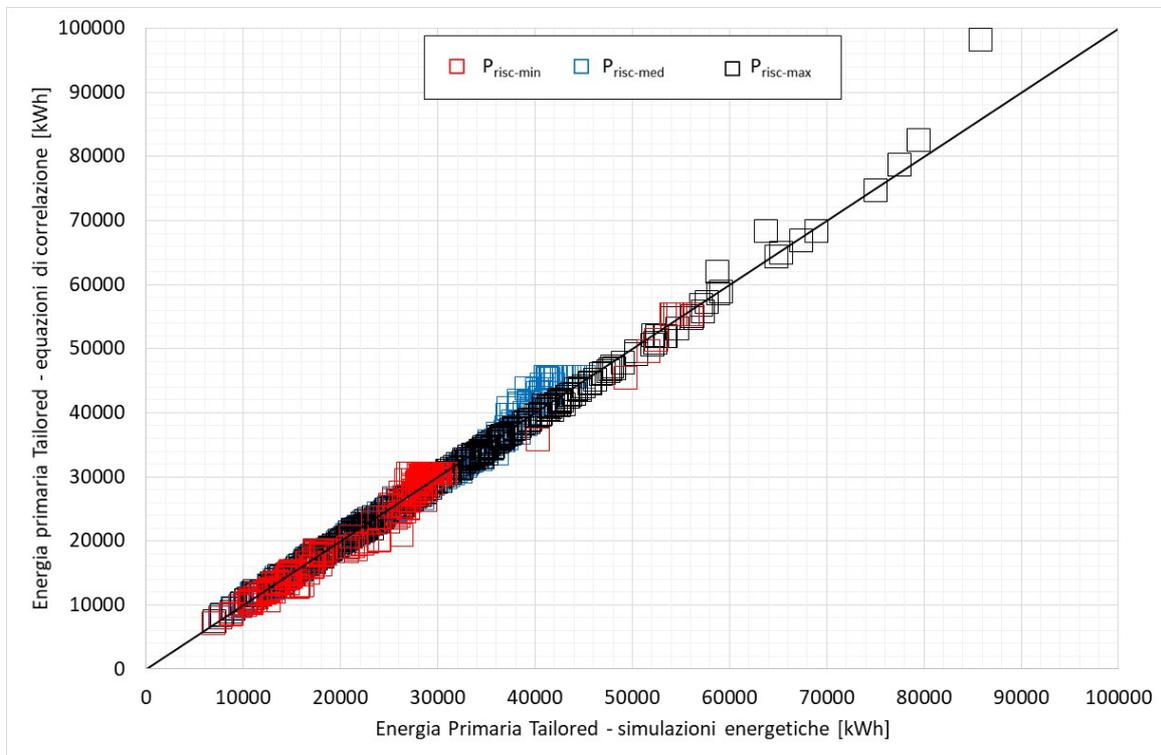


Figura 103 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.

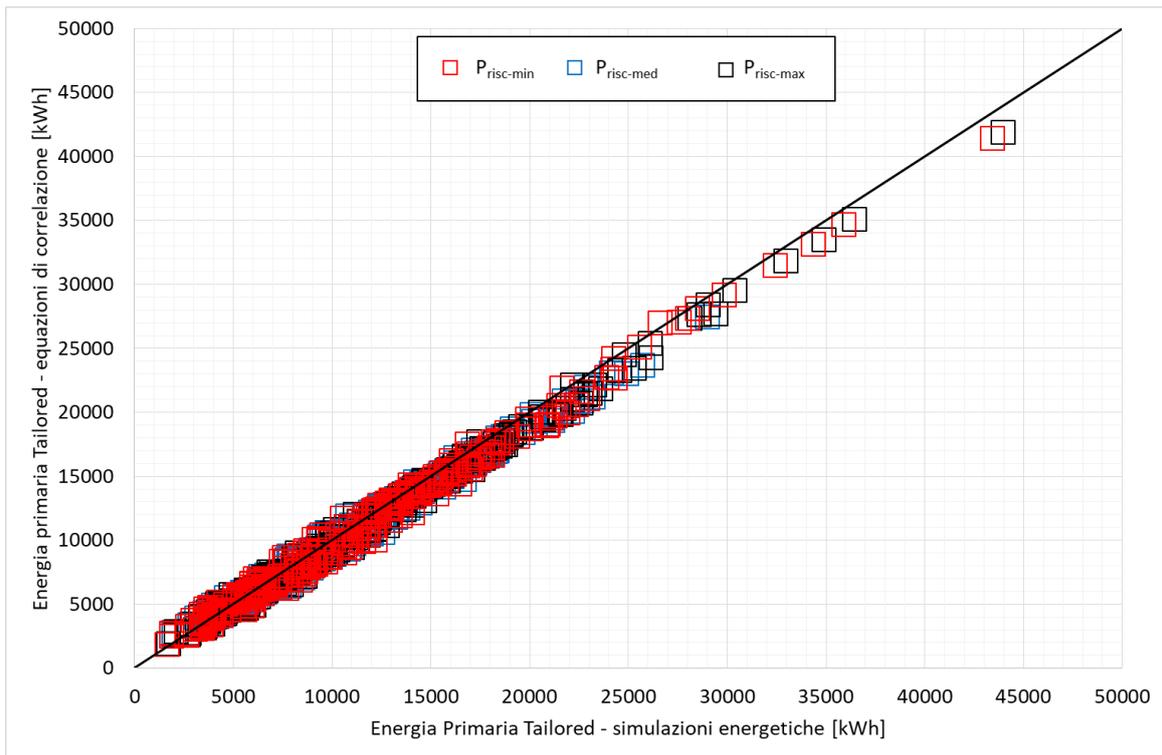


Figura 104 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

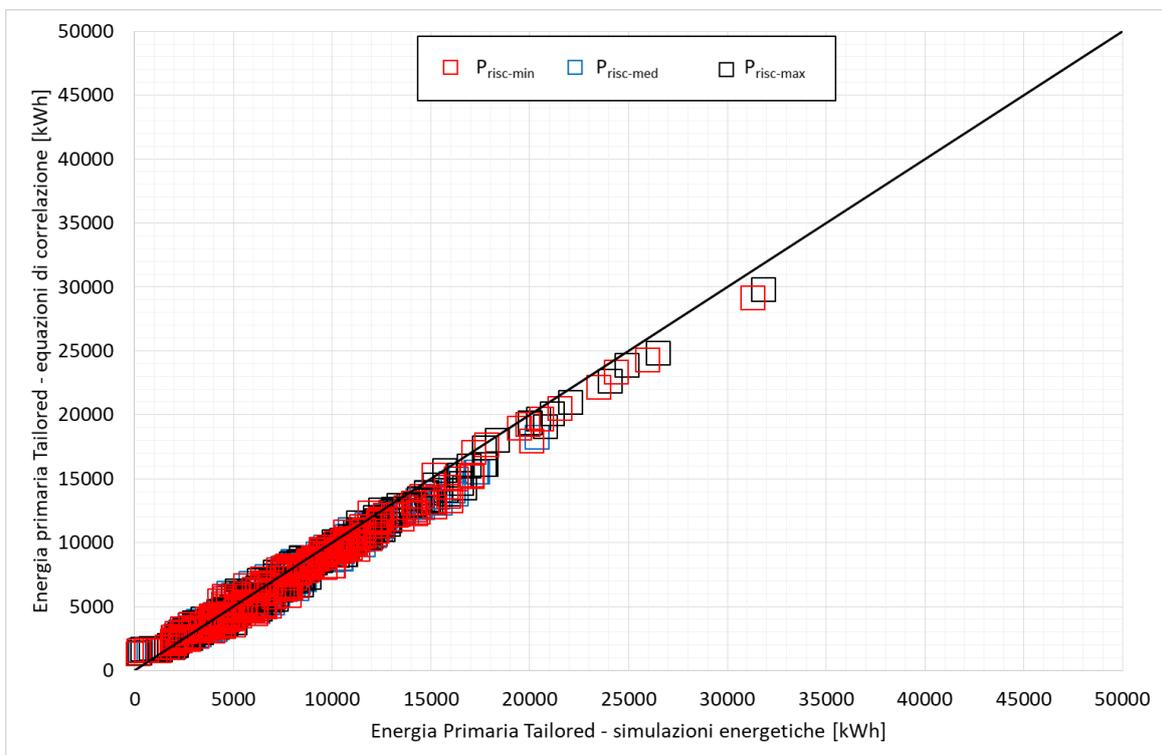


Figura 105 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

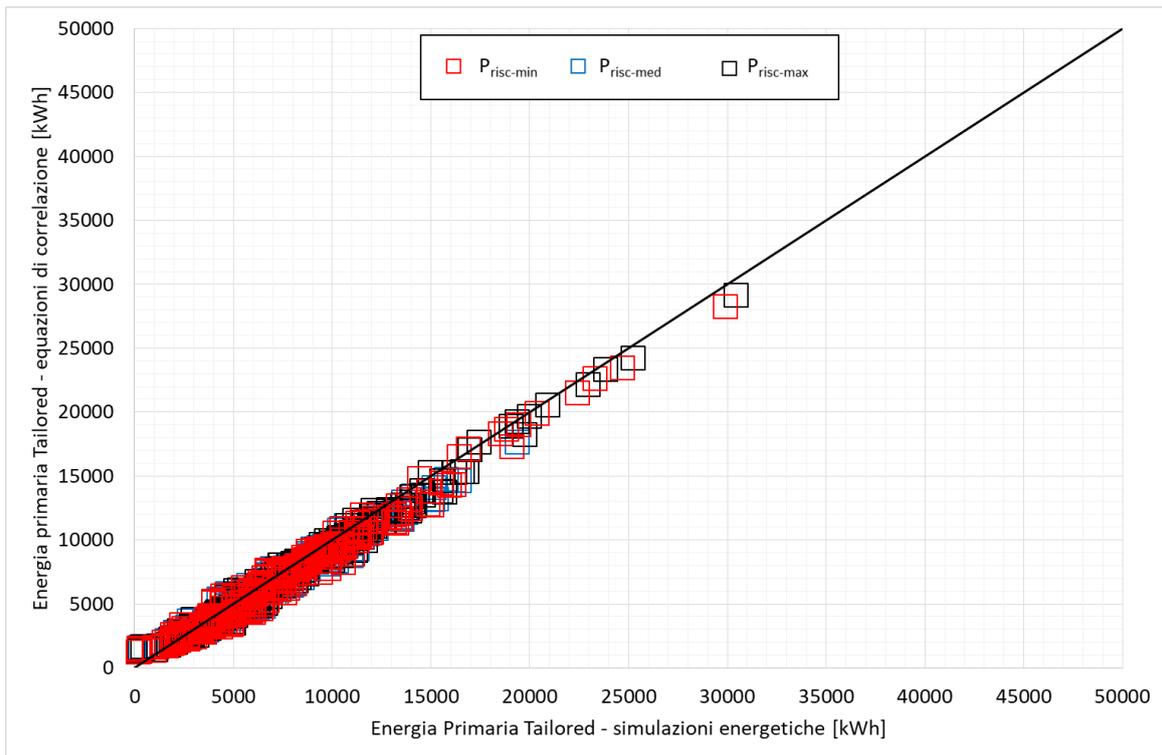


Figura 106 – Confronto tra energia primaria simulata e quella restituita dalle relazioni matematiche per edifici con impianto centralizzato caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

Tabella 83 – Errore relativo restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici con impianto centralizzato.

Gradi Giorno	<i>P<sub>risc-min</sub></i>				<i>P<sub>risc-med</sub></i>				<i>P<sub>risc-max</sub></i>			
	Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
568	1.63	8.54	2.79	5.27	1.81	9.14	2.46	5.97	1.81	9.14	2.46	5.97
707	2.65	5.69	1.81	3.75	3.20	5.84	1.71	4.11	2.98	6.00	2.00	3.65
751	2.17	4.46	6.41	5.54	1.28	4.11	6.56	5.64	3.39	5.05	5.25	5.11
990	1.84	1.00	3.22	9.45	1.82	0.49	2.88	8.67	1.52	0.12	3.43	8.89
1034	2.55	0.56	7.07	9.98	0.52	1.39	7.70	9.52	1.48	0.42	6.97	8.83
1142	2.50	1.07	6.68	9.88	1.27	1.21	7.61	8.72	1.45	2.49	7.31	8.76
1185	1.74	2.57	1.56	3.97	0.84	2.91	1.89	4.06	1.13	3.09	2.28	3.84
1317	3.71	5.38	1.20	3.27	1.39	5.27	1.69	3.80	1.50	6.29	2.15	3.14
1415	0.05	4.26	1.97	10.49	2.02	3.98	2.18	9.76	1.94	3.80	2.56	9.33
1435	0.86	4.12	8.07	10.47	2.61	3.73	8.54	9.76	2.52	2.45	9.09	8.76
1530	2.69	3.70	8.47	8.97	1.16	2.59	8.58	8.31	2.02	3.65	8.16	7.62
1688	3.10	0.34	8.73	8.55	1.19	0.36	8.13	8.59	1.12	1.15	8.80	7.68
1821	3.23	4.83	8.09	5.13	1.60	4.95	7.88	4.09	1.57	4.10	7.61	4.65
2102	3.12	2.53	3.59	6.73	0.49	3.02	3.73	6.57	2.44	2.34	3.87	5.83
2259	1.68	3.00	4.91	3.63	1.36	2.83	4.00	3.21	1.20	3.10	5.05	3.59
2289	0.05	1.92	6.86	1.39	0.95	2.29	5.76	1.52	1.81	3.02	5.80	1.04
2323	0.35	2.89	5.51	4.81	1.15	3.15	5.27	5.17	1.41	3.36	5.68	4.24
2345	1.24	0.70	4.41	1.56	0.83	1.01	4.76	1.02	1.78	1.60	5.18	1.80
2404	0.72	3.15	2.95	5.68	0.05	2.18	1.64	6.38	1.68	3.17	3.02	6.05
2472	0.42	3.45	3.77	3.38	0.36	4.63	4.06	4.03	1.90	4.32	3.78	4.11
2514	1.08	2.51	5.12	4.16	0.52	3.61	4.81	4.42	1.88	3.53	4.86	4.10
2617	0.95	2.47	4.00	3.28	1.02	2.59	4.88	3.86	2.06	3.40	4.73	3.22
2791	0.43	2.49	4.93	3.99	2.10	3.16	4.82	3.71	0.80	3.23	5.00	3.41
2850	2.82	0.95	4.36	1.71	0.25	1.37	4.67	1.75	1.60	2.81	3.54	1.85
4264	2.25	1.79	3.24	1.57	2.25	1.79	3.24	1.57	0.98	2.66	3.85	1.30
media	1.75	2.97	4.79	5.46	1.28	3.10	4.78	5.37	1.76	3.37	4.90	5.07

### 2.5.2.6 Correlazione tra le diverse categorie di destinazione d'uso

Ultimo passaggio nell'analisi del servizio energetico di climatizzazione invernale è stato quello di trasporre le equazioni di correlazione tra l'asset rating e tailored per gli edifici residenziali (E.1) anche alle restanti destinazioni d'uso identificate nel presente lavoro, ovvero uffici (E.2) e attività commerciali (E.5), per i quali sono stati adottati dei profili di utilizzo specifici (2.4.5.3). Si ricorda, tuttavia, che l'approccio adottato per la definizione delle relazioni di calcolo prescinde dal numero di ore di accensione dell'impianto nonché dall'energia primaria a seguito della normalizzazione. Per questo motivo, si è ritenuto plausibile l'utilizzo delle stesse equazioni matematiche definite per la categoria E.1.

Le equazioni identificate per la categoria E.1 sono state applicate alle categoria E.2 e E.5 seguendo il procedimento di verifica esposto nei precedenti paragrafi. I risultati sono stati riportati in termini di errore relativo (Tabella 84 e Tabella 85) calcolato come differenza tra il valore di energia primaria simulato e quello restituito dalle equazioni di correlazione al variare dei Gradi Giorno, dei livelli di isolamento (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2, Liv-Iso-3) e dei profili di utilizzo tailored ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$ ,  $P_{risc-max}$ ).

I risultati mostrano genericamente una buona correlazione tra equazioni e simulazioni, con un errore relativo medio restituito tra il 3-4% per la categoria E.2 e il 5-6% per la categoria E.5 con valori crescenti con l'aumentare del livello di isolamento del fabbricato ossia al diminuire della richiesta energetica dell'edificio; i picchi massimi raggiunti sono del 12% (E.2) e del 17% (E.5) riscontrati però solo specifiche località e legati ad un limitato numero di casi caratterizzati da elevati valori di energia primaria.

Questo errore è stato considerato accettabile sebbene sia maggiore di quello restituito per il settore residenziale, ma comunque inferiore mediamente al 10% a dispetto di un valore di energia primaria nettamente superiore.

Si tiene a precisare, tuttavia, che qualora si dovessero riscontrare significative variazioni con i dati degli edifici reali che saranno oggetto di studio nel corso del terzo anno di attività si potrà prevedere di apportare delle modifiche alle equazioni di correlazione.

Tabella 84 – Errore relativo restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.2.

<b>Gradi Giorno</b>	<b><i>Prisc-min</i></b>				<b><i>Prisc-med</i></b>				<b><i>Prisc-max</i></b>			
	<b><i>Livello di isolamento Liv-Iso</i></b>				<b><i>Livello di isolamento Liv-Iso</i></b>				<b><i>Livello di isolamento Liv-Iso</i></b>			
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
568	1.41	6.32	2.56	3.25	1.07	6.86	1.89	1.03	1.17	6.86	1.89	1.03
707	1.74	2.01	2.35	6.52	1.50	2.22	3.90	0.27	1.20	2.43	3.48	0.14
751	2.12	1.50	8.78	4.71	0.43	1.11	8.49	4.87	2.43	2.02	7.03	4.50
990	1.72	4.23	2.87	8.96	1.60	3.17	1.96	8.18	1.18	2.29	1.85	8.24
1034	2.23	3.99	4.90	10.77	0.07	4.30	4.98	10.02	0.73	2.89	3.94	9.15
1142	2.15	2.18	6.42	11.45	0.64	1.87	6.63	10.07	0.66	2.74	5.67	9.89
1185	1.61	4.27	1.22	7.38	0.50	4.15	0.79	6.96	0.64	3.91	0.50	6.29
1317	3.44	4.83	5.24	7.13	0.81	4.37	4.83	7.21	0.78	5.08	4.48	6.18
1415	0.45	5.95	5.40	11.68	1.24	4.87	3.91	10.39	1.05	4.25	3.40	9.68
1435	0.66	4.69	6.32	11.95	2.09	3.55	5.53	10.91	1.87	1.86	5.45	9.72
1530	2.44	6.35	5.02	9.06	0.41	4.55	4.31	8.16	1.18	5.20	3.41	7.33
1688	2.80	2.32	6.19	7.80	0.48	1.64	4.84	7.65	0.26	2.03	5.12	6.62
1821	2.89	4.54	7.87	11.15	0.94	4.31	6.55	9.18	0.81	3.18	5.69	9.21
2102	3.63	3.92	5.49	6.01	0.16	4.04	4.98	5.68	1.63	2.78	4.13	4.67
2259	2.22	2.57	5.33	5.73	2.14	2.23	3.89	5.06	0.26	2.14	4.14	5.04
2289	0.51	1.86	5.63	5.26	0.25	1.96	4.05	5.05	0.90	2.28	3.39	4.09
2323	0.77	2.52	2.74	4.97	1.94	2.56	2.10	5.16	0.45	2.43	1.93	3.98
2345	1.71	1.15	5.08	4.60	1.59	1.18	4.86	3.77	0.85	1.34	4.41	4.07
2404	1.23	2.29	3.98	4.33	0.79	1.07	2.14	4.91	0.75	1.71	2.68	4.37
2472	0.93	2.60	4.18	3.49	0.36	3.57	3.95	4.00	1.00	2.92	2.89	3.87
2514	0.72	2.31	4.21	6.34	1.23	3.20	3.46	6.33	0.94	2.76	2.83	5.61
2617	0.59	2.04	1.62	4.97	1.73	1.99	2.19	5.35	1.12	2.49	1.51	4.45
2791	0.05	1.63	4.01	4.03	2.77	2.12	3.49	3.63	0.15	1.88	3.04	3.15
2850	2.46	0.71	3.82	4.30	0.87	1.08	3.81	4.15	0.81	2.23	2.15	3.94
4264	1.83	0.72	1.20	2.68	1.83	0.72	1.20	2.68	0.59	1.36	1.41	2.20
<i>media</i>	1.69	3.10	4.50	6.74	1.10	2.91	3.95	6.03	0.94	2.84	3.46	5.50

Tabella 85 – Errore relativo restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.5.

Gradi Giorno	$P_{risc-min}$				$P_{risc-med}$				$P_{risc-max}$			
	Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
568	0.44	8.84	9.06	14.28	1.52	9.13	7.78	11.01	1.92	9.13	7.78	14.06
707	1.67	3.83	12.73	11.15	3.06	3.86	9.16	8.66	2.88	3.91	10.97	10.24
751	1.59	5.03	13.29	16.25	0.25	4.42	8.80	10.93	2.94	4.88	10.85	14.11
990	1.07	7.13	10.27	15.36	1.65	5.76	4.88	9.96	1.38	4.59	7.70	12.82
1034	1.85	8.77	10.97	16.64	0.80	8.70	10.31	11.17	1.55	7.00	8.44	13.20
1142	2.13	5.59	7.50	12.66	1.74	4.99	7.22	7.43	1.86	5.54	5.81	9.98
1185	1.30	4.48	8.86	15.08	0.46	4.14	7.77	10.90	1.26	3.69	6.87	12.40
1317	2.60	8.56	8.54	14.23	0.28	7.82	7.67	10.62	0.85	8.23	6.90	11.95
1415	0.86	5.57	9.74	11.80	1.80	4.39	7.75	13.89	1.98	3.71	6.92	12.75
1435	0.14	10.39	12.00	12.82	2.49	8.72	10.10	6.88	2.34	6.77	9.43	8.77
1530	1.86	4.68	11.75	14.49	0.35	2.90	10.26	12.65	1.69	3.42	8.96	11.33
1688	1.95	5.73	11.22	13.90	0.47	4.67	9.07	12.69	0.64	4.76	8.86	11.14
1821	2.28	3.26	12.86	12.45	1.08	3.32	10.92	9.83	1.59	2.03	9.71	9.49
2102	5.59	6.05	9.51	12.57	0.68	5.89	8.59	11.67	2.23	4.22	7.11	9.82
2259	3.45	4.80	7.40	7.82	4.71	4.61	5.73	6.82	0.06	4.22	5.57	6.25
2289	1.16	3.25	8.61	7.53	1.04	3.17	6.76	6.94	1.27	3.20	5.61	5.38
2323	1.41	2.55	7.49	9.36	2.92	2.59	6.55	9.15	0.82	2.25	5.88	7.40
2345	2.30	3.11	6.71	7.86	3.32	3.03	6.25	6.62	0.97	2.89	5.42	6.24
2404	2.31	4.13	7.74	12.31	2.59	2.82	5.66	12.31	0.92	3.13	5.70	10.98
2472	1.94	4.25	7.56	8.79	1.39	5.08	7.03	8.78	1.44	4.16	5.51	7.90
2514	0.22	3.07	6.95	9.46	2.38	4.01	5.98	9.12	0.98	3.33	4.99	7.90
2617	0.00	2.72	3.97	6.64	3.29	2.98	4.28	6.75	0.89	3.24	3.24	5.44
2791	0.31	2.72	6.52	7.74	4.63	3.68	5.79	6.98	0.61	3.20	4.98	5.91
2850	1.81	0.65	6.12	5.72	2.37	2.17	5.91	5.34	0.40	3.10	3.96	4.77
4264	1.41	1.55	2.21	4.04	1.41	1.55	2.21	4.04	0.57	2.13	2.17	3.25
media	1.67	4.83	8.78	11.24	1.87	4.58	7.30	9.25	1.36	4.27	6.77	9.34

### 2.5.3 Raffrescamento

Le indagini sul servizio energetico di climatizzazione estiva, ossia l'impianto di raffrescamento, devono essere introdotte dalle seguenti precisazioni:

1. la normativa tecnica attualmente vigente [61-66] permette una stima approssimata del consumo energetico per il raffrescamento di un edificio a causa delle semplificazioni di calcolo adottate, ossia il calcolo medio mensile;
2. l'analisi del comportamento del sistema edificio-impianto nel periodo estivo necessiterebbe di programmi di calcolo più sofisticati che permettano di tenere conto dell'effettiva inerzia termica dell'involucro edilizio, ad esempio attraverso il metodo di calcolo orario o dinamico.

Su queste premesse e come anticipato durante la valutazione dei profili di utilizzo tailored per il raffrescamento (2.4.5), i risultati associati a questo servizio potrebbero divergere significativamente dai consumi reali, a causa delle semplificazione adottate nell'approccio di calcolo.

Tuttavia, lo scopo del presente lavoro è quello di determinare delle correlazioni tra asset rating e tailored rating, a partire dai risultati ottenuti dal primo, senza sviluppare una nuova metodologia di calcolo.

La procedura adottata per l'identificazione delle relazioni matematiche per il servizio energetico è analoga a quella descritta in precedenza per quello di riscaldamento. Tuttavia, come anticipato al paragrafo 2.4.1, in questo caso non ha senso svolgere le analisi in funzione dei Gradi Giorno, che descrivono le condizioni

climatiche invernali della località. Analisi preliminari hanno evidenziato, infatti, una non chiara dipendenza dei consumi da questo parametro invernale.

Per questo motivo, si è deciso di fare riferimento ad un parametro equivalente ai Gradi Giorno invernali che dipendesse dai valori medi mensili di temperatura estiva, considerando anche l'escursione giornaliera, in base ai dati forniti dalla normativa [67]. Per la definizione di questo parametro, si è considerato un andamento della temperatura esterna di tipo sinusoidale con valore medio pari al valore mensile della località in esame.

Su queste basi, sono state calcolate le differenze positive rispetto la temperatura interna di progetto ( $26^{\circ}\text{C}$ ), che, sommate per ciascun mese, hanno portato ai Gradi Giorno estivi utilizzati nel presente lavoro. A titolo esemplificativo, si riporta in Figura 107 il confronto dei Gradi Giorno invernali ( $\text{GG}_i$ ) con quelli estivi ( $\text{GG}_e$ ) determinati con la procedura descritta.

I valori dei  $\text{GG}_i$  sono sensibilmente differenti dai  $\text{GG}_e$ , che non seguono un andamento crescente di tipo lineare come quelli invernali, ma presentano un trend disordinato con picchi maggiori nelle località del centro Italia.

A partire dal parametro estivo, si è quindi proceduto con l'analisi dei casi studio E1.i ed E1.t in tutte le loro configurazioni dimensionali nelle venticinque città prescelte, per i quattro livelli di isolamento (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2, Liv-Iso-3), in base all'asset rating e ai tre profili di utilizzo tailored ( $P_{\text{raff-min}}$ ,  $P_{\text{raff-med}}$ ,  $P_{\text{raff-max}}$ ) e considerando una macchina frigorifera avente le caratteristiche riportate in Tabella 37.

Le analisi riportate, inoltre, prescindono dalla tipologia costruttiva adottata ( $E_M$  e  $E_{CA}$ ) in quanto i valori di energia primaria non rinnovabile a cui si è giunti sono molto simili per entrambe le tipologie; in particolare, per  $E_{CA}$  si è riscontrato un consumo leggermente superiore a  $E_M$  (l'opposto di quello che accadeva per il servizio riscaldamento) ma comunque molto prossimo. Pertanto si è deciso di definire delle relazioni matematiche a partire dal valore medio derivante da entrambe, approccio validato anche dall'errore relativo medio ottenuto che risulta essere analogo per le due tipologie costruttive.

Le indagini hanno riguardato i valori di energia primaria non rinnovabile, essendo più significativa per la configurazione impiantistica indagata, esattamente come fatto per la pompa di calore.

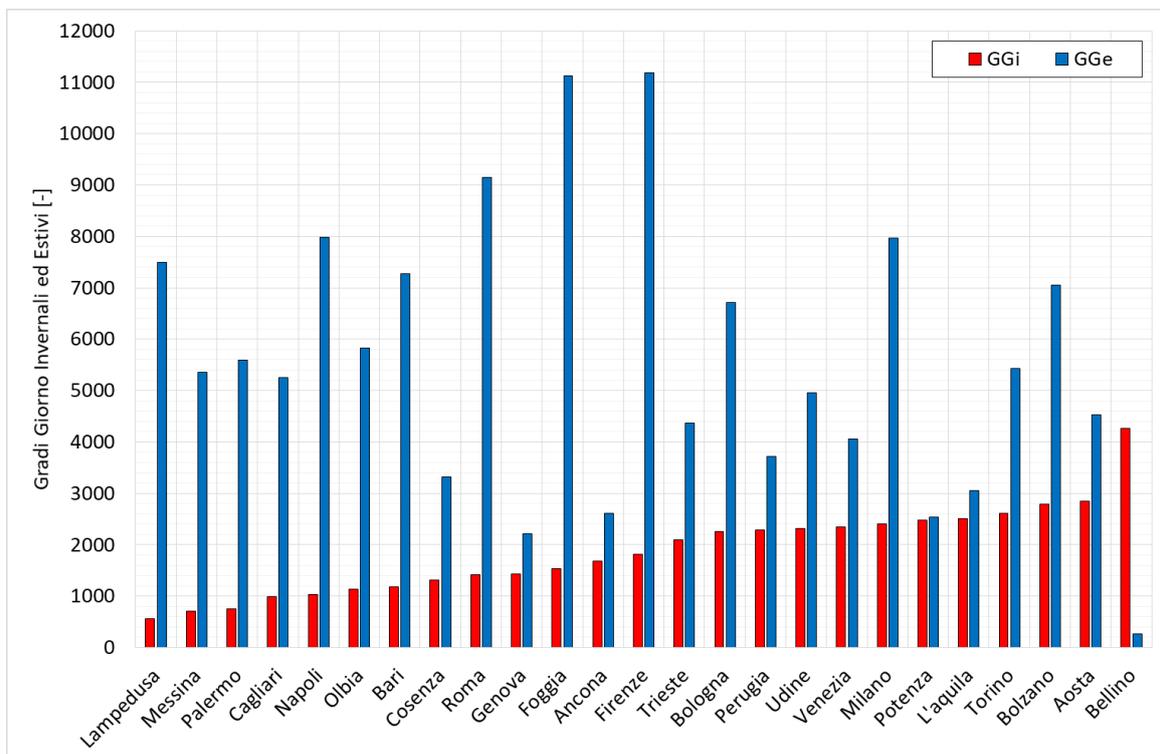


Figura 107 – Confronto tra Gradi Giorno invernali ( $\text{GG}_i$ ) e Gradi Giorno Estivi ( $\text{GG}_e$ ) per le località prescelte.

Le analisi sono state svolte seguendo il seguente approccio:

1. analisi dell'energia primaria non rinnovabile calcolata con l'asset rating e con i tre tailored dei casi studio per singola destinazione d'uso con la macchina frigorifera prescelta, raggruppati per livello di isolamento per ciascuno dei venticinque comuni selezionati al paragrafo 2.4.1;
2. confronto dei risultati (energia primaria non rinnovabile) ottenuti con la metodologia asset e con quella tailored;
3. calcolo dell'indicatore energetico normalizzato (IEN), attraverso la normalizzazione dei risultati ottenuti con i profili tailored rispetto a:
  - a. energia primaria non rinnovabile calcolata secondo l'asset rating;
  - b. potenza nominale e l'EER della macchina al 100%;
  - c. numero di ore di accensione del profilo tailored considerato;
  - d. Gradi Giorno Estivi teorici della località di riferimento.
4. calcolo dei valori minimo, medio e massimo dell'indicatore IEN per ogni località e profilo;
5. identificazione delle tre equazioni che approssimano i valori di cui al punto 4;
6. attraverso le equazioni di cui al punto 5, calcolo dei valori dell'indicatore IEN per tutte le località di simulazione, per ogni caso studio caratterizzato dallo stesso livello di isolamento e profilo di utilizzo;
7. prima verifica dei valori calcolati al punto 6 con quelli restituiti per lo stesso caso studio dalle simulazioni energetiche;
8. identificazione dei coefficienti di correzione delle equazioni di cui al punto 5 con lo scopo di minimizzare l'errore di cui al punto 7;
9. seconda verifica dei risultati delle tre equazioni moltiplicate per i rispettivi coefficienti di correzione rispetto i valori restituiti dalle simulazioni energetiche per lo stesso caso studio.

Come per il caso del servizio energetico di climatizzazione invernale, parametri quali volume riscaldato, superficie disperdente o coefficiente di scambio termico medio non sono stati considerati nella normalizzazione di cui al punto 3, in quanto implicitamente considerati nell'indicatore energetico del punto 3.a. Anche le caratteristiche dell'impianto, previste al punto 3.b, potrebbero essere escluse per lo stesso motivo; tuttavia, le analisi sono state svolte in modo tale da determinare delle relazioni che dipendano dalla potenza e dall'EER della macchina frigorifera in modo da poter estendere la loro applicazione anche a macchine frigorifere diverse.

In generale, il comportamento del servizio di climatizzazione estiva è opposto a quello invernale; in particolare all'aumentare del livello di isolamento si sono ottenuti valori crescenti del fabbisogno di energia; questo trend è legato proprio alla metodologia di calcolo che per gli edifici con livelli di isolamento maggiore determina un periodo di raffrescamento mediamente maggiore. A titolo esemplificativo in Figura 108 si evidenzia come, all'aumentare del livello di isolamento, l'energia primaria non rinnovabile tenda infatti ad aumentare in maniera non uniforme dipendendo dalle condizioni climatiche della località di simulazione.

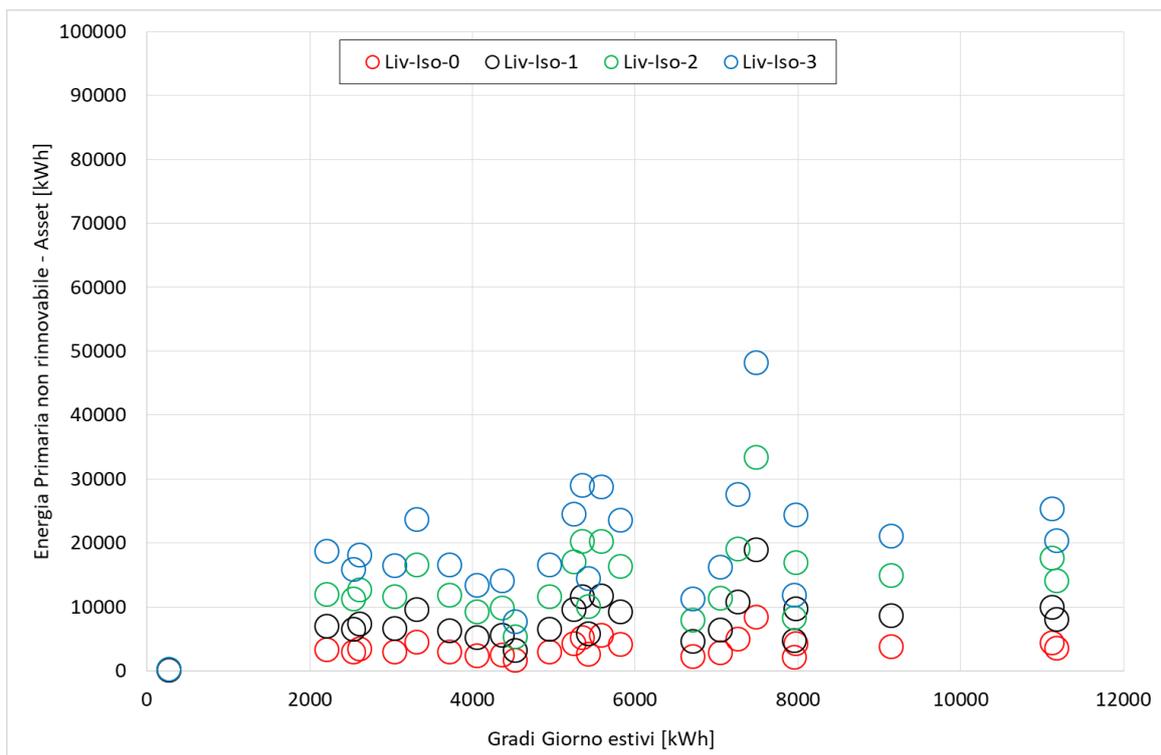


Figura 108 – Trend dell’energia primaria non rinnovabile in funzione della località di simulazione (riportata in termini di Gradi Giorno estivi) e del livello di isolamento dell’edificio.

### 2.5.3.1 Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-0

L’energia primaria non rinnovabile determinata con l’asset rating è mostrata in Figura 109 al variare dei Gradi Giorno Estivi dei venticinque comuni di simulazione prescelti e considerando il livello di isolamento Liv-Iso-0. Come anticipato, il consumo energetico non varia in maniera lineare con i Gradi Giorno Estivi e le configurazioni del caso studio E1.t.PU presentano un consumo mediamente superiore rispetto le altre casistiche.

Le analisi sono proseguite mettendo in relazione l’asset rating con i tre profili tailored precedentemente definiti ( $P_{\text{raff-min}}$ ,  $P_{\text{raff-med}}$  e  $P_{\text{raff-max}}$ ) i cui risultati sono stati normalizzati come specificato al paragrafo 2.5.3.

Per ciascun profilo tailored e per ogni località sono stati quindi individuati i valori minimo, medio e massimo dell’indicatore energetico normalizzato medio ( $IEN_{\text{medio}}$ ) ricavati a partire dai valori medi di tutti i casi studio analizzati, ottenendo il trend mostrato in Figura 110.

Come per il servizio di climatizzazione invernale, è stato possibile definire una famiglia di tre equazioni che lega l’asset rating con quello tailored, definite attraverso l’Equazione 13, dove  $IEN_x$  è espressa anche in questo caso dall’Equazione 11 in cui il pedice  $x$  rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell’indicatore calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  (Tabella 86) che variano in funzione del valore considerato.

$$EP_{\text{tailored}} = IEN_x \cdot GG_E \cdot I_{APE} \cdot h_{\text{impianto}} \cdot P_{n\text{impianto}} \cdot EER$$

Equazione 13

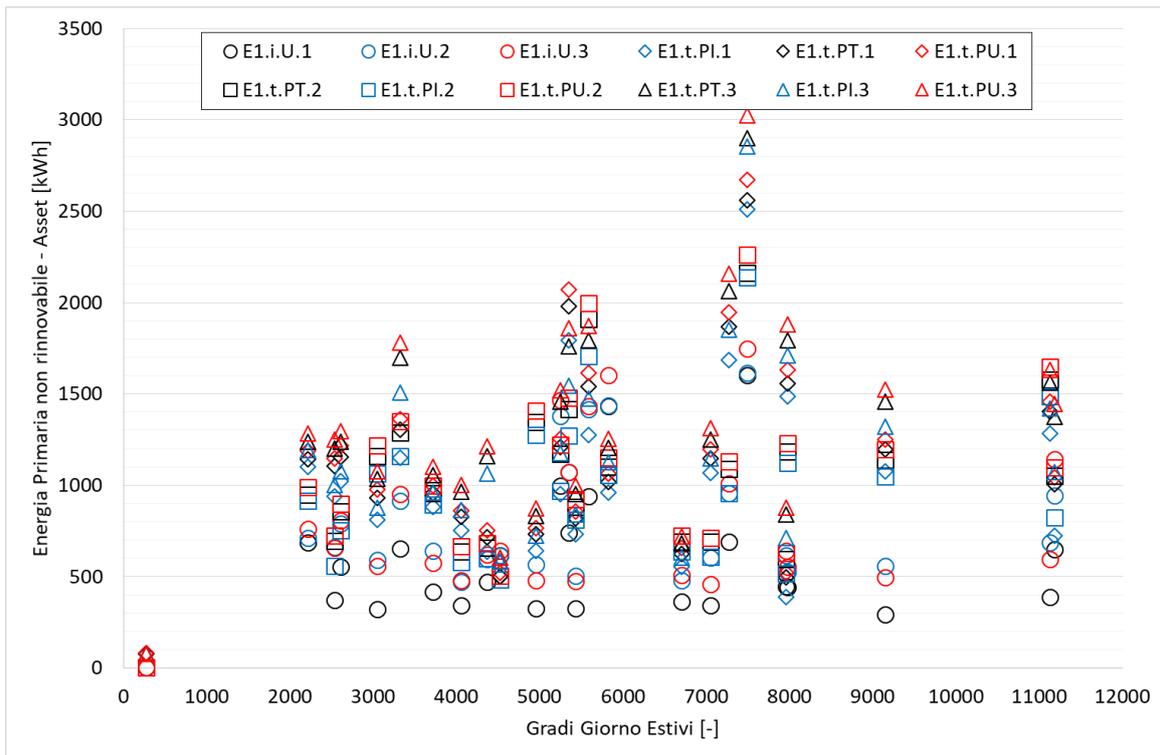


Figura 109 – Trend dell’energia primaria non rinnovabile calcolata con l’asset rating rispetto i Gradi Giorno Estivi della località di simulazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.

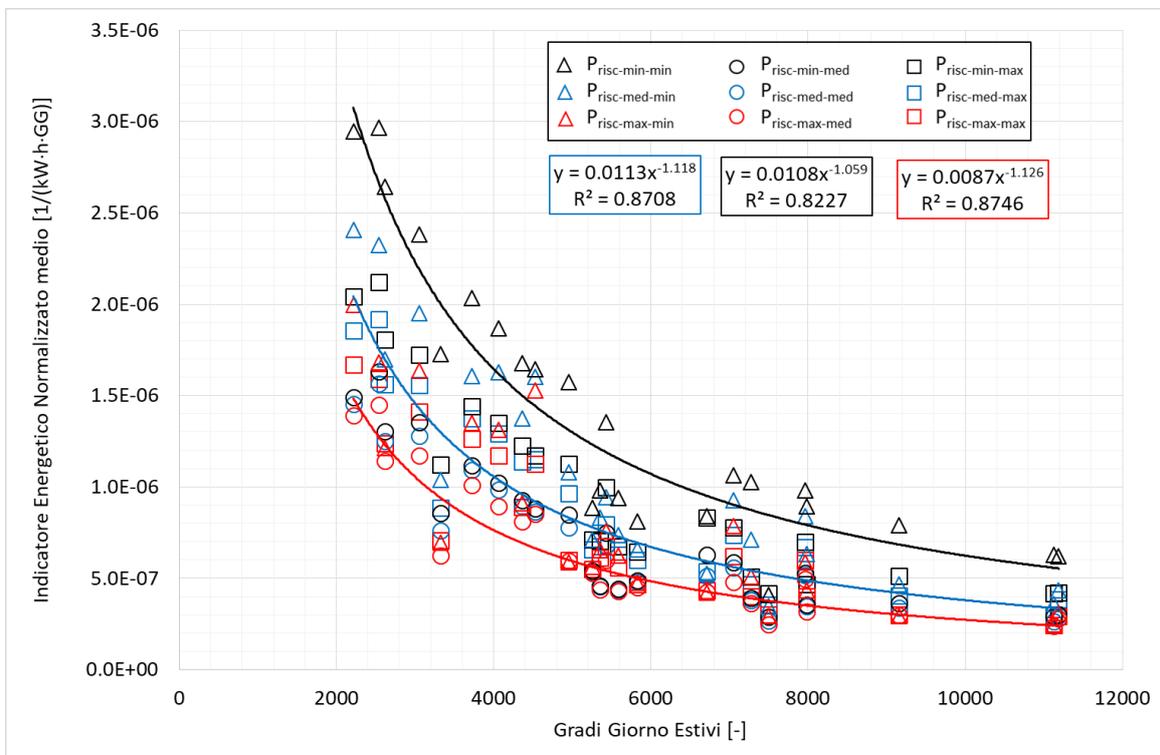


Figura 110 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.

Tabella 86 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-1		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0108	-1.059	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0113	-1.118	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0087	-1.126	IEN <sub>max</sub>

Una volta trovate le equazioni di correlazione, sono stati definiti dei coefficienti correttivi moltiplicativi delle equazioni per IEN<sub>med</sub>, IEN<sub>min</sub> ed IEN<sub>max</sub> con lo scopo di determinare un indicatore energetico normalizzato medio pesato che differisca il meno possibile da quello simulato in ogni caso studio considerato. L'approccio adottato è del tutto analogo a quello descritto nel paragrafo 2.5.2. In particolare, i coefficienti correttivi, riportati in Tabella 87, sono stati desunti a partire dai valori ricavati dalle verifiche delle tre equazioni per ogni caso studio e per ogni profilo di utilizzo tailored considerato (P<sub>raff-min</sub>, P<sub>raff-med</sub>, P<sub>raff-max</sub>).

Infine è stata condotta una verifica dei valori di energia primaria non rinnovabile ottenuti dalle equazioni moltiplicate per i rispettivi coefficienti correttivi con quelli restituiti dalle simulazioni energetiche effettuate. I risultati (Tabella 88) mostrano una perfetta correlazione tra equazioni di correlazione e simulazioni, con un errore relativo medio prossimo allo 2.3% per il profilo di utilizzo P<sub>raff-med</sub> e cresce fino al 5% per P<sub>raff-min</sub> con picchi massimi del 14-16% nelle città del centro Italia.

Tabella 87 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.

GG <sub>i</sub>	GG <sub>e</sub>	P <sub>raff-min</sub>			P <sub>raff-med</sub>			P <sub>raff-max</sub>		
		IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>	IEN <sub>med</sub>	IEN <sub>max</sub>	IEN <sub>min</sub>
568	7495	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.71
707	5352	0.12	0.88	0.00	0.00	0.53	0.47	0.00	0.00	0.84
751	5586	0.01	0.99	0.00	0.00	0.48	0.52	0.00	0.00	0.84
990	5250	0.00	0.68	0.32	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.96
1034	7981	0.30	0.70	0.00	0.00	0.62	0.38	0.00	0.01	0.99
1142	5827	0.00	0.80	0.20	0.00	0.43	0.57	0.00	0.00	0.97
1185	7270	0.37	0.63	0.00	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.99
1317	3325	0.00	0.13	0.87	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	0.80
1415	9151	0.00	0.92	0.08	0.00	0.68	0.32	0.00	0.30	0.70
1435	2216	0.33	0.67	0.00	0.00	0.61	0.39	0.00	0.00	0.99
1530	11130	0.00	0.78	0.22	0.00	0.41	0.59	0.00	0.20	0.80
1688	2614	0.00	0.87	0.13	0.00	0.60	0.40	0.00	0.05	0.95
1821	11187	0.40	0.60	0.00	0.17	0.83	0.00	0.00	0.60	0.40
2102	4367	0.67	0.33	0.00	0.25	0.75	0.00	0.00	0.75	0.25
2259	6709	0.00	0.53	0.47	0.00	0.52	0.48	0.00	0.45	0.55
2289	3723	0.70	0.30	0.00	0.34	0.66	0.00	0.00	0.88	0.12
2323	4951	0.30	0.70	0.00	0.11	0.89	0.00	0.00	0.66	0.34
2345	4058	0.97	0.03	0.00	0.43	0.57	0.00	0.00	0.84	0.16
2404	7962	1.03	0.00	0.00	0.58	0.42	0.00	0.10	0.90	0.00
2472	2541	0.50	0.50	0.00	0.13	0.87	0.00	0.00	0.63	0.37
2514	3049	0.65	0.35	0.00	0.13	0.87	0.00	0.00	0.63	0.37
2617	5427	0.37	0.63	0.00	0.03	0.97	0.00	0.00	0.62	0.38
2791	7050	1.02	0.00	0.00	0.53	0.47	0.00	0.04	0.96	0.00
2850	4528	1.12	0.00	0.00	0.42	0.58	0.00	0.00	0.80	0.20
4264	273	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00

Tabella 88 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-0.

$GG_i$	$GG_e$	$P_{raff-min}$	$P_{raff-med}$	$P_{raff-max}$
568	7495	0.8	0.8	1.1
707	5352	3.3	0.8	-0.9
751	5586	1.2	0.6	0.0
990	5250	-0.1	0.0	0.5
1034	7981	5.3	-0.1	-1.1
1142	5827	-0.1	1.0	-0.1
1185	7270	11.1	2.7	-0.4
1317	3325	11.0	5.4	2.1
1415	9151	14.0	9.0	2.8
1435	2216	0.9	0.7	-0.4
1530	11130	1.6	3.6	1.4
1688	2614	10.9	7.3	0.6
1821	11187	2.5	0.8	0.1
2102	4367	4.3	2.1	0.6
2259	6709	8.6	8.5	7.3
2289	3723	2.0	0.4	-0.6
2323	4951	15.8	13.2	7.9
2345	4058	2.7	-0.6	-0.5
2404	7962	8.7	2.0	-0.5
2472	2541	5.7	0.9	0.0
2514	3049	4.7	0.8	0.0
2617	5427	7.1	1.8	1.1
2791	7050	2.0	-2.1	-2.9
2850	4528	0.6	0.2	0.3
4264	273	0.6	-1.9	-1.9

### 2.5.3.2 Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-1

La seconda casistica analizzata è quella di edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1, per i quali, adottando la stessa metodologia di analisi descritta in 2.5.3, si è ottenuto l'andamento dell'indicatore energetico normalizzato medio ( $IEN_{medio}$ ) ricavato a partire dai valori medi di tutti i casi studio, mostrato in Figura 111. Anche in questo caso è quindi possibile correlare l'asset rating ai tre profili tailored attraverso una famiglia di tre equazioni esprimibili con l'Equazione 13, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11 in cui il pedice  $x$  rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  (Tabella 89) che variano in funzione del valore dell'indicatore ricercato.

I coefficienti correttivi moltiplicativi delle equazioni per  $IEN_{med}$ ,  $IEN_{min}$  ed  $IEN_{max}$  sono mostrati in Tabella 90 al variare dei Gradi Giorno estivi della località (per una maggiore chiarezza sono stati riportati anche i Gradi Giorno incavernali) e per ogni profilo di utilizzo tailored considerato ( $P_{raff-min}$ ,  $P_{raff-med}$ ,  $P_{raff-max}$ ).

Infine è stata condotta una verifica delle equazioni rispetto i risultati delle simulazioni energetiche ottenendo un errore relativo medio (Tabella 91) variabile tra il 7-11%, indicando in generale una sottostima dell'energia primaria. Si osservi, in particolare, come l'errore più elevato sia restituito sempre nelle località che presentano valori intermedi dei Gradi giorno Estivi con picchi massimi di errore dell'ordine di 20-25%.

Gli errori ottenuti risultano essere maggiori del servizio di climatizzazione invernale principalmente perché le stesse equazioni che si sono trovate presentano mediamente un valore di  $R^2$  maggiore di 0.75 ma minore di 0.9, comportando quindi già un'approssimazione anche del 20%. In considerazione però dei reali valori ottenuti nelle simulazioni energetiche, che risultano essere significativamente bassi (valore medio inferiore a 4000 kWh), si è deciso di considerare tollerabile questa discrepanza.

Qualora si dovesse riscontrare nel corso dell'ultima annualità una divergenza significativa con i dati sperimentali, si potrà prevedere di raffinare ulteriormente le equazioni matematiche trovate per gli edifici identificati con Liv-Iso-1.

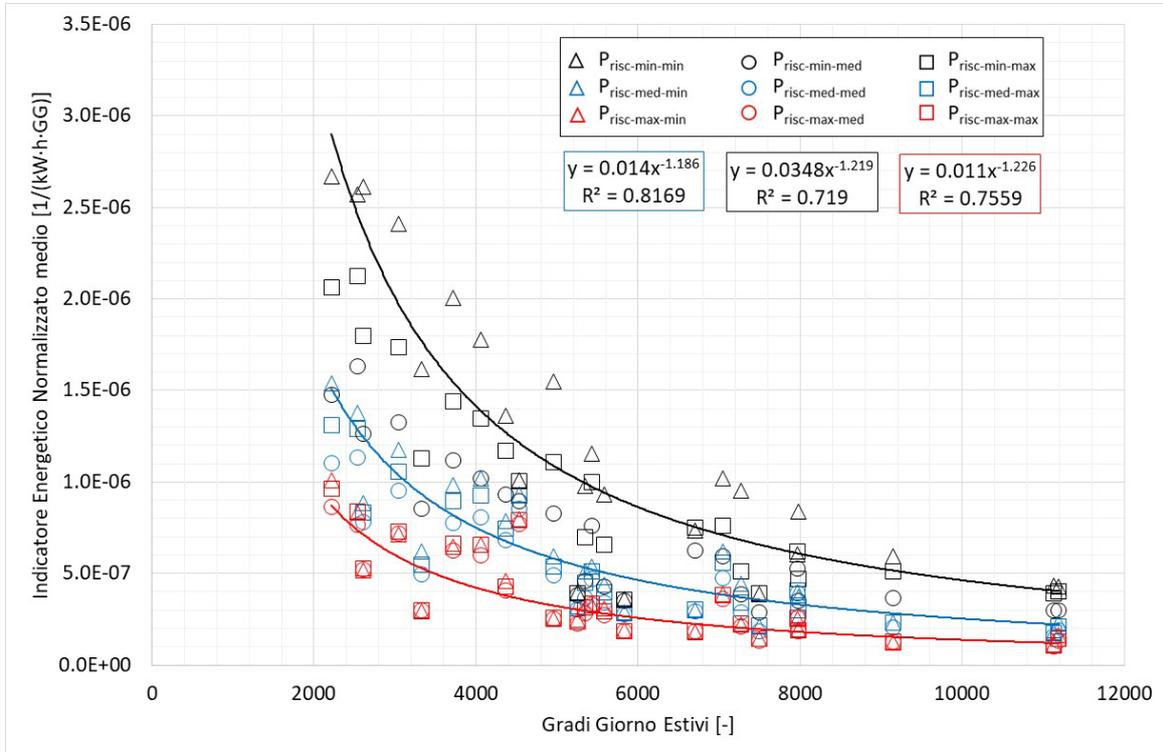


Figura 111 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

Tabella 89 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-1		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0348	-1.219	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0140	-1.186	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0110	-1.226	IEN <sub>max</sub>

Tabella 90 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

<i>GG<sub>i</sub></i>	<i>GG<sub>e</sub></i>	<i>P<sub>raff-min</sub></i>			<i>P<sub>raff-med</sub></i>			<i>P<sub>raff-max</sub></i>		
		<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>	<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>	<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>
568	7495	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.85
707	5352	0.00	0.58	0.42	0.00	0.42	0.58	0.00	0.22	0.78
751	5586	0.00	0.54	0.46	0.00	0.38	0.62	0.00	0.21	0.79
990	5250	0.00	0.06	0.94	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.98
1034	7981	0.00	0.75	0.25	0.00	0.50	0.50	0.00	0.40	0.60
1142	5827	0.00	0.09	0.91	0.00	0.04	0.96	0.00	0.03	0.97
1185	7270	0.00	0.81	0.19	0.00	0.51	0.49	0.00	0.35	0.65
1317	3325	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	0.81	0.00	0.00	0.78
1415	9151	0.00	0.26	0.74	0.00	0.23	0.77	0.00	0.18	0.82
1435	2216	0.00	0.76	0.24	0.00	0.48	0.52	0.00	0.26	0.74
1530	11130	0.00	0.23	0.77	0.00	0.17	0.83	0.00	0.11	0.89
1688	2614	0.00	0.08	0.92	0.00	0.04	0.96	0.00	0.02	0.98
1821	11187	0.00	0.99	0.01	0.00	0.75	0.25	0.00	0.62	0.38
2102	4367	0.06	0.94	0.00	0.00	0.95	0.05	0.00	0.81	0.19
2259	6709	0.00	0.08	0.92	0.00	0.08	0.92	0.00	0.07	0.93
2289	3723	0.03	0.97	0.00	0.00	0.95	0.05	0.00	0.74	0.26
2323	4951	0.00	0.44	0.56	0.00	0.38	0.62	0.00	0.33	0.67
2345	4058	0.30	0.70	0.00	0.17	0.83	0.00	0.05	0.95	0.00
2404	7962	0.18	0.82	0.00	0.18	0.82	0.00	0.16	0.84	0.00
2472	2541	0.00	0.82	0.18	0.00	0.70	0.30	0.00	0.50	0.50
2514	3049	0.00	0.85	0.15	0.00	0.75	0.25	0.00	0.65	0.35
2617	5427	0.00	0.65	0.35	0.03	0.45	0.55	0.00	0.52	0.48
2791	7050	0.45	0.55	0.00	0.34	0.66	0.00	0.19	0.81	0.00
2850	4528	0.52	0.48	0.00	0.48	0.52	0.00	0.38	0.62	0.00
4264	273	0.37	0.62	0.05	0.00	0.92	0.08	0.00	0.92	0.08

Tabella 91 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

$GG_i$	$GG_e$	$P_{raff-min}$	$P_{raff-med}$	$P_{raff-max}$
568	7495	10.5	10.5	6.7
707	5352	15.9	11.8	5.6
751	5586	9.7	6.6	2.5
990	5250	0.3	0.1	-0.1
1034	7981	7.7	6.4	5.0
1142	5827	1.2	0.6	0.5
1185	7270	23.0	16.6	10.3
1317	3325	18.3	16.3	15.0
1415	9151	16.8	16.4	14.6
1435	2216	3.6	3.3	3.5
1530	11130	0.9	0.8	2.1
1688	2614	12.8	13.2	12.5
1821	11187	7.2	4.4	3.6
2102	4367	11.4	9.5	8.2
2259	6709	16.9	16.9	16.5
2289	3723	14.7	11.7	6.0
2323	4951	19.1	18.9	18.4
2345	4058	14.0	10.0	5.6
2404	7962	11.4	11.4	11.0
2472	2541	18.0	14.6	10.1
2514	3049	15.7	13.2	10.6
2617	5427	16.1	14.8	13.3
2791	7050	18.9	13.7	7.3
2850	4528	0.5	0.1	-0.2
4264	273	-7.6	-6.5	-6.5

### 2.5.3.3 Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-2

L'energia primaria non rinnovabile determinata con l'asset rating e i profili di utilizzo tailored è stata confrontata al variare della località considerando edifici identificati con un livello di isolamento Liv-Iso-2.

Adottando la stessa metodologia di normalizzazione (paragrafo 2.5.3) si sono ricavati i valori minimo, medio e massimo dell'indicatore energetico normalizzato medio ( $IEN_{medio}$ ) ricavati a partire dai valori medi di tutti i casi studio analizzati, ottenendo il trend mostrato in Figura 112.

Il grafico conferma come anche in questo caso sia possibile correlare l'asset rating al tailored attraverso una famiglia di tre equazioni esprimibili con l'Equazione 13, dove  $IEN_x$  è espressa dall'Equazione 11 in cui il pedice  $x$  rappresenta il valore minimo, medio o massimo desiderato dell'indicatore calcolabile attraverso i coefficienti  $a$  e  $b$  (Tabella 92) che variano in funzione dell'indicatore ricercato.

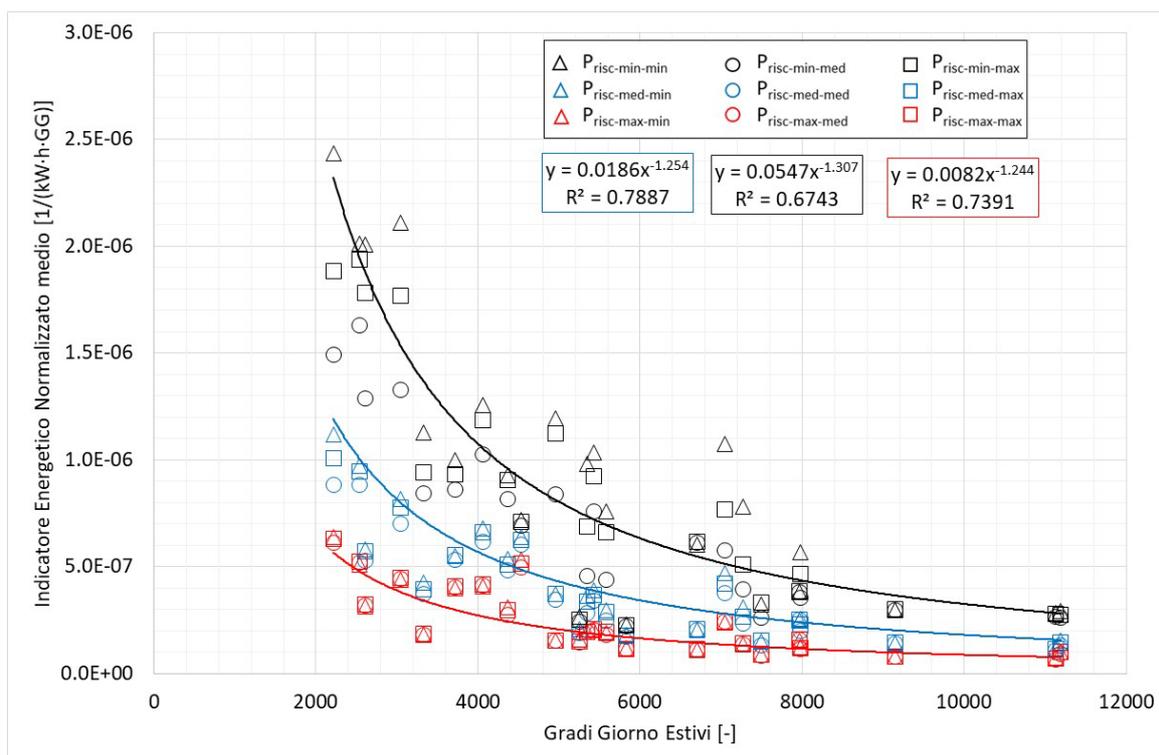


Figura 112 – Trend dell’indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

Tabella 92 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-2		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0547	-1.307	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0186	-1.254	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0082	-1.244	IEN <sub>max</sub>

Seguendo sempre la stessa metodologia di analisi, si sono quindi desunti anche per questa categoria di edifici dei coefficienti correttivi moltiplicativi delle equazioni per IEN<sub>med</sub>, IEN<sub>min</sub> ed IEN<sub>max</sub>; questi sono riportati in Tabella 93 al variare della località di simulazione e per i tre profili di utilizzo tailored considerati (P<sub>raff-min</sub>, P<sub>raff-med</sub>, P<sub>raff-max</sub>).

Infine è stata condotta una verifica delle equazioni ottenendo un errore relativo medio variabile tra il 10-12% con picchi però anche del 20-25% per limitati casi corrispondenti a bassi valori di energia primaria non rinnovabile (Tabella 94). Gli errori ottenuti risultano essere maggiori rispetto le precedenti casistiche soprattutto perché le equazioni che si sono trovate presentano mediamente un valore di R<sup>2</sup> minore di 0.8, comportando quindi già un’ approssimazione nei risultati del 20-30%. Qualora si dovesse riscontrare nel corso dell’ultima annualità una divergenza significativa con i dati sperimentali, si potrà prevedere di raffinare ulteriormente le equazioni matematiche trovate per gli edifici identificati con Liv-Iso-2.

Tabella 93 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

<i>GG<sub>i</sub></i>	<i>GG<sub>e</sub></i>	<i>P<sub>raff-min</sub></i>			<i>P<sub>raff-med</sub></i>			<i>P<sub>raff-max</sub></i>		
		<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>	<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>	<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>
568	7495	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.91
707	5352	0.00	0.43	0.57	0.00	0.38	0.62	0.00	0.28	0.72
751	5586	0.00	0.42	0.58	0.00	0.38	0.62	0.00	0.26	0.74
990	5250	0.00	0.07	0.93	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.96
1034	7981	0.00	0.58	0.42	0.00	0.45	0.55	0.00	0.37	0.63
1142	5827	0.00	0.04	0.96	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
1185	7270	0.00	0.63	0.37	0.00	0.51	0.49	0.00	0.44	0.56
1317	3325	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.78
1415	9151	0.00	0.15	0.85	0.00	0.15	0.85	0.00	0.15	0.85
1435	2216	0.00	0.52	0.48	0.00	0.42	0.58	0.00	0.32	0.68
1530	11130	0.00	0.23	0.77	0.00	0.16	0.84	0.00	0.13	0.87
1688	2614	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.99
1821	11187	0.00	0.90	0.10	0.00	0.72	0.28	0.00	0.61	0.39
2102	4367	0.00	0.91	0.09	0.00	0.77	0.23	0.00	0.70	0.30
2259	6709	0.00	0.04	0.96	0.00	0.04	0.96	0.00	0.04	0.96
2289	3723	0.00	0.70	0.30	0.00	0.68	0.32	0.00	0.66	0.34
2323	4951	0.00	0.30	0.70	0.00	0.29	0.71	0.00	0.26	0.74
2345	4058	0.10	0.90	0.00	0.06	0.94	0.00	0.01	0.99	0.00
2404	7962	0.00	0.97	0.03	0.00	0.98	0.02	0.00	0.97	0.03
2472	2541	0.00	0.57	0.43	0.00	0.52	0.48	0.00	0.48	0.52
2514	3049	0.00	0.60	0.40	0.00	0.55	0.45	0.00	0.51	0.49
2617	5427	0.00	0.48	0.52	0.03	0.33	0.67	0.00	0.39	0.61
2791	7050	0.36	0.64	0.00	0.26	0.74	0.00	0.19	0.81	0.00
2850	4528	0.38	0.62	0.00	0.32	0.68	0.00	0.28	0.72	0.00
4264	273	0.50	0.50	0.00	0.07	0.93	0.00	0.07	0.93	0.00

Tabella 94 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-2.

$GG_i$	$GG_e$	$P_{\text{raff-min}}$	$P_{\text{raff-med}}$	$P_{\text{raff-max}}$
568	7495	15.7	15.7	11.5
707	5352	17.8	17.2	13.1
751	5586	12.6	10.8	7.1
990	5250	0.8	0.2	0.3
1034	7981	11.5	7.9	7.7
1142	5827	1.9	1.1	0.2
1185	7270	24.3	22.5	19.9
1317	3325	20.0	19.1	18.4
1415	9151	16.9	16.9	16.9
1435	2216	5.8	5.3	4.6
1530	11130	2.6	0.5	0.3
1688	2614	13.6	13.8	13.6
1821	11187	10.3	7.1	4.8
2102	4367	14.1	12.4	10.5
2259	6709	18.0	18.0	18.0
2289	3723	10.5	10.2	9.5
2323	4951	18.8	19.0	19.3
2345	4058	15.7	14.9	13.0
2404	7962	11.7	11.5	11.7
2472	2541	21.1	20.1	18.6
2514	3049	17.3	16.4	14.8
2617	5427	18.7	17.7	16.8
2791	7050	22.1	20.1	18.1
2850	4528	0.2	-0.4	-0.1
4264	273	-8.8	-6.9	-6.9

#### 2.5.3.4 Categoria E.1 e livello di isolamento Liv-Iso-3

L'ultima categoria indagata riguarda gli edifici di nuova costruzione, per i quali si sono riscontrate richieste di energia primaria superiori rispetto le precedenti configurazioni di edificio. L'energia primaria non rinnovabile determinata applicando i tre profili di utilizzo è stata normalizzata rispetto i parametri definiti in 2.5.3 ottenendo lo stesso trend dell'indicatore energetico normalizzato medio ( $IEN_{\text{medio}}$ ), mostrato in Figura 113, osservato nei casi precedenti. I valori di  $R^2$  ottenuti per questa configurazione risultano essere analoghi a quelli evinti per la configurazione Liv-Iso-2.

Anche in questo caso, è stata trovata un sistema di tre equazioni esprimibili con l'Equazione 13, dove  $IEN_x$  è determinabile a partire dai coefficienti  $a$  e  $b$  riportati in Tabella 95 in funzione del valore ricercato dell'indicatore stesso.

I coefficienti correttivi moltiplicativi delle equazioni per  $IEN_{\text{med}}$ ,  $IEN_{\text{min}}$  ed  $IEN_{\text{max}}$  sono mostrati in Tabella 96 per i tre profili di utilizzo tailored considerati ( $P_{\text{raff-min}}$ ,  $P_{\text{raff-med}}$ ,  $P_{\text{raff-max}}$ ).

Anche in questo caso, si è condotta una verifica delle equazioni trovate e quindi dei risultati restituiti rispetto ai valori di energia primari non rinnovabile ottenuti dalle simulazioni energetiche (Tabella 97). L'errore medio ottenuto è dell'ordine del 12%, quindi in linea con quello riscontrato nel livello Liv-Iso-2, con picchi anche in questo caso del 20-25% riscontrati sempre per bassi valori dell'indicatore di energia primaria asset. Anche per gli edifici identificati con Liv-Iso-3, si ritiene che questa discrepanza sia principalmente legata al valore di  $R^2$  delle equazioni trovate che risulta essere inferiore a 0.8, comportando quindi già un'approssimazione nei risultati superiore al 20%. Pertanto, se nell'arco della terza annualità si dovesse riscontrare una divergenza significativa anche con i dati sperimentali, si potrà prevedere di raffinare ulteriormente le equazioni matematiche trovate per gli edifici identificati con Liv-Iso-3.

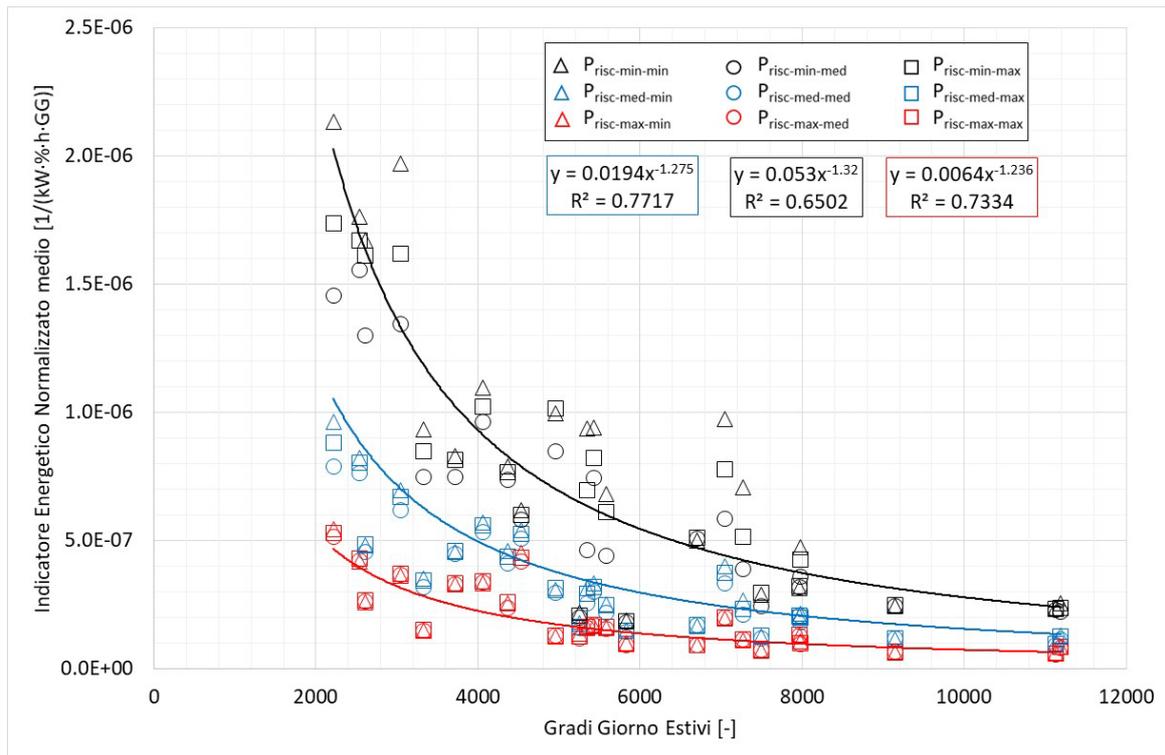


Figura 113 – Trend dell'indicatore energetico normalizzato medio tailored rispetto i Gradi Giorno Estivi: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

Tabella 95 – Coefficienti a e b in funzione del valore ricercato.

Valore ricercato	Livello di isolamento Liv-Iso-3		Codice equazione
	a	b	
minimo	0.0064	-1.236	IEN <sub>min</sub>
medio	0.0196	-1.275	IEN <sub>med</sub>
massimo	0.0530	-1.320	IEN <sub>max</sub>

Tabella 96 – Coefficienti moltiplicativi di correzione delle equazioni di correlazione: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-3.

<i>GG<sub>i</sub></i>	<i>GG<sub>e</sub></i>	<i>P<sub>raff-min</sub></i>			<i>P<sub>raff-med</sub></i>			<i>P<sub>raff-max</sub></i>		
		<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>	<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>	<i>IEN<sub>med</sub></i>	<i>IEN<sub>max</sub></i>	<i>IEN<sub>min</sub></i>
568	7495	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.93
707	5352	0.00	0.40	0.60	0.00	0.36	0.64	0.00	0.29	0.71
751	5586	0.00	0.38	0.62	0.00	0.35	0.65	0.00	0.26	0.74
990	5250	0.00	0.07	0.93	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.96
1034	7981	0.00	0.55	0.45	0.00	0.43	0.57	0.00	0.37	0.63
1142	5827	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.98
1185	7270	0.00	0.58	0.42	0.00	0.50	0.50	0.00	0.44	0.56
1317	3325	0.00	0.00	0.81	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.78
1415	9151	0.00	0.11	0.89	0.00	0.12	0.88	0.00	0.11	0.89
1435	2216	0.00	0.49	0.51	0.00	0.41	0.59	0.00	0.33	0.67
1530	11130	0.00	0.21	0.79	0.00	0.14	0.86	0.00	0.11	0.89
1688	2614	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.99
1821	11187	0.00	0.82	0.18	0.00	0.72	0.28	0.00	0.61	0.39
2102	4367	0.00	0.86	0.14	0.00	0.75	0.25	0.00	0.66	0.34
2259	6709	0.00	0.02	0.98	0.00	0.02	0.98	0.00	0.02	0.98
2289	3723	0.00	0.61	0.39	0.00	0.62	0.38	0.00	0.60	0.40
2323	4951	0.00	0.26	0.74	0.00	0.26	0.74	0.00	0.24	0.76
2345	4058	0.03	0.97	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.95	0.05
2404	7962	0.00	0.88	0.12	0.00	0.88	0.12	0.00	0.88	0.12
2472	2541	0.00	0.51	0.49	0.00	0.48	0.52	0.00	0.44	0.56
2514	3049	0.00	0.53	0.47	0.00	0.51	0.49	0.00	0.47	0.53
2617	5427	0.00	0.43	0.57	0.00	0.40	0.60	0.00	0.37	0.63
2791	7050	0.31	0.69	0.00	0.24	0.76	0.00	0.17	0.83	0.00
2850	4528	0.34	0.66	0.00	0.26	0.74	0.00	0.22	0.78	0.00
4264	273	0.65	0.35	0.00	0.16	0.84	0.00	0.16	0.84	0.00

Tabella 97 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni matematiche rispetto ai risultati delle simulazioni energetiche: edifici caratterizzati da un livello di isolamento Liv-Iso-1.

<i>GG<sub>i</sub></i>	<i>GG<sub>e</sub></i>	<i>P<sub>raff-min</sub></i>	<i>P<sub>raff-med</sub></i>	<i>P<sub>raff-max</sub></i>
568	7495	16.2	16.2	13.9
707	5352	18.0	17.5	15.7
751	5586	12.9	12.4	9.4
990	5250	1.8	-0.2	-0.4
1034	7981	12.7	8.5	8.2
1142	5827	1.9	0.5	0.5
1185	7270	24.5	23.4	22.0
1317	3325	20.0	19.7	18.9
1415	9151	17.0	16.9	17.0
1435	2216	6.8	5.1	5.5
1530	11130	4.0	1.1	0.6
1688	2614	13.0	13.4	13.4
1821	11187	10.9	8.6	5.8
2102	4367	15.0	13.2	11.9
2259	6709	18.0	18.0	18.0
2289	3723	10.6	10.4	10.0
2323	4951	18.9	18.9	19.3
2345	4058	16.3	15.6	14.9
2404	7962	11.8	11.8	11.8
2472	2541	21.4	21.0	19.9
2514	3049	17.6	17.0	16.1
2617	5427	19.0	18.3	17.6
2791	7050	22.3	21.5	19.8
2850	4528	-0.3	-0.1	0.1
4264	273	-5.1	-4.1	-4.1

### 2.5.3.5 Correlazione tra le diverse categorie di destinazione d'uso

Una volta determinate le equazioni di correlazione per il servizio di raffrescamento per il settore residenziale (categoria E.1), si è proceduto con la verifica della loro estensione alle due categorie selezionate: gli uffici (E.2) e le attività commerciali (E.5).

Anche per queste analisi, valgono le stesse considerazioni preliminari sulle ore di apertura fatte in 2.5.2.6. I risultati della trasposizione delle equazioni trovate per il settore residenziale sono mostrati rispettivamente in Tabella 98 e in Tabella 99 per le due categorie, in termini di errore relativo calcolato come differenza tra il valore simulato (simulazioni energetiche) e quello restituito alle equazioni di correlazione. La verifica mostra una buona correlazione tra i risultati con un errore relativo che varia da circa -9.0% a +1.5% per la categoria E.2 e da -18.7% a +2.1% per la categoria E.5. L'errore medio relativo ottenuto è tendenzialmente negativo, indicando cioè che le equazioni di correlazione trovate tendono a sovrastimare il risultato delle simulazioni energetiche.

In accordo con i risultati ottenuti, l'errore è stato considerato accettabile sebbene risulti essere maggiore di quello restituito per il settore residenziale. Pertanto, si è deciso, ai fini del presente lavoro, di considerare accettabili le relazioni matematiche anche per le altre categorie di utilizzo.

Si precisa, tuttavia, che qualora in fase di verifica delle relazioni matematiche con dati sperimentali, argomento del terzo anno di attività, si dovesse riscontrare una significativa divergenza dei risultati, sarà possibile raffinare ulteriormente i coefficienti correttivi o le stesse relazioni, fermo restando le criticità precedentemente riportate legate alla metodologia di calcolo del servizio energetico di raffrescamento.

Tabella 98 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.2.

GG <sub>i</sub>	GG <sub>e</sub>	<i>P<sub>risc-min</sub></i>				<i>P<sub>risc-med</sub></i>				<i>P<sub>risc-max</sub></i>			
		Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso			
		0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
568	7495	-4.4	-5.6	-7.5	-7.2	-4.4	-5.6	-7.5	-7.2	-2.0	-5.3	-6.4	-5.9
707	5352	-4.5	-5.6	-7.2	-7.3	-1.8	-4.2	-6.7	-6.7	-0.3	-4.3	-5.8	-5.6
751	5586	-4.2	-5.6	-7.3	-7.2	-3.3	-5.1	-7.1	-6.6	0.4	-4.9	-6.5	-4.9
990	5250	-6.9	-5.7	-7.9	-6.8	-5.1	-6.9	-7.8	-7.6	-0.5	-7.1	-7.6	-7.9
1034	7981	-5.4	-6.7	-7.4	-7.2	-2.5	-5.0	-6.9	-6.7	0.1	-5.0	-6.6	-5.7
1142	5827	-7.0	-6.9	-7.5	-7.1	-3.2	-7.0	-7.8	-8.2	-1.3	-7.0	-8.7	-8.1
1185	7270	-4.7	-6.3	-7.5	-6.7	-2.1	-4.2	-6.8	-6.9	-2.1	-4.3	-6.8	-6.4
1317	3325	-6.3	-6.8	-7.9	-7.8	-4.3	-6.4	-7.2	-6.3	-3.7	-5.8	-8.4	-8.0
1415	9151	-5.7	-6.7	-9.0	-7.4	-6.0	-6.4	-9.0	-8.4	-4.1	-6.8	-9.0	-7.4
1435	2216	-4.5	-6.7	-7.0	-6.9	-2.4	-5.1	-6.4	-7.3	-2.0	-4.3	-5.8	-5.8
1530	11130	-7.0	-5.2	-8.3	-6.0	-5.3	-5.9	-8.4	-7.0	-4.5	-5.8	-8.2	-7.2
1688	2614	-7.2	-6.8	-7.7	-8.5	-5.4	-7.2	-7.5	-7.4	-2.4	-6.7	-8.3	-7.7
1821	11187	-5.7	-5.6	-8.5	-7.1	-4.0	-5.4	-6.1	-5.5	-0.7	-5.2	-7.0	-6.2
2102	4367	-4.3	-5.8	-7.5	-6.4	-2.1	-5.6	-6.5	-6.3	-1.0	-5.0	-7.5	-6.0
2259	6709	-7.0	-7.2	-8.4	-7.9	-6.7	-7.2	-8.4	-7.9	-6.1	-7.1	-8.4	-7.9
2289	3723	-4.6	-6.3	-8.3	-7.2	-2.9	-5.7	-7.6	-8.1	0.0	-4.6	-7.7	-7.6
2323	4951	-6.7	-6.2	-8.2	-7.9	-4.0	-6.5	-7.6	-7.9	-1.9	-5.8	-6.9	-6.8
2345	4058	-3.0	-6.2	-8.2	-7.0	-1.1	-4.1	-7.4	-7.4	1.3	-4.3	-6.5	-6.0
2404	7962	-4.2	-6.9	-7.9	-7.3	-1.6	-6.9	-8.4	-7.3	0.4	-6.0	-7.9	-7.3
2472	2541	-4.2	-5.5	-8.0	-7.4	-3.6	-5.3	-7.1	-7.1	-1.2	-4.1	-7.5	-6.7
2514	3049	-4.2	-6.3	-7.5	-6.8	-2.2	-6.5	-6.6	-7.1	-1.7	-5.0	-7.4	-6.5
2617	5427	-4.5	-7.1	-7.9	-7.4	-3.3	-6.3	-7.9	-6.9	-3.6	-5.8	-6.7	-7.0
2791	7050	-3.3	-5.5	-7.3	-7.8	-0.6	-5.1	-6.7	-6.1	0.1	-3.7	-6.2	-6.2
2850	4528	-0.9	-5.6	-7.0	-6.9	1.2	-6.1	-7.9	-6.8	1.2	-4.3	-7.7	-6.8
4264	273	1.4	-0.3	0.0	0.7	-3.6	1.2	0.5	0.8	-3.6	1.2	0.5	0.8
<i>media</i>		-4.8	-6.0	-7.5	-6.9	-3.2	-5.5	-7.1	-6.8	-1.6	-5.1	-7.0	-6.4

Tabella 99 – Errore relativo medio restituito dalle equazioni di correlazione applicate agli edifici di categoria E.5.

GG <sub>i</sub>	GG <sub>e</sub>	<i>P<sub>risc-min</sub></i>				<i>P<sub>risc-med</sub></i>				<i>P<sub>risc-max</sub></i>			
		Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso				Livello di isolamento Liv-Iso			
		0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
568	7495	-10.0	-12.1	-16.7	-16.2	-10.0	-12.1	-16.7	-16.2	-4.8	-11.9	-13.7	-13.8
707	5352	-10.4	-13.1	-16.1	-16.2	-4.9	-10.2	-15.4	-15.2	-0.4	-10.1	-12.9	-13.4
751	5586	-9.9	-12.7	-16.5	-16.2	-7.7	-11.4	-15.6	-15.2	0.1	-10.6	-13.7	-11.8
990	5250	-15.8	-13.6	-16.2	-14.5	-11.9	-15.2	-16.8	-16.1	-3.0	-15.6	-16.8	-16.5
1034	7981	-12.5	-14.3	-15.8	-15.4	-6.0	-11.5	-15.2	-14.7	-1.0	-11.2	-13.8	-13.1
1142	5827	-16.1	-14.9	-17.4	-16.2	-9.3	-15.4	-17.5	-17.5	-3.0	-15.5	-18.6	-17.3
1185	7270	-11.2	-14.2	-16.3	-15.7	-5.4	-10.0	-14.8	-15.3	-5.3	-9.5	-14.1	-14.3
1317	3325	-15.4	-15.7	-17.7	-17.1	-9.9	-14.4	-15.9	-14.7	-8.1	-13.5	-17.5	-16.4
1415	9151	-13.9	-15.4	-18.7	-16.6	-13.9	-14.8	-18.7	-17.8	-9.1	-14.4	-18.7	-16.6
1435	2216	-10.1	-14.2	-14.6	-14.9	-5.3	-10.6	-14.1	-15.3	-4.2	-9.5	-12.2	-13.0
1530	11130	-14.9	-12.3	-16.9	-13.6	-12.4	-13.4	-17.4	-15.3	-11.3	-12.7	-17.4	-15.8
1688	2614	-16.0	-15.4	-17.2	-17.8	-12.1	-15.5	-16.7	-16.4	-5.0	-15.1	-17.3	-16.5
1821	11187	-13.4	-12.3	-17.9	-16.2	-10.3	-12.4	-13.5	-12.7	-2.4	-12.1	-14.4	-13.1
2102	4367	-10.1	-12.5	-15.3	-13.6	-5.8	-12.3	-13.9	-13.7	-2.0	-11.5	-15.0	-13.2
2259	6709	-16.2	-16.1	-18.3	-17.4	-15.9	-16.1	-18.3	-17.4	-14.5	-15.4	-18.3	-17.4
2289	3723	-10.0	-13.8	-18.1	-16.5	-7.6	-13.1	-17.0	-17.4	-1.2	-9.7	-16.9	-16.5
2323	4951	-15.1	-14.3	-17.8	-17.2	-10.5	-14.2	-16.9	-17.2	-4.7	-13.6	-15.7	-15.4
2345	4058	-7.6	-13.7	-17.3	-16.0	-3.9	-10.0	-16.0	-16.0	1.8	-9.4	-14.4	-14.0
2404	7962	-10.9	-15.7	-17.5	-16.5	-3.6	-15.7	-18.2	-16.5	0.2	-14.2	-17.5	-16.5
2472	2541	-10.4	-13.2	-16.7	-16.2	-7.6	-11.9	-15.4	-16.0	-4.3	-9.6	-15.8	-15.0
2514	3049	-9.5	-13.9	-16.9	-15.5	-4.8	-13.8	-15.4	-15.8	-4.5	-12.1	-15.9	-14.7
2617	5427	-11.8	-14.9	-17.1	-16.3	-7.7	-14.3	-16.6	-15.3	-8.2	-13.5	-15.1	-15.4
2791	7050	-7.0	-12.5	-16.4	-16.8	-3.2	-11.3	-14.3	-13.5	0.9	-8.3	-14.1	-13.6
2850	4528	-4.5	-13.0	-15.1	-14.4	2.1	-13.8	-16.4	-14.7	1.9	-9.5	-16.3	-14.9
4264	273	0.3	0.5	0.6	1.5	-4.6	1.8	1.1	1.5	-4.6	1.8	1.1	1.5
<i>media</i>		-7.7	-12.5	-15.4	-15.0	-3.9	-11.5	-15.0	-14.3	-11.3	-13.3	-16.2	-15.3

#### 2.5.4 Contributo dell'impianto Fotovoltaico

In accordo con [1] e al fine di rispettare le vigenti normative energetiche [11], l'impianto di produzione da energia rinnovabile è correntemente considerato nella realizzazione di nuove costruzioni; tuttavia, questo può presentare una potenza di picco molto variabile in funzione delle reali esigenze dell'utente finale. Questa grande variabilità rende quindi molto difficile la parametrizzazione del suo contributo.

Ai fini del presente lavoro, i casi studio sono stati configurati prendendo in considerazione anche un impianto fotovoltaico di potenza avariabile da 1 kW fino a 3 kW nel caso di nuove costruzioni (Liv-Iso-3) e impianti a pompa di calore; questi ultimi, infatti, sono la tipologia impiantistica che statisticamente è accoppiata a un impianto fotovoltaico riuscendone a sfruttare maggiormente l'energia prodotta.

L'energia prodotta non cambia con la metodologia di calcolo, ma varia l'effettiva copertura dell'impianto fotovoltaico che, in accordo con la normativa tecnica vigente, viene calcolata ripartendo l'energia prodotta mensilmente rispetto i consumi medi determinati per la copertura di ciascun servizio energetico presente mese considerato.

La stessa metodologia di calcolo e di ripartizione è stata adottata anche in questo lavoro; pertanto, per l'impianto fotovoltaico non è stata determinata alcuna relazione di correlazione, mantenendo di fatto la stessa procedura di calcolo.

## 2.6 Definizione di benchmark

Le equazioni di correlazione tra l'asset rating e il tailored rating identificate nel paragrafo 2.5 hanno permesso di trovare un legame per ciascun servizio energetico dell'Indicatore Energetico Normalizzato (IEN) calcolato secondo un generico profilo tailored a partire da quello derivante dal calcolo standard dell'APE.

Come auspicato durante le attività di ricerca del primo anno, questo risultato apre a scenari e applicazioni di notevole interesse, permettendo di mantenere immutato il metodo di calcolo asset per la valutazione energetica di un edificio integrandone risultati e restituendo dei consumi più realistici in funzione dell'effettivo utilizzo del sistema edificio-impianto.

Le attività del secondo anno si concludono con l'identificazione di alcuni benchmark basati sulle stesse equazioni di correlazione, permettendo di effettuare un confronto diretto tra tipologia impiantistica e categoria di edificio al variare delle condizioni di utilizzo del sistema edificio-impianto e sempre a partire dai risultati ottenuti con l'asset rating.

I benchmark, discussi nei prossimi paragrafi per ogni singolo servizio energetico, sono stati calcolati per tre specifiche grandezze: energia primaria totale richiesta, consumo del principale vettore energetico impiegato e spesa media annua. In merito al primo benchmark, nel caso di climatizzazione estiva ed invernale, solo per la macchina frigorifera e per la pompa di calore si è fatto riferimento all'energia primaria non rinnovabile. Il benchmark associato alla spesa media annua, invece, è considerato di rilievo in quanto permette di poter effettuare un confronto diretto sull'eventuale convenienza delle tipologie impiantistiche da un punto di vista economico.

Per brevità di trattazione, i risultati ottenuti sono mostrati come valori medi per le tre categorie di edificio analizzate (E.1, E.2 ed E.5) al variare della tipologia impiantistica e della zona climatica. Inoltre, in virtù della piccola differenza dei risultati restituiti dai tre generatori a combustione di tipo standard (monostadio, multistadio e modulante), si è deciso di riportare un unico valore dei benchmark calcolato come valore medio dei tre ottenuti per le tre tipologie impiantistiche; i risultati sono identificati e mostrati nei successivi paragrafi sotto la voce di generatore standard.

I dati di dettaglio relativi ai benchmark sono riportati in Appendice A – Benchmark per la produzione di acqua calda sanitaria, Appendice B – Benchmark per il riscaldamento e Appendice C – Benchmark per il raffrescamento rispettivamente per i servizi di produzione di acqua calda sanitaria, di riscaldamento e di raffrescamento.

### 2.6.1 Produzione acqua calda sanitaria

Le analisi condotte per il servizio energetico di produzione di acqua calda sanitaria hanno evidenziato un legame di tipo lineare tra i consumi ricavati con l'asset rating e con l'applicazione dei profili tailored. In particolare, l'indicatore energetico identificato (Equazione 4) dipende dallo stesso indicatore calcolato con l'approccio asset, dal volume di acqua calda sanitaria determinato sia con il metodo asset che con quello tailored, dalla temperatura esterna media della località di simulazione ottenuta a partire dai valori medio mensili forniti da normativa e da due coefficienti (m e q) che dipendono dalla tipologia impiantistica adottata. A partire dall'Equazione 4 e da questi coefficienti, sono stati desunti tre benchmark associati all'energia primaria, al principale vettore energetico impiegato e alla spesa media annua; relativamente al servizio energetico di produzione di acqua calda sanitaria, questi sono stati analizzati al variare della categoria di edificio, della tipologia impiantistica (boiler elettrico, generatore di calore standard, generatore di calore a condensazione e pompa di calore) e la zona climatica.

I benchmark sono stati inoltre calcolati sia per l'asset rating, dipendente dalla variazione della superficie utile dell'immobile, che per il tailored rating, facendo ricorso ai profili di utilizzo mostrati al paragrafo 2.4.5.1 ( $P_{acs-min}$ ,  $P_{acs-med}$ ,  $P_{acs-max}$ ) basati sul numero di fruitori del servizio.

Le indagini relative al settore residenziale (E.1) si basano sui valori medi di acqua calda sanitaria per persona determinati in 2.4.5.1. In questo caso, a titolo esemplificativo, i benchmark sono stati determinati con l'integrazione del solare termico prevedendo le configurazioni più diffuse nel territorio italiano: un pannello (ST-1) o due pannelli (ST-2).

Per il settore non residenziale (E.2 ed E.5) si è fatto riferimento a un volume sensibilmente più basso pari a 15 litri/persona; pertanto, l'ipotesi di integrazione della generica tipologia impiantistica con il solare termico non è stata ritenuta coerente con la realtà essendo i consumi d'acqua nettamente inferiori e comportando, di fatto, fabbisogni di energia nulli già considerando un solo pannello di solare termico in molte zone climatiche.

Per il calcolo dei benchmark relativi ai vettori energetici e alla spesa media annua, si sono assunti dei valori standard dei combustibili e dei costi medi convenzionali per i diversi combustibili (Tabella 100). Relativamente ai costi, questi sono stati desunti sulla base dell'esperienza e dell'analisi di alcune bollette di utenze reali assumendo i costi medi riportati in tabella.

Si tiene a precisare che le analisi riportate sono di carattere esemplificativo in quanto i benchmark possono essere determinati per valori diversi di portata di acqua calda sanitaria consumata essendo la relazione matematica di base valida per volumi d'acqua sia maggiori che minori. Lo stesso vale per i combustibili e, ovviamente, a valori di costo differenti rispetto a quelli considerati.

Tabella 100 – Potere calorifico e costo medio dei vettori energetici considerati.

<b>Vettore energetico</b>	<b>Potere calorifico [kWh/u.m.vettore]</b>	<b>Costo unitario [€/u.m. vettore]</b>
<i>Energia elettrica [kWh]</i>	-	0.125
<i>Metano [m<sup>3</sup>]</i>	9.940	0.893
<i>G.P.L. [kg]</i>	12.778	1.630

#### 2.6.1.1 Energia primaria

Il primo benchmark analizzato è espresso come valore medio dell'energia primaria totale per la produzione di acqua calda sanitaria. Questo è stato determinato per entrambe le metodologie di calcolo (asset rating e tailored rating) e per tutte le tipologie impiantistiche, al variare della zona climatica e della destinazione d'uso (E.1 e E.2-E.5). I risultati sono messi a confronto in Tabella 101 per tre casi studio di dimensioni geometriche differenti per l'asset rating e per i tre profili di utilizzo considerati per il tailored rating.

I risultati evidenziano come il tailored rating restituisca sempre un risultato superiore rispetto all'asset rating grazie al differente approccio di calcolo impiegato nella stima del volume di acqua calda sanitaria consumato: nell'ipotesi di una sola persona fruente l'immobile ( $P_{acs-min}$ ), i due approcci di calcolo tendono a convergere ma solo per valori di superficie utile compresa tra 100 e 120 m<sup>2</sup>, divergendo significativamente per valori inferiori o maggiori. All'aumentare dei fruitori del servizio ( $P_{acs-med}$  e  $P_{acs-max}$ ), invece, si evidenzia una significativa divergenza dell'energia richiesta: i benchmark restituiti dall'asset rating risultano essere nettamente inferiori di quelli tailored con discrepanze che variano da un 98% a un 180% in funzione della tipologia impiantistica considerata.

Come era lecito attendersi, inoltre, si conferma un fabbisogno energetico nettamente superiore per la categoria E.1 rispetto alle categorie E.2 ed E.5; tuttavia, per il settore non residenziale si riscontra una differenza tra gli indicatori asset e tailored molto meno marcata. Questo risultato è principalmente legato al fatto che gli indicatori tailored sono stati desunti sempre per un numero di persone variabile da uno a tre; è plausibile però prevedere che il numero di fruitori del servizio negli uffici e nelle attività commerciali possa essere anche significativamente diverso, comportando conseguentemente un incremento dell'energia primaria totale calcolato con il tailored rating.

I benchmark asset, quindi l'energia primaria ottenuti con l'APE, invece, non si basano su un volume di acqua calda sanitaria consumato più realistico. Una criticità del metodo di calcolo asset per la produzione di acqua calda sanitaria, infatti, è proprio la mancata considerazione del numero di persone fruente l'immobile: ad esempio, due unità immobiliari di dimensioni geometriche uguali, ma occupate da un numero di persone differente, per il metodo di calcolo asset avrebbero lo stesso valore di energia primaria. Invece, per come concepito, il benchmark tailored non risente della superficie utile dell'immobile perché basato direttamente sul volume di acqua calda sanitaria stimata solo sul numero di persone.

Tabella 101 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria: energia primaria totale (kWh).

Tipologia impianto		E.1						E.2 e E.5					
		Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili			Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili		
		80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>	80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>
Boiler elettrico	A	4069	4781	5492	5104	10208	15313	534	667	800	445	890	1335
	B	3962	4654	5347	4969	9939	14908	519	649	779	433	867	1300
	C	4178	4909	5640	5241	10483	15724	548	685	822	457	914	1371
	D	4254	4998	5742	5336	10673	16009	558	697	837	465	931	1396
	E	4567	5365	6164	5728	11457	17185	599	748	898	500	999	1499
	F	6411	7533	8654	8042	16085	24127	841	1051	1261	701	1403	2104
Generatore Standard	A	1713	2012	2312	2104	4208	6312	225	281	337	183	367	550
	B	1668	1959	2251	2048	4095	6143	219	273	328	179	357	536
	C	1759	2066	2374	2161	4322	6483	231	288	346	188	377	565
	D	1791	2104	2417	2201	4401	6602	235	293	352	192	384	576
	E	1922	2258	2595	2364	4728	7092	252	315	378	206	412	618
	F	2699	3171	3643	3329	6657	9986	354	442	531	290	581	871
Generatore a Condensazione	A	1614	1896	2178	1876	3751	5627	212	264	317	164	327	491
	B	1571	1846	2121	1823	3647	5470	206	257	309	159	318	477
	C	1657	1947	2237	1929	3858	5787	217	272	326	168	336	505
	D	1687	1982	2277	1966	3932	5898	221	277	332	171	343	514
	E	1811	2128	2444	2119	4237	6356	237	297	356	185	370	554
	F	2543	2987	3432	3019	6038	9058	333	417	500	263	527	790
Pompa di calore	A	2149	2525	2901	2697	5394	8092	534	667	800	445	890	1335
	B	2092	2458	2824	2626	5252	7878	519	649	779	433	867	1300
	C	2207	2593	2979	2770	5539	8309	548	685	822	457	914	1371
	D	2247	2640	3033	2820	5640	8460	558	697	837	465	931	1396
	E	2412	2834	3256	3027	6054	9081	599	748	898	500	999	1499
	F	3386	3978	4571	4250	8500	12750	841	1051	1261	701	1403	2104

La produzione di acqua calda sanitaria per la categoria E.1 è stata considerata anche integrando la tipologia impiantistica con un pannello di solare termico (ST-1) e con due pannelli di solare termico (ST-2) essendo queste le configurazioni più comuni per le caratteristiche dimensionali dei casi studio prescelti. La variazione dei benchmark rispetto alla configurazione senza solare termico sono mostrate in Tabella 102 solo per la categoria E.1 in quanto per le destinazioni d’uso non residenziali si otterrebbero fabbisogni energetici prossimi allo zero in tutte le zone climatiche ad eccezione della sola zona F in virtù anche delle assunzioni fatte.

Nelle ipotesi di integrazione con ST-1 e ST-2, il contributo del solare termico varia significativamente con il profilo di calcolo considerato. Per entrambe, si osserva una netta riduzione di questo contributo al peggiorare della rigidità delle condizioni climatiche esterne con una copertura del solare che cresce, ovvero con una diminuzione dell’energia primaria da compensare con altro sistema impiantistico, al diminuire della superficie utile dell’immobile o al numero di persone considerate.

È interessante osservare come la copertura restituita dall’asset rating sia sempre maggiore di quella tailored in entrambe le configurazioni ST-1 e ST-2, con una differenza percentuale dell’energia primaria con o senza solare termico del quasi 21% tra le due metodologie di calcolo. In accordo con tale risultato, sembrerebbe, quindi, che il calcolo asset tenda a sovrastimare la copertura del solare termico con conseguente riduzione dell’energia primaria da compensare con altra tipologia impiantistica.

Tabella 102 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria integrata con uno o due pannelli di solare termico (ST-1 e ST-2) per la categoria E.1: energia primaria totale (kWh).

Tipologia impianto		E.1 – ST-1						E.1 – ST-2					
		Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili			Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili		
		80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>	80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>
Boiler	A	1783	2456	3128	3394	8050	12387	448	851	1475	1684	5891	9461
	B	1774	2431	3085	3346	7890	12131	504	925	1516	1722	5840	9353
	C	2048	2744	3439	3721	8563	13122	791	1320	1969	2200	6644	10521
	D	2145	2856	3565	3854	8802	13473	908	1466	2132	2371	6930	10937
	E	2435	3201	3965	4280	9628	14707	1176	1839	2565	2831	7800	12229
	F	5173	6292	7410	7915	15924	23910	5056	6172	7287	7788	15764	23692
Standard	A	249	415	667	445	2212	3656	6	27	52	27	444	919
	B	276	452	689	479	2177	3582	23	52	90	51	497	990
	C	425	646	911	681	2516	4065	79	139	219	149	878	1619
	D	485	718	991	757	2638	4239	112	189	285	199	1023	1830
	E	626	903	1202	952	3004	4781	173	281	404	300	1351	2392
	F	2582	3051	3520	3205	6504	9779	2466	2932	3398	3082	6351	9574
Condensazione	A	234	391	629	360	2092	3548	5	26	49	8	284	636
	B	260	426	650	371	1967	3317	22	49	85	32	380	770
	C	401	609	859	541	2250	3700	74	131	206	115	742	1375
	D	457	677	934	609	2352	3840	105	178	269	153	868	1571
	E	590	850	1132	778	2692	4336	163	264	381	234	1141	2028
	F	2433	2875	3317	2902	5898	8871	2323	2763	3202	2785	5759	8685
Pompa di calore	A	279	536	872	987	3236	5166	10	38	90	105	1016	2068
	B	307	563	889	1002	3203	5101	29	67	135	149	1107	2144
	C	465	773	1123	1249	3620	5707	90	176	293	332	1683	3039
	D	526	849	1207	1337	3769	5924	125	234	371	419	1890	3346
	E	677	1046	1434	1579	4226	6603	193	339	512	574	2394	4103
	F	2677	3266	3856	4123	8339	12532	2560	3147	3733	3996	8179	12315

### 2.6.1.2 Vettore energetico

I benchmark associati al consumo del vettore energetico principale, sono stati calcolati attraverso l’asset rating e il tailored rating per tutte le tipologie impiantistiche, al variare della zona climatica e della destinazione d’uso (E.1 e E.2-E.5). I principali vettori energetici considerati sono l’energia elettrica da rete per il boiler e la pompa di calore, e il metano per i generatori di calore a combustione.

I valori medi dei benchmark ottenuti per le tre destinazioni d’uso sono mostrati in Tabella 103 mentre in Tabella 104 sono riportati i risultati derivanti dall’integrazione del solare termico per la sola categoria E.1. L’analisi dei benchmark associati al consumo del vettore energetico confermano quanto emerso per l’indicatore dell’energia primaria totale.

Tabella 103 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria: vettore energetico (energia elettrica in kWh, metano in Nm<sup>3</sup>).

Tipologia impianto		E.1						E.2 e E.5					
		Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili			Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili		
		80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>	80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>
Boiler (energia elettrica)	A	1681	1975	2270	2109	4218	6328	220	276	331	184	368	552
	B	1637	1923	2210	2053	4107	6160	215	268	322	179	358	537
	C	1727	2029	2331	2166	4332	6498	226	283	340	189	378	567
	D	1758	2065	2373	2205	4410	6615	230	288	346	192	385	577
	E	1887	2217	2547	2367	4734	7101	247	309	371	206	413	619
	F	2649	3113	3576	3323	6647	9970	347	434	521	290	580	869
Standard (metano)	A	164	193	222	202	403	605	22	27	32	18	35	53
	B	160	188	216	196	392	589	21	26	31	17	34	51
	C	169	198	227	207	414	621	22	28	33	18	36	54
	D	172	202	232	211	422	633	22	28	34	18	37	55
	E	184	216	249	227	453	680	24	30	36	20	40	59
	F	259	304	349	319	638	957	34	42	51	28	56	83
Condensazione (metano)	A	155	182	209	180	359	539	20	25	30	16	31	47
	B	151	177	203	175	349	524	20	25	30	15	30	46
	C	159	187	214	185	370	555	21	26	31	16	32	48
	D	162	190	218	188	377	565	21	26	32	16	33	49
	E	174	204	234	203	406	609	23	28	34	18	35	53
	F	244	286	329	289	579	868	32	40	48	25	50	76
Pompa di calore (energia elettrica)	A	408	480	551	512	1025	1537	220	276	331	184	368	552
	B	398	467	537	499	998	1497	215	268	322	179	358	537
	C	419	493	566	526	1053	1579	226	283	340	189	378	567
	D	427	502	576	536	1072	1607	230	288	346	192	385	577
	E	458	538	619	575	1150	1725	247	309	371	206	413	619
	F	643	756	868	807	1615	2422	347	434	521	290	580	869

Tabella 104 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria integrata con uno o due pannelli di solare termico per la categoria E.1: vettore energetico (energia elettrica in kWh, metano in Nm<sup>3</sup>).

Tipologia impianto		E.1 – ST-1						E.1 – ST-2					
		Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili			Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili		
		80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>	80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>
Boiler (energia elettrica)	A	737	1015	1292	1402	3326	5119	185	352	609	696	2434	3910
	B	733	1004	1275	1383	3260	5013	208	382	626	712	2413	3865
	C	846	1134	1421	1537	3538	5422	327	545	814	909	2745	4347
	D	886	1180	1473	1593	3637	5567	375	606	881	980	2864	4519
	E	1006	1323	1639	1769	3979	6077	486	760	1060	1170	3223	5053
	F	2138	2600	3062	3271	6580	9880	2089	2550	3011	3218	6514	9790
Standard (metano)	A	24	40	64	43	212	350	1	3	5	3	42	88
	B	26	43	66	46	209	343	2	5	9	5	48	95
	C	41	62	87	65	241	390	8	13	21	14	84	155
	D	46	69	95	72	253	406	11	18	27	19	98	175
	E	60	86	115	91	288	458	17	27	39	29	129	229
	F	247	292	337	307	623	937	236	281	326	295	609	917
Condensazione (metano)	A	22	37	60	34	200	340	1	2	5	1	27	61
	B	25	41	62	36	189	318	2	5	8	3	36	74
	C	38	58	82	52	216	354	7	13	20	11	71	132
	D	44	65	89	58	225	368	10	17	26	15	83	151
	E	56	81	108	75	258	415	16	25	36	22	109	194
	F	233	275	318	278	565	850	223	265	307	267	552	832
Pompa di calore (energia elettrica)	A	53	102	166	188	615	982	2	7	17	20	193	393
	B	58	107	169	190	609	969	5	13	26	28	210	407
	C	88	147	213	237	688	1084	17	33	56	63	320	577
	D	100	161	229	254	716	1126	24	44	71	80	359	636
	E	129	199	272	300	803	1255	37	64	97	109	455	780
	F	509	621	733	783	1585	2381	486	598	709	759	1554	2340

### 2.6.1.3 Spesa media annua

Gli ultimi benchmark sono associati alla spesa media annua, desunti a partire dal consumo di energia elettrica e di metano ottenuto per le diverse configurazioni impiantistiche investigate. I valori sono stati calcolati sia mediante l’asset rating che il tailored rating per tutte le tipologie impiantistiche investigate e al variare della zona climatica e della destinazione d’uso (E.1 e E.2-E.5).

I risultati ottenuti senza l’integrazione del solare termico per le tre destinazioni d’uso sono sintetizzati in Tabella 105, mentre quelli derivanti dall’integrazione del solare termico (ST-1 e ST-2) per la sola categoria E.1 sono mostrati in Tabella 106.

Il confronto tra l’asset rating e il tailored rating conferma quanto emerso dall’analisi dei precedenti benchmark, restituendo una spesa media annua più elevata con la seconda metodologia di calcolo.

In considerazione della tipologia impiantistica, si evidenzia come tra le quattro soluzioni adottate il boiler elettrico sia quello che presenta un costo medio annuo sempre maggiore, mentre la pompa di calore, sebbene sia la soluzione tecnologica che generalmente presenta un costo iniziale più elevato, è quella che comporta un costo di esercizio più basso.

Considerando l’integrazione delle quattro soluzioni impiantistiche con il solare termico, si conferma una netta riduzione della spesa media annua, con una riduzione percentuale più marcata con il calcolo asset.

Tabella 105 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria: spesa media annua (€).

Tipologia impianto		E.1 – ST-1						E.1 – ST-2					
		Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili			Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili		
		80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>	80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>
Boiler	A	204	239	275	256	511	767	27	33	40	22	45	67
	B	215	253	290	270	539	809	28	35	42	24	47	71
	C	219	257	295	275	549	824	29	36	43	24	48	72
	D	235	276	317	295	589	884	31	39	46	26	51	77
	E	330	388	445	414	827	1241	43	54	65	36	72	108
	F	209	246	283	263	525	788	27	34	41	23	46	69
Standard	A	143	168	193	176	351	527	19	23	28	15	31	46
	B	151	177	204	185	371	556	20	25	30	16	32	49
	C	154	181	207	189	378	567	20	25	30	16	33	49
	D	165	194	223	203	406	609	22	27	32	18	35	53
	E	232	272	313	286	571	857	30	38	46	25	50	75
	F	147	173	198	181	361	542	19	24	29	16	31	47
Condensazione	A	134	158	181	156	312	468	18	22	26	14	27	41
	B	142	167	191	165	330	495	19	23	28	14	29	43
	C	144	170	195	168	336	505	19	24	28	15	29	44
	D	155	182	209	181	363	544	20	25	30	16	32	47
	E	218	256	294	258	517	775	29	36	43	23	45	68
	F	138	162	186	161	321	482	18	23	27	14	28	42
Pompa di calore	A	49	58	67	62	124	186	27	33	40	22	45	67
	B	52	61	70	66	131	197	28	35	42	24	47	71
	C	53	62	72	67	133	200	29	36	43	24	48	72
	D	57	67	77	72	143	215	31	39	46	26	51	77
	E	80	94	108	101	201	302	43	54	65	36	72	108
	F	51	60	69	64	128	191	27	34	41	23	46	69

Tabella 106 – Benchmark per la produzione dell’acqua calda sanitaria integrata con uno o due pannelli di solare termico per la categoria E.1: spesa media annua (€).

Tipologia impianto		E.1 – ST-1						E.1 – ST-2					
		Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili			Asset Superficie [m <sup>2</sup> ]			Tailored Profili		
		80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>	80	100	120	P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>
Boiler	A	91	125	159	172	406	624	26	48	78	89	300	481
	B	105	141	177	191	441	675	41	68	101	113	342	541
	C	110	147	183	198	453	693	47	75	110	122	357	563
	D	125	165	204	220	495	757	61	95	132	146	401	629
	E	266	324	381	407	819	1230	260	318	375	401	811	1219
	F	92	126	161	175	414	637	23	44	76	87	303	487
Standard	A	24	39	59	41	187	307	2	4	8	4	43	85
	B	36	55	78	58	216	349	7	12	19	13	75	139
	C	42	62	85	65	226	364	10	16	24	17	88	157
	D	54	77	103	82	258	410	15	24	35	26	116	205
	E	222	262	302	275	558	839	212	252	292	264	545	822
	F	21	36	57	38	190	314	1	2	4	2	38	79
Condensazione	A	22	36	56	32	168	284	2	4	7	3	33	66
	B	34	52	73	46	192	317	6	11	18	10	63	118
	C	39	58	80	52	201	329	9	15	23	13	74	134
	D	50	73	97	67	230	371	14	23	33	20	98	174
	E	208	246	284	248	505	759	199	236	274	238	493	743
	F	20	33	54	31	179	304	0	2	4	1	24	54
Pompa di calore	A	7	13	21	24	76	121	1	2	3	4	26	51
	B	11	18	27	30	86	135	2	4	7	8	40	72
	C	12	20	29	32	89	140	3	6	9	10	45	79
	D	16	25	34	37	100	156	5	8	12	14	57	97
	E	63	77	91	98	197	296	61	74	88	95	193	291
	F	7	13	21	23	77	122	0	1	2	2	24	49

### 2.6.2 Riscaldamento

Le analisi condotte per il servizio energetico di riscaldamento hanno evidenziato un legame di tipo non lineare tra gli indicatori energetici ricavati con l’asset rating e quelli ottenuti dai profili tailored. In particolare, è stato necessario definire una famiglia di equazioni che permettesse di calcolare i valori minimo, medio e massimo dell’indicatore energetico normalizzato (IEN) tailored a partire da quello dell’asset rating. Infine, per ciascuna equazione trovata, è stato necessario definire dei coefficienti correttivi moltiplicativi che riuscissero ad approssimare con un errore limitato ed accettabile il valore dell’energia primaria restituito dalla combinazione delle tre equazioni.

La famiglia di equazioni trovata presenta una relazione matematica come quella dell’Equazione 12, funzione dei Gradi Giorno della località, del numero di ore effettivo di accensione dell’impianto, delle principali caratteristiche tecniche dell’impianto (potenza e rendimento), dello stesso indicatore energetico calcolato con l’asset rating e da due coefficienti (a e b) che variano in funzione del livello di isolamento termico dell’edificio, della tipologia impiantistica e del valore dell’indicatore che la singola equazione permette di calcolare.

Analogamente a quanto fatto per il servizio di produzione di acqua calda sanitaria, sono state definite tre tipologie di benchmark anche per quello di riscaldamento, associate sempre all’energia primaria totale, al consumo dei vettori energetici e alla spesa media annua. Solo per la pompa di calore si è fatto riferimento all’energia primaria non rinnovabile perché ritenuta più rappresentativa ai fini dell’analisi comparativa.

Per il servizio energetico in oggetto, i benchmark sono stati analizzati al variare della zona climatica, della configurazione impiantistica (impianto autonomo e centralizzato), della tipologia del generatore di calore (monostadio, multistadio, modulante, condensazione e pompa di calore), della categoria dell'edificio (E.1, E.2 ed E.5) e del livello di isolamento dell'edificio (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2, Liv-Iso-3). I benchmark sono stati inoltre calcolati attraverso l'asset rating, che considera un funzionamento dell'impianto in continuo, e il tailored rating, facendo ricorso ai profili di utilizzo mostrati ai paragrafi 2.4.5.2 e 2.4.5.3 ( $P_{\text{risc-min}}$ ,  $P_{\text{risc-med}}$ ,  $P_{\text{risc-max}}$ ), basati su un numero di ore di accensione dell'impianto variabile.

Tutte le elaborazioni sono state condotte a partire dall'Equazione 12 e dai relativi coefficienti correttivi; tuttavia, per brevità di trattazione, nei successivi paragrafi si riportano i valori medi dei benchmark aggregati con lo scopo di evidenziare le principali differenze tra i due approcci utilizzati.

Per una maggiore chiarezza di esposizione, le analisi di seguito riportate sono state distinte per livello di isolamento in linea anche con i risultati delle simulazioni energetiche; per ogni livello di isolamento è stata mostrata la variazione della specifica tipologia di benchmark rispetto al variare del generatore di calore, la zona climatica, la categoria dell'edificio e in base all'asset rating e il tailored rating. Inoltre, i benchmark per generatori di calore a condensazione a bassa temperatura e la pompa di calore sono stati calcolati solo per i livelli di isolamento Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3, ovvero quelli associabili a edifici oggetto di importante ristrutturazione energetica o nuove costruzioni, in conformità con quanto fatto nel paragrafo 2.5.2.

I vettori energetici considerati sono metano ed energia elettrica in quanto sono quelli maggiormente diffusi sul territorio italiano; per gli altri vettori energetici (ad esempio il gpl) si rimanda all'Appendice B – Benchmark per il riscaldamento.

Si tiene a precisare che per il calcolo degli ultimi due benchmark (relativi ai vettori energetici e alla spesa annua) si sono assunti dei valori standard e convenzionali mostrati in Tabella 100.

Come per i benchmark legati alla produzione dell'acqua calda sanitaria, anche quelli associati al riscaldamento possono essere estesi a combustibili differenti e, ovviamente, a valori di costo maggiori o minori di quelli considerati; pertanto, i benchmark riportati sono da considerarsi come esemplificativi per le categorie indagate.

Infine, in accordo con le analisi condotte, si è evitata una minima differenza tra impianti autonomi e impianti centralizzati in quanto l'unica discrepanza tra i due sistemi è proprio legata a un diverso rendimento medio stagionale del sistema impianto; per le ipotesi adottate, e come descritto in precedenza nel paragrafo 2.5.2.5 i rendimenti trovati per le due casistiche risultano essere comunque molto vicini tra loro, determinato di fatto un consumo leggermente superiore o minore al variare del caso studio. Ai fini della presente trattazione, quindi, le analisi che si condurranno per il sistema autonomo possono valere anche per quello centralizzato, per le quali si rimanda all'Appendice B – Benchmark per il riscaldamento.

### 2.6.2.1 Energia primaria

I benchmark espressi come valori medi di energia primaria totale per il riscaldamento sono stati calcolati attraverso l'asset rating e il tailored rating per tutte le tipologie impiantistiche, al variare della zona climatica e la categoria di edificio (E.1, E.2 ed E.5). Come anticipato, solo per la pompa di calore si è fatto riferimento all'energia primaria non rinnovabile perché ritenuta più rappresentativa ai fini dell'analisi comparativa.

I risultati in base ai livelli di isolamento Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3 sono mostrati rispettivamente da Tabella 107 a Tabella 110.

Dall'analisi dell'indicatore tailored si osserva una significativa variazione dell'energia primaria in funzione del numero di ore di accensione dell'impianto; la variazione percentuale più elevata rispetto l'asset rating è sempre ottenuta con il profilo  $P_{\text{risc-min}}$  considerando il generatore di calore di tipo standard. Nel caso di edifici con livello di isolamento Liv-Iso-0, le differenze massime sono dell'ordine del 40% nelle zone climatiche B e C e tendono ad aumentare con il miglioramento dell'isolamento fino a valori del 60% per il livello Liv-Iso-3. Al contrario lo scostamento minore tra le due metodologie è sempre riscontrabile con il generatore standard per il profilo  $P_{\text{risc-max}}$  con una variazione minima del 2% per Liv-Iso-0 che aumenta in maniera significativa fino al 30-40% con il livello di isolamento del fabbricato.

Relativamente alla tipologia impiantistica, a parità di condizioni, il generatore a combustione a condensazione è il più efficiente, con variazioni percentuali rispetto al generatore standard che decrescono

con la rigidità delle condizioni climatiche; nel caso di generatori a condensazione operanti ad alta temperatura si registrano variazioni del 12-40% mentre nel caso di bassa temperatura (solo per Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3) queste sono del 30-55%.

Infine, come era lecito attendersi in virtù delle differenti condizioni di simulazione impostate da normativa, le destinazioni d'uso non residenziali presentano un consumo significativamente maggiore rispetto a quella residenziale in tutte le configurazioni di isolamento adottate.

Tabella 107 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-0: energia primaria (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Standard (radiatori)	A	13297	8099	12443	12443	16888	14758	15803	15803	20345	17780	19038	19038
	B	16160	9456	15020	15415	20523	17544	19821	19821	24725	21135	23878	23878
	C	21468	11081	20262	20897	27265	21087	26051	26688	32847	25404	31385	32152
	D	28881	17822	25625	28124	36678	25192	32868	36041	44187	30350	39596	43419
	E	40911	28562	37080	40289	51957	30228	43551	51266	62593	36417	52467	61761
	F	71630	48148	53498	70132	90970	33971	54354	89533	109594	40926	65482	107862
Condensazione (radiatori)	A	9580	6080	8117	8117	12167	10302	10309	10309	14658	12411	12419	12419
	B	11769	7491	10092	10137	14947	12751	12874	12874	18007	15362	15510	15510
	C	16206	10184	14404	14494	20581	17595	18331	18407	24795	21197	22084	22175
	D	22334	17323	19686	20365	28364	22750	25001	25863	34171	27408	30120	31158
	E	34521	28026	31995	32664	43842	29660	38953	41483	52818	35733	46928	49975
	F	63518	48589	53988	61763	80667	34513	55221	78439	97182	41579	66526	94497

Tabella 108 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-1: energia primaria (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Standard (radiatori)	A	4602	2300	3140	3140	5844	3942	3988	3988	7041	4749	4805	4805
	B	5862	3137	4284	4390	7445	5376	5645	5645	8969	6477	6801	6801
	C	8172	4691	6443	6635	10379	8024	8279	8473	12504	9666	9974	10208
	D	10138	7813	8054	8308	12875	10024	10322	10649	15511	12076	12436	12829
	E	16058	13895	14077	14413	20394	14722	17859	18277	24569	17736	21515	22019
	F	29374	24926	27695	28078	37305	17653	28245	35711	44942	21267	34027	43022
Condensazione (radiatori)	A	3315	1696	2308	2308	4210	2901	2932	2932	5072	3495	3532	3532
	B	4267	2335	3183	3260	5419	3998	4141	4141	6528	4816	4988	4988
	C	6169	3606	4961	5111	7835	6171	6363	6491	9439	7434	7666	7819
	D	7835	6131	6227	6381	9950	7875	8128	8306	11987	9487	9792	10006
	E	13554	11885	11985	12147	17213	12620	15324	15513	20737	15204	18462	18688
	F	26047	22128	24586	24986	33080	15788	25262	31957	39852	19021	30433	38499

Tabella 109 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-2: energia primaria (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Standard (radiator)	A	3783	1696	2349	2349	4805	2928	2984	2984	5789	3527	3594	3594
	B	4400	1922	2664	2768	5588	3319	3559	3559	6733	3999	4287	4287
	C	5939	2938	4109	4294	7543	5056	5307	5484	9087	6091	6393	6607
	D	7759	5329	5583	5853	9854	6865	7157	7500	11872	8271	8622	9035
	E	11923	9566	9795	10102	15143	10126	12367	12840	18243	12200	14898	15469
	F	22267	18312	20346	20776	28280	12956	20730	26450	34069	15609	24974	31865
Condensazione (radiator)	A	2725	1250	1727	1727	3461	2155	2193	2193	4170	2596	2642	2642
	B	3202	1431	1978	2055	4067	2468	2610	2610	4900	2973	3144	3144
	C	4484	2259	3164	3308	5694	3889	4079	4202	6860	4686	4915	5062
	D	5999	4186	4318	4499	7618	5397	5640	5850	9178	6502	6794	7048
	E	10062	8197	8378	8457	12779	8681	10623	10879	15395	10459	12798	13107
	F	19746	16340	18155	18393	25077	11626	18601	23593	30211	14006	22409	28423
Condensazione (pannelli radianti)	A	2438	1118	1545	1545	3096	1928	1962	1962	3730	2323	2363	2363
	B	2865	1280	1770	1838	3638	2207	2334	2334	4383	2659	2812	2812
	C	4011	2021	2830	2959	5094	3479	3649	3759	6136	4191	4396	4528
	D	5366	3744	3863	4024	6815	4828	5045	5233	8210	5816	6078	6305
	E	9001	7333	7494	7566	11432	7766	9503	9732	13772	9356	11448	11724
	F	17663	14617	16241	16453	22432	10400	16640	21105	27025	12529	20046	25426
Pompa di calore (pannelli radianti)	A	3081	787	1278	1278	3913	1478	1624	1624	4714	1780	1956	1956
	B	3587	909	1502	1578	4555	1724	2004	2004	5488	2077	2415	2415
	C	5344	1128	2268	2425	6786	2234	2947	3080	8176	2691	3550	3711
	D	6617	1812	2721	3041	8403	2590	3456	3863	10123	3120	4164	4653
	E	11169	3197	4420	5317	14185	3384	5095	6753	17089	4076	6139	8136
	F	20817	6616	7352	11655	26437	4668	7469	14802	31850	5624	8998	17832

Tabella 110 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-3: energia primaria (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max		Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max		Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max
Standard (radiator)	A	3517	1449	2014	2014	4467	2506	2558	2558	5330	2964	3026	3026
	B	3990	1649	2303	2411	5068	2858	3100	3100	6052	3387	3673	3673
	C	5216	2341	3314	3495	6624	4046	4294	4464	7981	4874	5173	5377
	D	6990	4442	4699	4975	8878	5737	6024	6374	10695	6911	7257	7679
	E	10578	8172	8406	8709	13434	8650	10592	11079	16184	10421	12760	13348
	F	19968	16282	18092	18522	25360	11511	18417	23600	30551	13867	22188	28432
Condensazione (radiator)	A	2534	1068	1481	1481	3218	1845	1880	1880	3840	2182	2224	2224
	B	2904	1227	1709	1789	3687	2124	2272	2272	4404	2517	2692	2692
	C	3938	1800	2552	2693	5001	3113	3301	3420	6024	3750	3977	4121
	D	5405	3491	3636	3825	6864	4512	4750	4975	8270	5436	5722	5993
	E	8926	7005	7203	7281	11337	7418	9101	9389	13657	8936	10964	11312
	F	17707	14554	16171	16370	22488	10329	16526	21051	27091	12443	19909	25361
Condensazione (pannelli radianti)	A	2267	956	1324	1324	2878	1650	1682	1682	3435	1952	1990	1990
	B	2597	1097	1529	1600	3299	1900	2033	2033	3940	2252	2408	2408
	C	3522	1610	2283	2409	4473	2785	2953	3060	5389	3355	3558	3686
	D	4835	3122	3253	3422	6140	4036	4249	4450	7397	4863	5119	5361
	E	7985	6266	6444	6514	10141	6635	8141	8399	12217	7994	9808	10119
	F	15839	13019	14465	14644	20116	9239	14783	18831	24234	11131	17809	22686
Pompa di calore (pannelli radianti)	A	2219	659	956	956	2818	1166	1215	1215	3394	1404	1463	1463
	B	2582	764	1104	1121	3280	1348	1424	1424	3951	1624	1715	1715
	C	3847	1056	1678	1686	4886	1902	2134	2141	5887	2292	2571	2580
	D	4764	1687	2038	2131	6050	2254	2589	2706	7289	2715	3119	3260
	E	8042	2978	3666	3844	10213	3151	4365	4882	12304	3796	5258	5882
	F	14988	6388	7098	8701	19035	4507	7211	11051	22932	5430	8688	13313

### 2.6.2.2 Vettore energetico

Il secondo benchmark considerato è espresso come valore medio del consumo del vettore energetico principalmente impiegato per il riscaldamento. I risultati mostrati di seguito fanno riferimento all'energia elettrica per la pompa di calore e al metano per i generatori a combustione, perché sono i vettori energetici più impiegati sul territorio italiano. Questi son stati calcolati attraverso l'asset rating e il tailored rating per tutte le tipologie impiantistiche investigate, al variare della zona climatica e della categoria di edificio (E.1, E.2 ed E.5). I risultati suddivisi per livello di isolamento (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3) sono mostrati rispettivamente da Tabella 111 a Tabella 114. Per i risultati in dettaglio, con riferimento anche ad altri tipi di vettore energetico, si rimanda all'Appendice C – Benchmark per il raffrescamento.

Dal confronto dei risultati si possono evincere considerazioni analoghe a quelle evinte per la categoria di benchmark associata all'energia primaria, confermando una divergenza delle due metodologie variabile in funzione dell'effettivo orario di accensione dell'impianto e del livello di isolamento dell'edificio.

Tabella 111 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-0: vettore energetico (metano in Nm<sup>3</sup>).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Standard (radiator)	A	1252	764	1172	1172	1589	1393	1490	1490	1915	1682	1799	1799
	B	1521	892	1414	1451	1932	1657	1866	1866	2327	2000	2251	2251
	C	2021	1045	1908	1967	2566	1993	2455	2513	3092	2406	2963	3030
	D	2718	1681	2412	2647	3452	2380	3099	3393	4159	2874	3741	4090
	E	3851	2693	3493	3792	4890	2859	4114	4828	5891	3452	4967	5822
	F	6742	4542	5046	6606	8562	3214	5143	8452	10315	3880	6208	10205
Condensazione (radiator)	A	904	574	766	766	1149	973	973	973	1384	1172	1172	1172
	B	1111	707	953	957	1411	1204	1215	1215	1700	1451	1464	1464
	C	1530	962	1360	1368	1943	1662	1730	1738	2341	2004	2085	2093
	D	2108	1636	1858	1922	2678	2149	2360	2441	3226	2593	2844	2941
	E	3259	2647	3020	3083	4139	2806	3680	3916	4986	3387	4440	4718
	F	5996	4589	5099	5830	7615	3267	5227	7407	9174	3943	6309	8932

Tabella 112 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-1: vettore energetico (metano in Nm<sup>3</sup>).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Standard (radiator)	A	433	285	270	270	550	309	342	342	663	372	413	413
	B	552	376	368	408	701	421	525	525	844	507	633	633
	C	769	546	600	618	977	628	771	790	1177	756	929	951
	D	954	551	755	777	1212	784	961	998	1460	944	1158	1203
	E	1511	1089	1321	1353	1919	1106	1581	1718	2312	1333	1905	2070
	F	2765	2085	2346	2643	3511	1327	2324	3357	4230	1599	2801	4045
Condensazione (radiator)	A	313	313	160	160	397	136	203	203	479	163	245	245
	B	403	403	220	297	512	187	377	377	616	225	455	455
	C	582	582	454	468	740	288	583	595	891	347	702	716
	D	740	145	581	590	939	368	743	775	1132	443	896	934
	E	1279	561	1122	1137	1625	477	1191	1459	1958	574	1435	1757
	F	2459	1393	1625	2359	3123	596	1490	3006	3762	718	1796	3621

Tabella 113 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-2: vettore energetico (energia elettrica in kWh, metano in Nm<sup>3</sup>).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			<i>P<sub>risc-min</sub></i>	<i>P<sub>risc-med</sub></i>	<i>P<sub>risc-max</sub></i>		<i>P<sub>risc-min</sub></i>	<i>P<sub>risc-med</sub></i>	<i>P<sub>risc-max</sub></i>		<i>P<sub>risc-min</sub></i>	<i>P<sub>risc-med</sub></i>	<i>P<sub>risc-max</sub></i>
Standard (radiatori)	A	356	222	201	201	452	229	255	255	545	276	307	307
	B	414	255	228	256	526	260	329	329	634	313	396	396
	C	559	368	380	398	710	395	492	509	855	476	592	613
	D	730	376	521	545	928	536	664	701	1117	646	800	844
	E	1122	749	915	949	1425	761	1092	1205	1717	917	1316	1452
	F	2096	1531	1723	1954	2662	973	1705	2483	3207	1172	2054	2992
Condensazione (radiatori)	A	257	257	118	118	327	100	150	150	394	120	181	181
	B	302	302	135	183	384	114	233	233	463	138	281	281
	C	423	423	284	299	538	181	367	379	648	217	442	457
	D	566	99	398	411	719	251	509	540	866	302	614	651
	E	950	387	774	794	1206	328	819	1018	1453	395	987	1227
	F	1864	1028	1200	1732	2367	439	1097	2211	2852	529	1322	2664
Condensazione (pannelli radianti)	A	231	231	106	106	293	90	134	134	353	108	162	162
	B	271	271	121	164	344	102	209	209	414	123	251	251
	C	379	379	255	268	482	162	329	340	580	195	396	409
	D	507	89	357	368	644	225	456	484	776	271	550	583
	E	851	347	693	711	1081	294	734	912	1302	354	885	1099
	F	1670	921	1075	1552	2121	393	983	1981	2555	474	1185	2387
Pompa di calore (pannelli radianti)	A	3081	3081	787	787	2007	341	512	512	2418	411	617	617
	B	3587	3587	909	1357	2336	395	884	884	2814	476	1065	1065
	C	5344	5344	1505	2268	3480	490	1146	1477	4193	590	1380	1779
	D	6617	453	2040	2949	4309	590	1328	1920	5191	711	1600	2314
	E	11169	1599	3197	4779	7274	694	1735	3112	8764	836	2090	3749
	F	20817	4411	5146	9671	13558	958	2394	6298	16333	1154	2884	7588

Tabella 114 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-3: vettore energetico (energia elettrica in kWh, metano in Nm<sup>3</sup>).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>	P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>	P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>	P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Standard (radiatori)	A	331	198	172	172	420	196	219	219	502	232	259	259
	B	376	226	196	222	477	223	286	286	570	265	338	338
	C	491	308	306	323	623	316	396	413	751	380	478	497
	D	658	313	438	462	836	448	557	594	1007	540	672	716
	E	996	640	784	818	1264	650	935	1039	1523	783	1126	1251
	F	1879	1361	1531	1741	2387	864	1514	2214	2876	1041	1825	2668
Condensazione (radiatori)	A	239	239	101	101	304	85	128	128	362	101	152	152
	B	274	274	116	158	348	98	201	201	416	116	238	238
	C	372	372	227	241	472	144	294	306	569	173	354	369
	D	510	82	333	347	648	209	426	456	781	252	513	549
	E	843	331	661	683	1070	280	700	876	1289	337	844	1055
	F	1671	916	1069	1540	2123	390	975	1969	2557	470	1175	2372
Condensazione (pannelli radianti)	A	214	214	90	90	272	76	115	115	325	91	136	136
	B	246	246	104	141	312	88	180	180	372	104	213	213
	C	333	333	203	216	423	129	263	274	510	155	317	330
	D	457	74	298	311	581	187	382	408	699	226	460	492
	E	755	296	592	612	959	251	627	785	1155	302	756	945
	F	1498	821	957	1380	1902	349	874	1764	2291	421	1052	2125
Pompa di calore (pannelli radianti)	A	2219	2219	659	659	1445	286	429	429	1741	345	517	517
	B	2582	2582	764	1061	1682	332	691	691	2026	400	833	833
	C	3847	3847	1408	1678	2506	458	975	1093	3019	552	1175	1316
	D	4764	422	1775	2126	3103	549	1156	1385	3738	662	1393	1668
	E	8042	1489	2978	3738	5238	646	1616	2434	6310	779	1947	2933
	F	14988	4259	4969	7997	9761	925	2311	5208	11760	1114	2785	6275

### 2.6.2.3 Spesa media annua

L'ultimo benchmark è stato desunto ea partire dal consumo di energia elettrica e di metano per le diverse configurazioni impiantistiche investigate ed è associato alla spesa media annua. I valori sono stati calcolati sia mediante l'asset rating che il tailored rating per tutte le tipologie impiantistiche investigate e al variare della zona climatica e della destinazione d'uso (E.1 e E.2-E.5).

I risultati suddivisi per livello di isolamento (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3) sono mostrati rispettivamente da Tabella 115 a Tabella 118.

Il confronto tra l'asset rating e il tailored rating conferma quanto emerso dall'analisi dei precedenti benchmark, restituendo una spesa media annua più elevata con la metodologia di calcolo asset. In considerazione della tipologia impiantistica, il generatore di calore standard è quello che presenta un costo medio annuo sempre maggiore rispetto alle altre tipologie impiantistiche, con valori che crescono con la rigidità delle condizioni climatiche esterne. Tra i generatori di calore a combustione si conferma la convenienza dei generatori a condensazione preferibilmente operanti a bassa temperatura.

Altra informazione di Interesse è il diverso trend ottenuto con le due metodologie di calcolo nel caso della pompa di calore che ha un comportamento completamente opposto se confrontato con il generatore a condensazione operante a bassa temperatura. Applicando l'asset rating, infatti, sia per gli edifici Liv-Iso-2 e per Liv-Iso-3, sembrerebbe che la pompa di calore non risulti conveniente, con una spesa media annua leggermente superiore a quella del generatore di calore. Con la metodologia di calcolo tailored, invece la pompa di calore è sensibilmente più conveniente in funzione del caso studio analizzato. La convenienza

maggiore si evidenzia per i profili di utilizzo  $P_{\text{risc-min}}$  e  $P_{\text{risc-med}}$ , mentre si sono riscontrati trend leggermente differenti con il livello di isolamento considerando il profilo  $P_{\text{risc-max}}$ . In particolare, nel caso di edifici Liv-Iso-2 i risultati tailored mostrano una leggera convenienza del generatore di calore, mentre nel caso di edifici di nuova costruzione (Liv-Iso-3) le differenze tra i due generatori convergono restituendo una spesa media molto simile tra loro.

Tabella 115 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-0: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			$P_{\text{risc-min}}$	$P_{\text{risc-med}}$	$P_{\text{risc-max}}$		$P_{\text{risc-min}}$	$P_{\text{risc-med}}$	$P_{\text{risc-max}}$		$P_{\text{risc-min}}$	$P_{\text{risc-med}}$	$P_{\text{risc-max}}$
Standard (radiatori)	A	1130	689	1057	1057	1435	1255	1344	1344	1729	1514	1620	1620
	B	1373	804	1276	1310	1744	1493	1684	1684	2101	1800	2030	2030
	C	1824	942	1722	1776	2317	1795	2215	2268	2791	2164	2670	2733
	D	2454	1516	2178	2390	3116	2144	2795	3063	3755	2585	3369	3691
	E	3476	2429	3152	3423	4415	2573	3706	4357	5318	3103	4468	5251
	F	6086	4095	4550	5961	7730	2892	4628	7616	9312	3487	5580	9184
Condensazione (radiatori)	A	815	517	690	690	1035	876	877	877	1247	1056	1056	1056
	B	1001	637	859	862	1271	1085	1095	1095	1532	1307	1319	1319
	C	1379	866	1225	1233	1751	1497	1559	1566	2109	1804	1879	1886
	D	1900	1474	1675	1732	2413	1936	2127	2200	2907	2334	2562	2650
	E	2937	2384	2722	2779	3730	2525	3315	3529	4493	3044	3995	4251
	F	5403	4134	4593	5254	6862	2939	4702	6674	8267	3543	5669	8043

Tabella 116 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-1: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			$P_{\text{risc-min}}$	$P_{\text{risc-med}}$	$P_{\text{risc-max}}$		$P_{\text{risc-min}}$	$P_{\text{risc-med}}$	$P_{\text{risc-max}}$		$P_{\text{risc-min}}$	$P_{\text{risc-med}}$	$P_{\text{risc-max}}$
Standard (radiatori)	A	391	195	267	267	497	335	339	339	598	403	408	408
	B	498	267	364	373	633	457	480	480	762	550	578	578
	C	694	399	547	564	882	682	703	720	1062	821	848	867
	D	861	664	684	706	1094	852	877	905	1318	1026	1057	1090
	E	1364	1181	1196	1225	1733	1251	1517	1553	2088	1507	1828	1871
	F	2496	2118	2353	2386	3170	1500	2400	3034	3819	1807	2892	3656
Condensazione (radiatori)	A	282	144	196	196	358	247	249	249	431	297	300	300
	B	363	199	271	277	461	340	352	352	555	410	424	424
	C	525	307	422	435	666	525	541	552	803	632	652	665
	D	666	522	530	543	846	670	691	707	1020	807	833	851
	E	1153	1011	1019	1033	1464	1074	1304	1320	1764	1293	1570	1590
	F	2216	1882	2091	2125	2814	1343	2149	2718	3390	1618	2589	3275

Tabella 117 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-2: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Standard (radiator)	A	321	144	200	200	408	249	254	254	492	300	305	305
	B	374	163	226	235	475	282	302	302	572	340	364	364
	C	505	250	349	365	641	430	451	466	772	518	543	561
	D	659	453	474	497	837	583	608	637	1009	703	733	768
	E	1013	813	832	858	1287	860	1051	1091	1550	1037	1266	1314
	F	1892	1556	1729	1765	2403	1101	1761	2247	2895	1326	2122	2707
Condensazione (radiator)	A	232	106	147	147	294	183	187	187	355	221	225	225
	B	272	122	168	175	346	210	222	222	417	253	267	267
	C	381	192	269	281	484	331	347	357	584	399	418	431
	D	510	356	367	383	648	459	480	498	781	553	578	600
	E	856	697	713	719	1087	738	904	925	1310	890	1089	1115
	F	1680	1390	1544	1565	2133	989	1582	2007	2570	1191	1906	2418
Condensazione (pannelli radianti)	A	208	95	131	131	264	164	167	167	317	198	201	201
	B	244	109	151	156	310	188	199	199	373	226	239	239
	C	341	172	241	252	434	296	311	320	522	357	374	385
	D	457	319	329	343	580	411	429	445	699	495	517	537
	E	766	624	638	644	973	661	809	828	1172	796	974	998
	F	1503	1244	1382	1401	1909	885	1416	1796	2300	1066	1706	2164
Pompa di calore (pannelli radianti)	A	384	98	159	159	250	94	104	104	301	114	125	125
	B	447	113	187	196	291	110	128	128	350	133	154	154
	C	665	140	282	302	433	143	188	197	522	172	227	237
	D	824	226	339	379	537	165	221	247	646	199	266	297
	E	1391	398	550	662	906	216	325	431	1091	260	392	519
	F	2592	824	915	1451	1688	298	477	945	2033	359	575	1139

Tabella 118 – Benchmark per il riscaldamento e Liv-Iso-3: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max		Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max		Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max
Standard (radiatori)	A	299	123	170	170	380	212	217	217	453	251	257	257
	B	339	140	195	203	431	242	263	263	514	287	312	312
	C	443	199	280	296	563	344	365	379	678	414	440	457
	D	594	376	401	426	754	487	512	542	909	587	617	652
	E	899	692	713	746	1141	735	900	941	1375	886	1084	1134
	F	1697	1379	1532	1580	2155	982	1570	2005	2596	1182	1892	2416
Condensazione (radiatori)	A	216	91	125	125	274	156	160	160	327	185	189	189
	B	247	104	144	150	314	180	193	193	375	213	229	229
	C	335	152	215	227	425	265	281	291	512	320	338	351
	D	460	294	315	333	584	385	405	423	703	464	487	510
	E	759	588	607	635	964	635	777	799	1162	764	936	962
	F	1506	1224	1359	1406	1913	889	1422	1791	2305	1071	1713	2157
Condensazione (pannelli radianti)	A	193	81	112	112	245	140	143	143	292	165	169	169
	B	221	93	129	135	281	161	173	173	335	191	205	205
	C	300	136	193	203	381	237	251	260	459	286	303	314
	D	412	263	282	299	523	345	362	379	630	416	436	456
	E	680	527	544	568	863	568	695	715	1040	684	838	861
	F	1348	1095	1217	1258	1712	796	1273	1603	2063	959	1534	1931
Pompa di calore (pannelli radianti)	A	142	42	61	61	180	74	78	78	217	90	93	93
	B	165	49	71	72	209	86	91	91	252	104	110	110
	C	246	67	107	108	312	121	136	137	376	146	164	165
	D	304	108	130	136	386	144	165	173	465	173	199	208
	E	513	190	234	245	652	201	279	312	786	242	336	376
	F	957	408	453	556	1215	288	460	706	1464	347	555	850

### 2.6.3 Raffrescamento

Anche per il servizio energetico di raffrescamento, le analisi condotte hanno evidenziato un legame di tipo non lineare tra gli indicatori ricavati con l'asset rating e quelli ottenuti dai profili tailored. In particolare, anche per la climatizzazione estiva è stato necessario definire un sistema di equazioni che permettesse di calcolare i valori minimo, medio e massimo dell'indicatore energetico normalizzato (IEN) tailored. A differenza del servizio riscaldamento, però, per il quale era stata definita una dipendenza dell'IEN con i Gradi Giorno, per il raffrescamento è stato definito un parametro climatico equivalente ovvero i Gradi Giorno Estivi calcolato a partire dai valori medio mensili della temperatura esterna.

Ciascuna equazione trovata, è stata poi moltiplicata per dei coefficienti correttivi che riuscissero ad approssimare con un errore limitato e accettabile il valore dell'energia primaria al variare dei Gradi Giorno Estivi.

La famiglia di equazioni trovata presenta una relazione matematica come quella dell'Equazione 13, funzione dei Gradi Giorno Estivi della località, del numero di ore effettivo di accensione dell'impianto, delle principali caratteristiche tecniche dell'impianto alle condizioni nominali (potenza e rendimento al 100%), dello stesso indicatore energetico calcolato con l'asset rating e da due coefficienti (a e b) che variano in funzione del livello di isolamento termico dell'edificio e del valore dell'indicatore che la singola equazione permette di calcolare.

Anche per il servizio energetico di raffrescamento sono state desunte tre tipologie di benchmark associati rispettivamente all'energia primaria non rinnovabile, al consumo dei vettori energetici e alla spesa media annua. I benchmark sono stati analizzati al variare della zona climatica, della categoria dell'edificio (E.1, E.2

ed E.5) e del livello di isolamento dell'edificio (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2, Liv-Iso-3). Sulla base di [1], è stata adottata un'unica tipologia impiantistica (una macchina frigorifera aria-aria) per la copertura del fabbisogno energetico.

I benchmark sono stati inoltre calcolati attraverso l'asset rating, che considera un funzionamento dell'impianto in continuo, e il tailored rating, facendo ricorso ai profili di utilizzo mostrati ai paragrafi 2.4.5.2 e 2.4.5.3 ( $P_{\text{raff-min}}$ ,  $P_{\text{raff-med}}$ ,  $P_{\text{raff-max}}$ ) basati su un numero di ore di accensione dell'impianto variabile. Si tiene a precisare che la metodologia di calcolo adottata conforme alle norme UNI/TS 11300 potrebbe portare a risultati non coerenti con l'effettivo comportamento del sistema edificio-impianto, specialmente nel caso estivo. Ciò comporterebbe una significativa differenza dei benchmark dall'effettivo consumo del vettore energetico riportato in bolletta. Questa è una delle tematiche che sarà affrontata nel terzo anno di attività di ricerca.

I benchmark tailored sono stati calcolati a partire dall'Equazione 13 e dai relativi coefficienti correttivi, mentre quelli asset attraverso la metodologia standard. I risultati relativi all'approccio tailored sono stati riportati solo per un prefissato numero di ore di accensione dell'impianto, fornendo un valore minimo, uno medio e uno massimo del singolo benchmark, corrispondenti al numero minimo (profilo  $P_{\text{raff-min}}$ ), medio (profilo  $P_{\text{raff-med}}$ ) e massimo (profilo  $P_{\text{raff-max}}$ ) di ore considerate per quella zona climatica.

Per brevità, nei successivi paragrafi si riportano i valori medi dei benchmark aggregati con lo scopo di evidenziare le principali differenze tra i due approcci utilizzati. Per i risultati di dettaglio si rimanda all'Appendice C – Benchmark per il raffrescamento.

Per una maggiore chiarezza di esposizione, le analisi di seguito riportate sono state distinte livello di isolamento in linea anche con i risultati delle simulazioni energetiche; per ogni livello di isolamento è stata mostrata la variazione della specifica tipologia di benchmark rispetto per la macchina frigorifera e al variare della zona climatica, la categoria dell'edificio e in base all'asset rating e il tailored rating.

Il vettore energetico considerato è l'energia elettrica, per il quale si è assunto un costo pari a 0.125 €/kWh.

### 2.6.3.1 Energia primaria

I benchmark associati all'energia primaria non rinnovabile sono stati calcolati attraverso l'asset rating e il tailored rating considerando una macchina frigorifera per la climatizzazione estiva; questi sono stati riportati al variare della zona climatica e della categoria di edificio (E.1, E.2 ed E.5). I risultati suddivisi per livello di isolamento (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3) sono mostrati rispettivamente da Tabella 119 a Tabella 122.

Dall'analisi dei benchmark tailored si osserva una significativa variazione dell'energia primaria non rinnovabile in funzione del numero di ore di accensione dell'impianto con una variazione percentuale più elevata rispetto l'asset rating per il profilo  $P_{\text{raff-min}}$  nella configurazione di edificio Liv-Iso-3 (nuove costruzioni); le percentuali variano dal 40% all'82% tendendo a crescere verso le zone climatiche più calde. Nel caso di edifici Liv-Iso-0 si sono ottenute le differenze più piccole dell'ordine del 30-50% nelle zone climatiche D ed E. Lo scostamento minore tra le due metodologie è invece sempre riscontrabile con il profilo  $P_{\text{raff-max}}$ ; nel caso di edifici identificati con Liv-Iso-0 la variazione minima è dell'ordine del 3-7%, mentre tende ad assumere valori significativamente maggiori (70%) all'aumentare del livello di isolamento del fabbricato.

È importante è evidenziare come il trend ottenuto sia opposto a quello del riscaldamento con valori di energia primaria non rinnovabile maggiori per le configurazioni di edificio più isolate.

Infine, relativamente alla destinazione d'uso, anche per la climatizzazione estiva si registra un fabbisogno energetico maggiore nel caso di edifici non residenziali in virtù delle differenti condizioni di simulazione impostate da normativa, sebbene la differenza sia molto più ridotta rispetto alla climatizzazione invernale.

Tabella 119 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-0: energia primaria non rinnovabile (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	2338	1510	1678	2101	2502	861	1377	2196	2720	887	1419	2315
	B	1543	1088	1368	1492	1650	930	1319	1599	1786	954	1365	1727
	C	1280	571	958	1185	1366	676	980	1246	1480	684	1002	1313
	D	1064	370	770	939	1135	591	847	975	1229	597	869	1014
	E	755	360	602	662	806	560	698	698	870	579	740	740
	F	38	19	27	27	38	26	27	27	37	25	26	26

Tabella 120 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-1: energia primaria non rinnovabile (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	5190	1723	1915	2796	5399	1043	1669	3134	6017	1000	1600	2899
	B	3374	1237	1721	2401	4107	1152	1740	2755	3900	1060	1620	2519
	C	2869	576	1087	1559	2822	758	1164	1670	3321	718	1106	1592
	D	2376	390	851	1162	2724	686	1037	1272	2747	643	970	1178
	E	1660	396	763	961	1920	692	1046	1046	1918	663	1003	1003
	F	99	57	79	79	250	222	224	224	104	82	83	83

Tabella 121 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-2: energia primaria non rinnovabile (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	8543	1851	2057	3058	9251	1041	1666	3130	10089	1052	1684	3208
	B	5426	1257	1851	2679	5875	1058	1675	2740	6399	1068	1694	2799
	C	4654	586	1114	1628	5035	726	1125	1640	5485	734	1135	1654
	D	3838	401	891	1222	4158	660	1011	1233	4527	668	1024	1249
	E	2680	410	801	1047	2899	682	1061	1061	3156	691	1074	1074
	F	113	66	91	91	117	94	95	95	120	97	98	98

Tabella 122 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-3: energia primaria non rinnovabile (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	10415	1880	2089	3218	11218	1044	1670	3247	12191	1054	1687	3304
	B	6603	1262	1874	2782	7111	1061	1686	2833	7724	1070	1702	2885
	C	5662	593	1126	1648	6098	734	1137	1662	6622	742	1147	1675
	D	4670	405	907	1251	5033	671	1032	1262	5466	679	1046	1278
	E	3256	412	810	1060	3504	688	1073	1073	3805	697	1087	1087
	F	122	73	100	100	124	101	102	102	129	106	107	107

### 2.6.3.2 Vettore energetico

La seconda tipologia di benchmark considerata è quella espresso come valore medio del consumo del vettore energetico principalmente impiegato per il raffrescamento, ossia l'energia elettrica. Questi benchmark sono

stati calcolati attraverso l'asset rating e il tailored rating per la tipologia impiantistica considerata (macchina frigorifera), al variare della zona climatica e della categoria di edificio (E.1, E.2 ed E.5). I risultati suddivisi per livello di isolamento (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3) sono mostrati rispettivamente da Tabella 123 a Tabella 126.

Dal confronto dei risultati si possono evincere considerazioni analoghe a quelle tratte per i benchmark associati all'energia primaria non rinnovabile, confermando una divergenza delle due metodologie variabile in funzione dell'effettivo orario di accensione dell'impianto e del livello di isolamento dell'edificio.

Tabella 123 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-0: vettore energetico energia elettrica (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	1199	774	860	1077	1283	441	706	1126	1395	455	728	1187
	B	791	558	701	765	846	465	686	895	916	478	709	955
	C	656	293	491	608	700	391	572	716	759	398	587	755
	D	546	190	395	482	582	357	519	599	630	363	533	622
	E	387	185	309	340	413	325	445	445	446	333	462	462
	F	20	10	14	14	20	13	14	14	19	13	13	13

Tabella 124 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-1: vettore energetico energia elettrica (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	2661	884	982	1434	2852	501	802	1458	3086	513	821	1487
	B	1730	635	883	1231	1853	525	811	1276	2000	533	827	1306
	C	1471	295	557	799	1575	425	656	929	1703	430	665	943
	D	1218	200	436	596	1303	387	593	723	1409	391	600	731
	E	851	203	391	493	910	363	552	552	984	368	561	561
	F	51	29	40	40	52	40	41	41	53	42	43	43

Tabella 125 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-2: vettore energetico energia elettrica (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	4381	949	1055	1568	4744	534	854	1605	5174	540	864	1645
	B	2783	645	949	1374	3013	540	858	1412	3281	545	867	1443
	C	2387	300	571	835	2582	435	682	989	2813	440	689	1002
	D	1968	205	457	627	2132	398	619	760	2321	402	626	769
	E	1374	210	411	537	1487	376	585	585	1618	380	592	592
	F	58	34	47	47	60	48	49	49	62	50	50	50

Tabella 126 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-3: vettore energetico energia elettrica (kWh).

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	5341	954	1061	1634	5753	535	856	1665	6252	541	865	1694
	B	3386	647	961	1427	3647	541	862	1458	3961	546	870	1483
	C	2904	304	577	845	3127	438	688	1006	3396	443	694	1017
	D	2395	208	465	642	2581	402	627	772	2803	406	633	780
	E	1670	211	415	543	1797	379	592	592	1951	384	599	599
	F	62	37	51	51	64	52	52	52	66	54	55	55

### 2.6.3.3 Spesa media annua

L'ultima tipologia di benchmark, desunta a partire dal consumo di energia elettrica, è quella della spesa media annua. I valori sono stati calcolati mediante l'asset rating e il tailored rating al variare della zona climatica e della destinazione d'uso (E.1 e E.2-E.5). I risultati suddivisi per livello di isolamento (Liv-Iso-0, Liv-Iso-1, Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3) sono mostrati rispettivamente da Tabella 127 a Tabella 130.

Il confronto tra l'asset rating e il tailored rating conferma quanto emerso dall'analisi dei precedenti benchmark, restituendo una spesa media annua più elevata con la metodologia di calcolo asset e crescente con il livello di isolamento dell'edificio.

Tabella 127 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-0: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	149	96	107	134	160	55	88	140	174	57	91	148
	B	98	69	87	95	105	59	84	102	114	61	87	110
	C	82	36	61	76	87	43	63	80	94	44	64	84
	D	68	24	49	60	72	38	54	62	78	38	55	65
	E	48	23	38	42	51	36	45	45	56	37	47	47
	F	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabella 128 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-1: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>		P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
Macchina frigorifera (split)	A	331	110	122	178	345	67	107	200	384	64	102	185
	B	215	79	110	153	262	74	111	176	249	68	103	161
	C	183	37	69	100	180	48	74	107	212	46	71	102
	D	152	25	54	74	174	44	66	81	175	41	62	75
	E	106	25	49	61	123	44	67	67	122	42	64	64
	F	6	4	5	5	16	14	14	14	7	5	5	5

Tabella 129 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-2: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			<i>P<sub>raff-min</sub></i>	<i>P<sub>raff-med</sub></i>	<i>P<sub>raff-max</sub></i>		<i>P<sub>raff-min</sub></i>	<i>P<sub>raff-med</sub></i>	<i>P<sub>raff-max</sub></i>		<i>P<sub>raff-min</sub></i>	<i>P<sub>raff-med</sub></i>	<i>P<sub>raff-max</sub></i>
Macchina frigorifera (split)	A	545	118	131	195	591	66	106	200	644	67	108	205
	B	346	80	118	171	375	68	107	175	409	68	108	179
	C	297	37	71	104	321	46	72	105	350	47	72	106
	D	245	26	57	78	265	42	65	79	289	43	65	80
	E	171	26	51	67	185	44	68	68	201	44	69	69
	F	7	4	6	6	7	6	6	6	8	6	6	6

Tabella 130 – Benchmark per il raffrescamento e Liv-Iso-3: spesa media annua [€].

Tipologia Impianto		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			<i>P<sub>raff-min</sub></i>	<i>P<sub>raff-med</sub></i>	<i>P<sub>raff-max</sub></i>		<i>P<sub>raff-min</sub></i>	<i>P<sub>raff-med</sub></i>	<i>P<sub>raff-max</sub></i>		<i>P<sub>raff-min</sub></i>	<i>P<sub>raff-med</sub></i>	<i>P<sub>raff-max</sub></i>
Macchina frigorifera (split)	A	665	119	132	203	716	67	107	207	778	67	108	211
	B	422	81	120	178	454	68	108	181	493	68	109	184
	C	362	38	72	105	389	47	73	106	423	47	73	107
	D	298	26	58	80	321	43	66	81	349	43	67	82
	E	208	26	52	68	224	44	69	69	243	44	69	69
	F	8	5	6	6	8	6	7	7	8	7	7	7

## 2.7 Risultati

Il lavoro svolto in questa seconda annualità di ricerca ha avuto l'ambizioso obiettivo di trovare un legame matematico tra la metodologia di calcolo standard (asset rating) utilizzata per la redazione degli Attestati di Prestazione Energetica (APE), con quella più complessa e dispendiosa impiegata per la redazione delle diagnosi energetiche (tailored rating).

In considerazione dell'importanza e del peso dell'attività di ricerca svolta, il lavoro è stato accuratamente pianificato in più fasi di lavoro, secondo le quali è stata suddivisa anche la trattazione del presente report: definizione dei casi studio, identificazione delle equazioni di correlazione a partire dalle simulazioni energetiche parametriche e definizione di benchmark.

La prima fase ha quindi riguardato la definizione dei casi studio e la loro caratterizzazione termofisica nonché l'identificazione dei fattori oggetto di parametrizzazione nelle simulazioni energetiche. Queste si sono basate principalmente sui risultati ottenuti nel primo anno di attività [1] in cui sono stati evidenziati i principali parametri che caratterizzano il parco edilizio italiano dai punti di vista, tipologico, costruttivo e impiantistico. Il contesto climatico è stato il primo aspetto esaminato per il quale sono stati scelti 25 Comuni in considerazione della loro distribuzione geografica nel territorio italiano, dei parametri climatici di riferimento, della popolazione e del numero di edifici (Tabella 19).

A seguito di un'analisi più accurata dei risultati raggiunti in [1], è stato possibile definire 24 casi studio differenti per categoria di destinazione d'uso, dimensione geometrica e condizioni al contorno (Tabella 21) con lo scopo di inglobare nelle simulazioni parametriche più variabili possibile.

La caratterizzazione termofisica dell'involucro edilizio è stata condotta per tutte le strutture individuate in [1] investigando l'andamento del principale parametro che influenza lo scambio termico, ossia la trasmittanza termica, al variare di altre grandezze di interesse quali, ad esempio, lo spessore e la massa superficiale. L'analisi ha permesso di ridurre sensibilmente il numero delle componenti iniziali, scartando tutte quelle che presentavano proprietà termiche molto simili tra loro e che quindi sarebbe stato ridondante simulare da punto di vista energetico.

Sono state selezionate 152 componenti verticali e 52 orizzontali contraddistinte da diverse tipologie costruttive, spessori e trasmittanze termiche. In considerazione della trasmittanza termica, la variabilità maggiore è stata riscontrata nelle componenti opache verticali fortemente influenzata dalla tipologia costruttiva; questa dipendenza, invece, non è stata osservata nelle componenti orizzontali. Le configurazioni di componenti opache adottate sono sintetizzate in Tabella 131 di cui si riportano i range di spessore e di trasmittanza termica raggruppate per livello di isolamento e, solo per la componente opaca verticale, differenziando per tipologia costruttiva.

Relativamente alla componente trasparente, invece, sono state definite tre tipologie di infissi con telaio in legno (il più diffuso [1]) e con vetro singolo o vetrocamera, caratterizzati da una trasmittanza termica compresa tra 2.7 e 1.3 W/m<sup>2</sup>K.

A seguito della caratterizzazione termofisica del fabbricato e del contesto climatico, si sono definiti i servizi energetici, nonché la relativa tipologia impiantistica installata, facendo delle assunzioni in linea con i risultati raggiunti in [1] per ogni sottosistema (generazione, regolazione, distribuzione ed emissione).

In merito ai servizi energetici da considerare nelle analisi parametriche, sono stati scelti i tre più caratteristici evidenziati in [1], nonché quelli che possono presentare una significativa differenza di risultato tra l'asset rating e il tailored rating; questi sono la produzione di acqua calda sanitaria, la climatizzazione invernale e la climatizzazione estiva.

In merito al servizio di produzione di acqua calda sanitaria, le assunzioni hanno riguardato il solo sistema di generazione, selezionando sei principali tipologie impiantistiche (un boiler elettrico, tre generatore di calore standard, un generatore di calore a condensazione e una pompa di calore) eventualmente integrate con uno o più pannelli di solare termico a servizio della sola produzione di acqua calda sanitaria (soluzione maggiormente diffusa e comune [1]).

Tabella 131 – Caratterizzazione edilizia e geometrica dei ventiquattro casi studio.

<b>Componente</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Livello di isolamento [-]</b>	<b>Spessore [cm]</b>	<b>Trasmittanza Termica – U [W/m<sup>2</sup>K]</b>
<i>Parete verticale</i>	Muratura portante	Liv-Iso-0	24-64	3.22-0.95
<i>Parete verticale</i>	Cemento armato con tamponatura	Liv-Iso-0	19-64	1.56-0.60
<i>Parete verticale</i>	Muratura portante	Liv-Iso-1	29-69	0.53-0.38
<i>Parete verticale</i>	Cemento armato con tamponatura	Liv-Iso-1	24-69	0.49-0.33
<i>Parete verticale</i>	Muratura portante	Liv-Iso-2	34-74	0.29-0.24
<i>Parete verticale</i>	Cemento armato con tamponatura	Liv-Iso-2	29-74	0.27-0.19
<i>Parete verticale</i>	Nuove costruzioni	Liv-Iso-3	30-58	0.21-0.13
<i>Solaio inferiore</i>	Igloo/laterocemento/calcestruzzo	Liv-Iso-0	34-56	1.68-1.45
<i>Solaio inferiore</i>	Igloo/laterocemento/calcestruzzo	Liv-Iso-1	39-61	0.67-0.55
<i>Solaio inferiore</i>	Igloo/laterocemento/calcestruzzo	Liv-Iso-2	44-66	0.38-0.34
<i>Solaio inferiore</i>	Igloo/laterocemento/calcestruzzo	Liv-Iso-3	48-72	0.27-0.20
<i>Solaio superiore</i>	Legno/laterocemento	Liv-Iso-0	8-36	1.68-1.45
<i>Solaio superiore</i>	Legno/laterocemento	Liv-Iso-1	13-41	0.67-0.55
<i>Solaio superiore</i>	Legno/laterocemento	Liv-Iso-2	18-54	0.38-0.34
<i>Solaio superiore</i>	Legno/laterocemento	Liv-Iso-3	22-64	0.27-0.20

Per la climatizzazione invernale, invece, è stato necessario fare assunzioni anche per gli altri sottosistemi impiantistici essendo questi fortemente variabili con la tipologia impiantistica, nonché con l'epoca di realizzazione.

In primo luogo sono state assunte due possibili configurazioni di impianto: autonomo e, solo nel caso di edifici a torre, centralizzato. Sono state poi definite la tipologie dei terminali di emissione, di regolazione e di distribuzione in considerazione del valore assunto dal rispettivo rendimento medio mensile della tipologia prescelta.

In quest'ottica, come sistema di emissione sono stati scelti i radiatori e i pannelli radianti, quest'ultimi, però, nella sola configurazione di impianto autonomo, essendo poco probabile il loro utilizzo in impianti centralizzati.

La regolazione è stata ipotizzata di zona con sonda climatica esterna con azione proporzionale per il sistema autonomo, e climatica con controllo per singolo ambiente sempre con azione proporzionale nel caso di configurazioni centralizzate. Per entrambe le configurazioni impiantistiche si è deciso di adottare una distribuzione con collettori con un livello di isolamento variabile in funzione del livello di isolamento del fabbricato.

Per il sistema più importante, quello di generazione, sono stati assunti tre generatori standard (monostadio, multistadio e modulante) e uno a condensazione, tutti operanti ad alta temperatura, ossia collegati ai radiatori come elementi terminali, sia in caso di impianto autonomo che centralizzato. Per gli edifici meno disperdenti, caratterizzati cioè da un buon livello di isolamento del fabbricato (Liv-Iso-2 e Liv-Iso-3), nella sola configurazione di impianto autonomo sono state considerate altre due possibili soluzioni: un generatore a condensazione e una pompa di calore entrambi operanti a bassa temperatura, ossia collegati ai pannelli radianti come elementi terminali. Per la configurazione a pompa di calore, si è inoltre deciso di apportare una modifica al sistema di distribuzione prevedendo l'installazione di un accumulo termico, essendo questa soluzione la più diffusa.

In merito alla climatizzazione estiva, invece, in accordo con i risultati evidenziati in [1], è stata definita come unica tipologia impiantistica una macchina frigorifera aria-aria dotata di split come terminali di immissione. Le caratteristiche tecniche di ciascuna tipologia impiantistica individuata, come ad esempio la potenza, sono state desunte in accordo con i risultati emersi dall'analisi degli APE in [1] tale da garantire comunque la copertura del fabbisogno energetico per ogni servizio energetico.

In aggiunta alle tipologie impiantistiche descritte, è stata anche ipotizzata la presenza o meno di un impianto fotovoltaico di potenza complessiva di quasi 3 kW per la sola produzione di energia elettrica.

L'ultimo aspetto studiato per una completa caratterizzazione dei casi studio è quello legato ai profili di utilizzo del sistema edificio-impianto; questi risultano di estrema importanza per effettuare una corretta analisi parametrica non solo con la metodologia asset, ossia quella dell'APE, ma anche con quella tailored. A tale riguardo, la metodologia tailored adottata modifica i seguenti importanti aspetti della metodologia asset:

1. produzione di acqua calda sanitaria: il metodo di calcolo del volume di acqua consumato per usi igienici sanitari non è stato più basato sulla superficie utile dell'immobile, ma sul numero di fruitori del servizio e sull'effettivo consumo medio giornaliero di acqua per persona appositamente stimato. Per questo servizio energetico, l'analisi si è basata sulla categoria E.1 e quindi su valori di consumo per persona più cautelativi rispetto alle altre categorie (E.2 ed E.5), caratterizzate solitamente da consumi inferiori;
2. riscaldamento: sono stati definiti tre profili di orario di accensione degli impianti differenti sulla base di dati reperiti in Letteratura (su cui si sono basati due profili di utilizzo) e in conformità con la normativa vigente (per un profilo di utilizzo). Per la categoria E.1 si è analizzato un campione di dati Istat, mentre per il settore non residenziale si è fatto riferimento a dati disponibili in rete per diverse destinazioni d'uso;
3. raffrescamento: sono stati definiti tre profili di orario di accensione dell'impianto complementari a quelli del riscaldamento non essendo stati reperiti campioni di dati analoghi a quelli utilizzati per il precedente servizio energetico.

I profili definiti per ogni servizio energetico e utilizzati nelle analisi parametriche sono riportati sinteticamente in Tabella 132.

La seconda fase dell'attività di ricerca è stata quella più corposa e rilevante, in quanto comprendente lo svolgimento delle numerose simulazioni energetiche attentamente pianificate, e la correlata fase di analisi dei risultati ottenuti. Per tutti i servizi energetici, si è adottata una metodologia di analisi standardizzata che può essere così sintetizzata:

1. analisi dell'energia primaria derivante dall'asset rating e dal tailored rating al variare del caso studio, del contesto climatico prescelto e della tipologia impiantistica;
2. confronto dell'energia primaria derivante dall'asset rating con quella restituita applicando i tre profili di utilizzo tailored;
3. calcolo di un indicatore energetico normalizzato (IEN), determinato come rapporto tra l'energia primaria ottenuta con i profili tailored e altri parametri caratteristici dello specifico servizio energetico indagato, tra cui l'energia restituita dall'asset rating;
4. identificazione di una correlazione matematica tra le due metodologie di calcolo;
5. prima verifica delle relazioni identificate al punto 4 con i risultati delle simulazioni energetiche ed eventuale definizione di coefficienti correttivi;
6. seconda verifica nel caso di definizione e adozione di coefficienti correttivi, di cui al punto 5.

Entrando più nel dettaglio, il primo servizio energetico indagato è stato quello della produzione di acqua calda sanitaria per il quale le differenze più significative sono state riscontrate al variare della tipologia del generatore di calore e del contesto climatico. Le analisi hanno evidenziato un legame sempre di tipo lineare tra l'energia primaria totale stimata con l'asset rating e quella derivante dal tailored rating, permettendo di definire un'equazione di correlazione (Equazione 4) in cui l'indicatore tailored è funzione del medesimo indicatore calcolato con l'approccio asset, del volume di acqua calda sanitaria, calcolato sia con il metodo asset che con quello tailored (profilo di utilizzo), e della temperatura esterna media della località di simulazione. Nell'Equazione 4 il coefficiente angolare  $m$  e l'intercetta  $q$  assumono valori differenti in funzione della tipologia impiantistica (Tabella 133).

Tabella 132 – Profili di utilizzo definiti per la produzione di acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento

Categoria	Zona Climatica	Acqua calda sanitaria [l/giorno]			Riscaldamento [h]			Raffrescamento [h]		
		P <sub>acs-min</sub>	P <sub>acs-med</sub>	P <sub>acs-max</sub>	P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>	P <sub>raff-min</sub>	P <sub>raff-med</sub>	P <sub>raff-max</sub>
E.1	A	172	344	516	3	6	6	9	10	16
	B				3	6	8	6	9	14
	C				3	7	10	4	8	12
	D				4	8	12	3	7	10
	E				6	9	14	3	6	8
	F				9	10	16	3	6	6
E.2-E.5	A	-	-	-	5	6	6	5	8	16
	B				5	8	8	5	8	14
	C				5	8	10	5	8	12
	D				5	8	12	5	8	10
	E				5	8	14	5	8	8
	F				5	8	16	5	6	6

In caso di integrazione con il solare termico, non è stato possibile trovare delle relazioni matematiche univoche e di semplice utilizzo con l'approccio di analisi descritto in precedenza; pertanto si è deciso di parametrizzare la producibilità media mensile dell'impianto al variare del numero di pannelli e del contesto climatico. Per l'analisi è stato introdotto un nuovo parametro (chiamato parametro climatico – PC) dato dal prodotto tra l'irradianza solare globale della località e la temperatura alla quale si porterebbe l'acqua con il solare termico per la sola copertura del servizio di produzione di acqua calda sanitaria. Questo approccio ha permesso di definire l'Equazione 8, che consente di determinare la producibilità del solare termico in funzione della producibilità media pesata (Tabella 134), dei parametri climatici medi mensili della città che si sta considerando ( $PC_{mensile,città}$ ) e di riferimento ( $PC_{mediomensile,riferimento}$  – Tabella 134), di un fattore correttivo ( $F_{ST}$  – Tabella 134), del numero di pannelli effettivamente installati ( $n_{pannelli}$ ) e di una costante ( $k$ ) che tiene conto del volume d'acqua effettivamente richiesto (Equazione 9). Nota la producibilità ( $P_{ST}$ ), si determina quindi il volume di acqua coperto dal solo solare termico (Equazione 10) che sottratto al volume effettivamente richiesto permette di calcolare quello da compensare con altra soluzione impiantistica e che deve essere considerato nell'Equazione 4.

Tabella 133 – Servizio di produzione dell'acqua calda sanitaria: valori del coefficiente angolare [m] e dell'intercetta [q] al variare della tipologia impiantistica da utilizzare nell'Equazione 4.

Tipologia impiantistica	Coefficiente angolare [m]	Intercetta [q]
Boiler elettrico	0.8900	0
Caldaia monostadio	0.8699	-0.0056
Caldaia multistadio	0.8715	-0.0052
Caldaia modulante	0.8867	0.0004
Caldaia a condensazione	0.8465	-0.0161
Pompa di calore	0.8904	0

Tabella 134 – Parametro climatico medio mensile di riferimento, fattore di correzione  $F_{ST}$  e producibilità media mensile pesata del solare termico.

Mese	Parametro climatico medio di riferimento	Fattore correttivo	Producibilità media pesata
	$PC_{medio,rif} [MJ^{\circ}C/m^2]$	$F_{ST} [-]$	$P_{STpesata} [kWh]$
gennaio	618	1.015	43.89
febbraio	947	0.991	66.93
marzo	1303	0.972	96.46
aprile	1678	0.955	129.00
maggio	1964	0.946	159.03
giugno	2039	0.943	180.38
luglio	2047	0.942	187.71
agosto	1797	0.950	177.95
settembre	1420	0.965	151.70
ottobre	1000	0.985	114.72
novembre	651	1.008	79.32
dicembre	528	1.025	65.84

Per i servizi energetici di riscaldamento e raffrescamento, invece, le analisi hanno evidenziato sempre un legame di tipo non lineare tra l'asset rating e il tailored rating. Per questo motivo il procedimento di analisi è stato più complesso e, dopo la fase di normalizzazione dei dati, ha portato alla definizione di un sistema di tre equazioni di correlazione che permette il calcolo dell'indicatore energetico normalizzato minimo ( $IEN_{min}$ ), medio ( $IEN_{med}$ ) e massimo ( $IEN_{max}$ ).

Per la climatizzazione invernale, le tre equazioni sono esprimibili attraverso l'Equazione 12 in cui  $IEN$  è funzione dei Gradi Giorno della località, del numero di ore di accensione dell'impianto, delle principali caratteristiche tecniche dell'impianto (potenza e rendimento), del medesimo indicatore energetico calcolato con l'asset rating e di due coefficienti,  $a$  e  $b$  (Tabella 135), che dipendono a loro volta dal livello di isolamento termico dell'edificio, dalla tipologia impiantistica nonché dal valore dell'indicatore normalizzato ricercato (minimo, medio o massimo).

A seguito di una prima verifica, si è reso necessario affinare ulteriormente il risultato introducendo dei coefficienti correttivi (pesi) da applicare alle tre equazioni trovate. Così facendo, l'indicatore tailored può essere semplicemente calcolato come combinazione delle tre equazioni moltiplicate per il rispettivo coefficiente correttivo al variare della località.

Inoltre, grazie a verifiche aggiuntive condotte, si è evinto come il sistema di equazioni trovato per la categoria E.1 e per la configurazione autonoma sia estendibile sia alla configurazione centralizza, che alle altre categorie di destinazione d'uso (E.2 e E.5), con un errore relativo accettabile.

A differenza del riscaldamento, per il quale era stata definita una dipendenza dell' $IEN$  con i Gradi Giorno, per il raffrescamento non è fornito alcun parametro equivalente per differenziare il contesto climatico. Per questo motivo, a partire dai valori medio mensili di temperatura e dall'escursione giornaliera estiva, entrambi forniti dalla normativa [67], sono stati definiti i Gradi Giorno Estivi. Per il loro calcolo è stato assunto un andamento di tipo sinusoidale della temperatura con valore medio pari al valore mensile della località in esame. Noto l'andamento della temperatura media giornaliera, si è proceduto con il calcolo delle differenze positive rispetto alla temperatura interna di  $26^{\circ}C$ , le quali, sommate per ciascun mese, hanno portato al calcolo dei Gradi Giorno Estivi.

Per la climatizzazione estiva, quindi, il sistema di equazioni è esprimibile attraverso l'Equazione 13, anch'essa funzione delle condizioni climatiche della località (Gradi Giorno estivi), del numero di ore di accensione dell'impianto, delle principali caratteristiche tecniche dell'impianto alle condizioni nominali (potenza e EER), del medesimo indicatore energetico calcolato con il profilo asset e da due coefficienti,  $a$  e  $b$ , che dipendono dal livello di isolamento termico dell'edificio e del valore dell'indicatore normalizzato ricercato (Tabella 136).

Tabella 135 – Servizio energetico riscaldamento: valori dei coefficienti a e b al variare della tipologia impiantistica e del livello di isolamento dell'edificio.

Tipologia impiantistica	Indicatore energetico normalizzato IEN	Livello di isolamento dell'edificio							
		Liv-Iso-0		Liv-Iso-1		Liv-Iso-2		Liv-Iso-03	
		a	b	a	b	a	b	a	b
Generatore standard (alta temperatura)	Minimo	0.180	-1.441	0.039	-1.238	0.017	-1.140	0.010	-1.084
	Medio	0.034	-1.267	0.010	-1.116	0.005	-1.028	0.003	-0.979
	Massimo	0.065	-1.399	0.023	-1.276	0.011	-1.190	0.007	-1.142
Generatore a condensazione (alta temperatura)	Minimo	0.0131	-1.419	0.039	-1.238	0.017	-1.140	0.010	-1.084
	Medio	0.0208	-1.229	0.010	-1.116	0.005	-1.028	0.003	-0.979
	Massimo	0.0425	-1.373	0.023	-1.276	0.011	-1.190	0.007	-1.142
Generatore a condensazione (bassa temperatura)	Minimo	-	-	-	-	0.021	-1.214	0.020	-1.505
	Medio	-	-	-	-	0.005	-1.086	0.030	-1.292
	Massimo	-	-	-	-	0.012	-1.245	0.045	-1.393
Pompa di calore (bassa temperatura)	Minimo	-	-	-	-	0.025	-1.457	0.019	-1.396
	Medio	-	-	-	-	0.008	-1.326	0.003	-1.208
	Massimo	-	-	-	-	0.007	-1.358	0.006	-1.334

Tabella 136 – Servizio energetico raffrescamento: valori dei coefficienti a e b al variare del livello di isolamento dell'edificio.

Tipologia impiantistica	Indicatore energetico normalizzato IEN	Livello di isolamento dell'edificio							
		Liv-Iso-0		Liv-Iso-1		Liv-Iso-2		Liv-Iso-03	
		a	b	a	b	a	b	a	b
Macchina frigorifera	Minimo	0.011	-1.059	0.035	-1.219	0.055	-1.307	0.006	-1.236
	Medio	0.011	-1.118	0.014	-1.186	0.019	-1.254	0.020	-1.275
	Massimo	0.009	-1.126	0.011	-1.226	0.008	-1.244	0.053	-1.320

A seguito di verifiche preliminari, anche per la climatizzazione estiva è stato necessario introdurre dei coefficienti correttivi delle tre equazioni al variare della località considerata; in questo modo l'indicatore tailored può essere semplicemente calcolato come combinazione delle tre equazioni moltiplicate per il rispettivo coefficiente correttivo al variare della località.

Infine, anche per la climatizzazione estiva è stato possibile estendere il sistema di equazioni trovato per la categoria E.1 alle altre categorie di destinazione d'uso (E.2 e E.5) con un errore relativo più variabile rispetto al caso della climatizzazione invernale, ma comunque ritenuto accettabile.

L'ultima fase del lavoro ha riguardato il calcolo di benchmark per le casistiche studiate. Questi sono stati determinati solo a carattere esemplificativo, in quanto tutte le equazioni trovate sono potenzialmente applicabili a qualsiasi caso studio semplicemente basandosi sui risultati riportati nell'APE, quindi possono essere utilizzate in contesti climatici e per casi studio anche completamente diversi da quelli indagati.

I benchmark sono stati categorizzati in base al parametro cui sono associati, ossia l'energia primaria, il consumo del vettore energetico impiegato e la spesa media annua. Questi sono stati desunti per le tre categorie d'uso analizzate al variare della tipologia impiantistica, del livello di isolamento del fabbricato, del contesto climatico nonché l'asset rating e il tailored rating, permettendo di evidenziare le discrepanze tra l'applicazione delle due metodologie applicate a parità di configurazione adottata.

Si riporta a titolo esemplificativo in Tabella 137 il benchmark associato al consumo del principale vettore energetico impiegato per la produzione di acqua calda sanitaria, mediato su tutti i casi studio di categoria E.1, al variare della zona climatica e calcolato mediante l'asset rating e per due profili di utilizzo ( $P_{acs-min}$  e  $P_{acs-max}$ ). Il confronto dei benchmark mostra come l'approccio tailored, già nell'ipotesi di un solo fruente del servizio ( $P_{acs-min}$ ), restituisca un valore sempre superiore rispetto all'asset rating; al crescere dei fruitori ( $P_{acs-max}$ ), le divergenze dei due approcci aumentano. Considerando che il calcolo tailored si basa su un volume di

acqua calda sanitaria consumato appositamente stimato, e quindi più realistico, è possibile ipotizzare che l'asset rating restituisca un fabbisogno, nonché un consumo, sottostimato quanto più è maggiore il numero di fruitori del servizio. Anche la copertura del solare termico è fortemente variabile con le due metodologie di calcolo risultando percentualmente maggiore nel calcolo asset.

Nella climatizzazione invernale, l'asset rating restituisce un output sempre maggiore di quello tailored con discrepanze variabili in funzione dell'effettivo numero di ore di accensione dell'impianto e della zona climatica considerata. A titolo esemplificativo, si riportano i risultati dei benchmark associati alla spesa media annua per il riscaldamento, mediati per ogni caso studio per le tre categorie di destinazione d'uso, al variare della zona climatica, del livello di isolamento del fabbricato e applicando l'asset rating e i tre profili tailored, per le seguenti tipologie di impianto:

- generatore di calore standard: calcolato come valore medio dei tre generatori standard (Tabella 138);
- generatore a condensazione operante ad alta temperatura, ossia con una temperatura di esercizio di 80-60°C (Tabella 139);
- generatori operanti a bassa temperatura, ossia con una temperatura di esercizio di 35-30 °C (Tabella 140), in cui i valori in nero sono relativi al generatore a condensazione mentre quelli in rosso alla pompa di calore.

Tabella 137 – Produzione di acqua calda sanitaria per la categoria E.1: confronto dei benchmark medi associati al consumo del principale vettore energetico calcolato con l'asset rating e con il profilo  $P_{acs-min}$  al variare della configurazione impiantistica e della zona climatica (ST-0: senza solare termico, ST-1: un pannello di solare termico, ST-2: due pannelli di solare termico).

Vettore energetico principale	Zona Climatica	Asset – media			Tailored – $P_{acs-min}$			Tailored – $P_{acs-max}$		
		ST-0	ST-1	ST-2	ST-0	ST-1	ST-2	ST-0	ST-1	ST-2
Boiler (energia elettrica) [kWh]	A	1975	1015	382	2109	1402	696	6328	5119	3910
	B	1923	1004	406	2053	1383	712	6160	5013	3865
	C	2029	1134	562	2166	1537	909	6498	5422	4347
	D	2065	1180	621	2205	1593	980	6615	5567	4519
	E	2217	1322	769	2367	1769	1170	7101	6077	5053
	F	3113	2600	2550	3323	3271	3218	9970	9880	9790
Standard (metano) [Nm <sup>3</sup> ]	A	193	43	3	202	43	3	605	350	88
	B	188	45	5	196	46	5	589	343	95
	C	198	63	14	207	65	14	621	390	155
	D	202	70	19	211	72	19	633	406	175
	E	216	87	27	227	91	29	680	458	229
	F	304	292	281	319	307	295	957	937	917
Condensazione (metano) [Nm <sup>3</sup> ]	A	182	40	3	180	34	1	539	340	61
	B	177	43	5	175	36	3	524	318	74
	C	187	60	13	185	52	11	555	354	132
	D	190	66	18	188	58	15	565	368	151
	E	204	82	26	203	75	22	609	415	194
	F	286	275	265	289	278	267	868	850	832
Pompa di calore (energia elettrica) [kWh]	A	480	107	9	512	188	20	1537	982	393
	B	467	111	15	499	190	28	1497	969	407
	C	493	150	35	526	237	63	1579	1084	577
	D	502	164	46	536	254	80	1607	1126	636
	E	538	200	66	575	300	109	1725	1255	780
	F	756	621	598	807	783	759	2422	2381	2340

In considerazione dei tre profili di accensione definiti ( $P_{risc-min}$ ,  $P_{risc-med}$  e  $P_{risc-max}$ ), si osserva che il profilo  $P_{risc-max}$  restituisce un valore che converge a quello dell'asset rating, evidenziando come le ore previste da normativa permettano di soddisfare il reale fabbisogno energetico dell'edificio. Al diminuire delle ore di accensione dell'impianto, i due approcci tendono a divergere con la rigidità delle condizioni climatiche esterne.

Il risultato più significativo riscontrato riguarda i generatori a bassa temperatura (Tabella 140) per i quali i due approcci restituiscono un trend completamente diverso. Nella valutazione asset, infatti, non si riscontra una convenienza delle soluzioni a pompa di calore rispetto ai generatori a condensazione in nessuna zona climatica e per nessuno dei due livelli di isolamento considerati. Ciò è invece piuttosto evidente con la metodologia tailored specialmente per ore di funzionamento significativamente lontane da quelle massime previste da normativa ( $P_{risc-max}$ ) per la zona climatica considerata e per edifici di nuova costruzione (Liv-Iso-3).

Questo risultato, oltre a evidenziare le differenze tra le due metodologie di calcolo, sottolinea la necessità di integrare i risultati dell'asset rating al fine di effettuare una valutazione tecnico-economica più accurata per le diverse tecnologie impiantistiche.

Tabella 138 – Climatizzazione invernale con generatore di calore standard: confronto dei benchmark medi associati alla spesa media annua [€] calcolati con l'asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.

Livello di isolamento del fabbricato		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			$P_{risc-min}$	$P_{risc-med}$	$P_{risc-max}$		$P_{risc-min}$	$P_{risc-med}$	$P_{risc-max}$		$P_{risc-min}$	$P_{risc-med}$	$P_{risc-max}$
Liv-Iso-0	A	1130	689	1057	1057	1435	1255	1344	1344	1729	1514	1620	1620
	B	1373	804	1276	1310	1744	1493	1684	1684	2101	1800	2030	2030
	C	1824	942	1722	1776	2317	1795	2215	2268	2791	2164	2670	2733
	D	2454	1516	2178	2390	3116	2144	2795	3063	3755	2585	3369	3691
	E	3476	2429	3152	3423	4415	2573	3706	4357	5318	3103	4468	5251
	F	6086	4095	4550	5961	7730	2892	4628	7616	9312	3487	5580	9184
Liv-Iso-1	A	391	195	267	267	497	335	339	339	598	403	408	408
	B	498	267	364	373	633	457	480	480	762	550	578	578
	C	694	399	547	564	882	682	703	720	1062	821	848	867
	D	861	664	684	706	1094	852	877	905	1318	1026	1057	1090
	E	1364	1181	1196	1225	1733	1251	1517	1553	2088	1507	1828	1871
	F	2496	2118	2353	2386	3170	1500	2400	3034	3819	1807	2892	3656
Liv-Iso-2	A	321	144	200	200	408	249	254	254	492	300	305	305
	B	374	163	226	235	475	282	302	302	572	340	364	364
	C	505	250	349	365	641	430	451	466	772	518	543	561
	D	659	453	474	497	837	583	608	637	1009	703	733	768
	E	1013	813	832	858	1287	860	1051	1091	1550	1037	1266	1314
	F	1892	1556	1729	1765	2403	1101	1761	2247	2895	1326	2122	2707
Liv-Iso-3	A	299	123	171	171	380	213	217	217	453	252	257	257
	B	339	140	196	205	431	243	263	263	514	288	312	312
	C	443	199	282	297	563	344	365	379	678	414	440	457
	D	594	377	399	423	754	487	512	542	909	587	617	652
	E	899	694	714	740	1141	735	900	941	1375	885	1084	1134
	F	1697	1383	1537	1574	2155	978	1565	2005	2596	1178	1885	2416

Tabella 139 – Climatizzazione invernale con generatore di calore a condensazione operante ad alta temperatura (radiatori): confronto dei benchmark medi associati alla spesa media annua [€] calcolati con l’asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.

Livello di isolamento del fabbricato		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>		P <sub>risc-min</sub>	P <sub>risc-med</sub>	P <sub>risc-max</sub>
Liv-Iso-0	A	815	517	690	690	1035	876	877	877	1247	1056	1056	1056
	B	1001	637	859	862	1271	1085	1095	1095	1532	1307	1319	1319
	C	1379	866	1225	1233	1751	1497	1559	1566	2109	1804	1879	1886
	D	1900	1474	1675	1732	2413	1936	2127	2200	2907	2334	2562	2650
	E	2937	2384	2722	2779	3730	2525	3315	3529	4493	3044	3995	4251
	F	5403	4134	4593	5254	6862	2939	4702	6674	8267	3543	5669	8043
Liv-Iso-1	A	282	144	196	196	358	247	249	249	431	297	300	300
	B	363	199	271	277	461	340	352	352	555	410	424	424
	C	525	307	422	435	666	525	541	552	803	632	652	665
	D	666	522	530	543	846	670	691	707	1020	807	833	851
	E	1153	1011	1019	1033	1464	1074	1304	1320	1764	1293	1570	1590
	F	2216	1882	2091	2125	2814	1343	2149	2718	3390	1618	2589	3275
Liv-Iso-2	A	232	106	147	147	294	183	187	187	355	221	225	225
	B	272	122	168	175	346	210	222	222	417	253	267	267
	C	381	192	269	281	484	331	347	357	584	399	418	431
	D	510	356	367	383	648	459	480	498	781	553	578	600
	E	856	697	713	719	1087	738	904	925	1310	890	1089	1115
	F	1680	1390	1544	1565	2133	989	1582	2007	2570	1191	1906	2418
Liv-Iso-3	A	216	91	126	126	274	157	160	160	327	186	189	189
	B	247	104	145	152	314	181	193	193	375	214	229	229
	C	335	153	217	229	425	265	281	291	512	319	338	351
	D	460	297	309	325	584	384	404	423	703	462	487	510
	E	759	596	613	619	964	631	774	799	1162	760	933	962
	F	1506	1238	1376	1393	1913	879	1406	1791	2305	1058	1694	2157

Tabella 140 – Climatizzazione invernale con generatori operanti a bassa temperatura (a condensazione in nero e pompa di calore in rosso): confronto dei benchmark medi associati alla spesa media annua [€] calcolati con l’asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.

Livello di isolamento del fabbricato		E.1				E.2				E.5			
		APE	Tailored			APE	Tailored			APE	Tailored		
			Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max		Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max		Prisc-min	Prisc-med	Prisc-max
Liv-Iso-2	A	208	95	131	131	264	164	167	167	317	198	201	201
	B	244	109	151	156	310	188	199	199	373	226	239	239
	C	341	172	241	252	434	296	311	320	522	357	374	385
	D	457	319	329	343	580	411	429	445	699	495	517	537
	E	766	624	638	644	973	661	809	828	1172	796	974	998
	F	1503	1244	1382	1401	1909	885	1416	1796	2300	1066	1706	2164
Liv-Iso-3	A	193	81	113	113	245	140	143	143	292	166	169	169
	B	221	93	130	136	281	162	173	173	335	192	205	205
	C	300	137	194	205	381	237	251	260	459	286	303	314
	D	412	266	277	291	523	344	362	379	630	414	436	456
	E	680	533	548	554	863	565	693	715	1040	680	835	861
	F	1348	1108	1231	1246	1712	786	1258	1603	2063	947	1516	1931
Liv-Iso-2	A	384	98	159	159	250	94	104	104	301	114	125	125
	B	447	113	187	196	291	110	128	128	350	133	154	154
	C	665	140	282	302	433	143	188	197	522	172	227	237
	D	824	226	339	379	537	165	221	247	646	199	266	297
	E	1391	398	550	662	906	216	325	431	1091	260	392	519
	F	2592	824	915	1451	1688	298	477	945	2033	359	575	1139
Liv-Iso-3	A	276	82	119	119	180	74	78	78	217	90	93	93
	B	322	95	137	140	209	86	91	91	252	104	110	110
	C	479	131	209	210	312	121	136	137	376	146	164	165
	D	593	210	254	265	386	144	165	173	465	173	199	208
	E	1001	371	456	479	652	201	279	312	786	242	336	376
	F	1866	795	884	1083	1215	288	460	706	1464	347	555	850

Analoghe considerazioni sono emerse per la climatizzazione estiva, in cui però si è osservato un comportamento opposto a quello della climatizzazione invernale con riferimento all’isolamento dell’edificio: il fabbisogno energetico, infatti, tende ad aumentare all’aumentare con il miglioramento del livello di isolamento dell’edificio. Sempre a titolo esemplificativo, in Tabella 141 sono riportati i benchmark associati all’energia primaria non rinnovabile per il raffrescamento, mediati per ogni caso studio, al variare della zona climatica e del livello di isolamento del fabbricato, per le tre categorie di destinazione d’uso analizzate e applicando l’asset rating e il tailored rating.

Tabella 141 – Climatizzazione estiva: confronto dei benchmark medi associati all’energia primaria non rinnovabile calcolati con l’asset rating e tailored rating al variare del livello di isolamento del fabbricato e della zona climatica.

Livello di isolamento del fabbricato		E.1				E.2				E.5			
		APE	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>min</i>	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>med</i>	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>max</i>	APE	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>min</i>	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>med</i>	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>max</i>	APE	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>min</i>	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>med</i>	<i>P<sub>risc-</sub></i> <i>max</i>
Liv-Iso-0	A	2338	1510	1678	2101	2502	861	1377	2196	2720	887	1419	2315
	B	1543	1088	1368	1492	1650	930	1319	1599	1786	954	1365	1727
	C	1280	571	958	1185	1366	676	980	1246	1480	684	1002	1313
	D	1064	370	770	939	1135	591	847	975	1229	597	869	1014
	E	755	360	602	662	806	560	698	698	870	579	740	740
	F	38	19	27	27	38	26	27	27	37	25	26	26
Liv-Iso-1	A	5190	1723	1915	2796	5399	1043	1669	3134	6017	1000	1600	2899
	B	3374	1237	1721	2401	4107	1152	1740	2755	3900	1060	1620	2519
	C	2869	576	1087	1559	2822	758	1164	1670	3321	718	1106	1592
	D	2376	390	851	1162	2724	686	1037	1272	2747	643	970	1178
	E	1660	396	763	961	1920	692	1046	1046	1918	663	1003	1003
	F	99	57	79	79	250	222	224	224	104	82	83	83
Liv-Iso-2	A	8543	1851	2057	3058	9251	1041	1666	3130	10089	1052	1684	3208
	B	5426	1257	1851	2679	5875	1058	1675	2740	6399	1068	1694	2799
	C	4654	586	1114	1628	5035	726	1125	1640	5485	734	1135	1654
	D	3838	401	891	1222	4158	660	1011	1233	4527	668	1024	1249
	E	2680	410	801	1047	2899	682	1061	1061	3156	691	1074	1074
	F	113	66	91	91	117	94	95	95	120	97	98	98
Liv-Iso-3	A	10415	1880	2089	3218	11218	1044	1670	3247	12191	1054	1687	3304
	B	6603	1262	1874	2782	7111	1061	1686	2833	7724	1070	1702	2885
	C	5662	593	1126	1648	6098	734	1137	1662	6622	742	1147	1675
	D	4670	405	907	1251	5033	671	1032	1262	5466	679	1046	1278
	E	3256	412	810	1060	3504	688	1073	1073	3805	697	1087	1087
	F	122	73	100	100	124	101	102	102	129	106	107	107

Il lavoro svolto in questo secondo anno di attività ha rappresentato il fulcro dell’intera attività triennale avendo come obiettivo principale quello di trovare delle relazioni di correlazione tra l’asset rating e il tailored rating per i principali servizi energetici. Grazie alle analisi condotte è stato possibile definire un sistema di equazioni che, abbinate al calcolo asset, permettono di integrare i risultati dell’APE con valori di energia primaria, di consumo del vettore energetico e di spesa media annua più aderenti al reale utilizzo del sistema edificio–impianto. I risultati ottenuti, infatti, oltre a basarsi sui risultati dell’asset rating, dipendono dal reale consumo di acqua calda sanitaria per persona nonché dall’effettivo numero di ore di accensione degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva.

Il risultato ottenuto apre a molteplici scenari di notevole interesse permettendo di lasciare invariata l’attuale metodologia di calcolo impiegata per la redazione degli APE, ma al tempo stesso di restituire una visione più veritiera dell’effettivo consumo energetico di un edificio.

I risultati dell’attività svolta, rappresentano il punto di partenza del lavoro previsto per l’ultima annualità, in cui il sistema di equazioni sarà testato e validato con dati di edifici reali di cui saranno disponibili i reali consumi energetici.

### 3 Conclusioni

Il lavoro condotto nel secondo anno di ricerca ha avuto come ambizioso obiettivo quello di determinare una correlazione matematica tra l'asset rating e il tailored rating, con lo scopo di integrare i risultati riportati negli Attestati di Prestazione Energetica (APE) con dei benchmark che permettano di restituire un consumo più aderente con il reale funzionamento del sistema edificio impianto.

Il risultato raggiunto rappresenta il perno dell'intera attività triennale, aprendo a molteplici scenari di notevole interesse e applicazione. Inoltre, uno dei punti di forza e di innovazione del lavoro è la dipendenza dei consumi tailored da quelli calcolati con l'asset rating, permettendo quindi di restituire dei consumi più realistici senza modificare l'attuale metodologia impiegata per gli APE e, quindi, senza comportare costi aggiuntivi per l'utente finale.

In considerazione dell'importanza e peso della ricerca svolta, il lavoro è stato pianificato in più fasi, le stesse adottate per la trattazione del presente report: definizione dei casi studio, analisi dei risultati derivanti dalle simulazioni energetiche parametriche con conseguente identificazione delle equazioni di correlazione e definizione di benchmark.

La definizione dei casi studio ha riguardato la caratterizzazione dei modelli dal punto di vista termofisico e la scelta di tutti quei fattori che influenzano il sistema edificio-impianto utilizzati per la parametrizzazione nelle simulazioni energetiche. La definizione dei casi studio si è basata quasi esclusivamente sui risultati ottenuti nel primo anno di ricerca [1].

L'aspetto cruciale nella caratterizzazione dei modelli è stato quello della definizione dei profili di utilizzo del sistema edificio-impianto; questi sono di estrema importanza al fine di condurre una corretta analisi parametrica non solo con la metodologia asset, ossia quella dell'APE, ma anche con quella tailored. A tale riguardo, i profili definiti hanno permesso di modificare l'asset rating nel calcolo del volume consumato d'acqua per usi sanitari, impostato sul numero dei fruitori del servizio invece che sulla superficie utile dell'immobile, e nell'introduzione di tre orari di accensione degli impianti per la climatizzazione invernale ed estiva coerentemente scelti.

La seconda fase dell'attività di ricerca è stata quella più corposa e rilevante della seconda annualità, in quanto comprendente lo svolgimento delle numerose simulazioni energetiche, attentamente pianificate, e la correlata fase di analisi dei risultati ottenuti.

Grazie ad una normalizzazione di tutti i dati rispetto a parametri accuratamente scelti, è stato possibile definire delle relazioni matematiche tra l'asset rating e il tailored rating, differenti per ogni servizio energetico.

Per la produzione di acqua calda sanitaria, si è riscontrato un legame di tipo lineare esprimibile da un'unica equazione, mentre per la climatizzazione invernale ed estiva, si è riscontrato un legame sempre di tipo non lineare, che attraverso un procedimento di analisi più complesso, ha portato alla definizione di un sistema di tre equazioni di correlazione.

Le equazioni trovate sono state oggetto di verifica con i risultati restituiti dalle simulazioni energetiche; per il servizio di riscaldamento e di raffrescamento, si è reso necessario affinare ulteriormente i risultati ottenuti per i sistemi di equazioni trovati, introducendo dei coefficienti correttivi. Così facendo, l'indicatore tailored può essere semplicemente calcolato come combinazione delle tre equazioni moltiplicate per il rispettivo coefficiente correttivo al variare della località.

Inoltre, grazie a verifiche aggiuntive che sono state condotte, i sistemi di equazioni trovati per la categoria E.1, e nel caso della climatizzazione invernale per la configurazione di impianto autonoma, sono estendibili a diverse categorie di destinazione d'uso (E.2 e E.5), nonché ad altre configurazioni impiantistiche (impianti centralizzati) con un errore relativo ammissibile.

L'attività del secondo anno si è conclusa con la definizione di diversi benchmark di carattere esemplificativo evidenziando uno dei punti di forza dell'attività svolta, ossia la possibilità di integrare la metodologia asset con gli indicatori identificati che permettono di restituire dei consumi più aderenti al reale utilizzo del sistema edificio-impianto indagato. Il risultato ottenuto, infatti, permette di lasciare invariata l'attuale metodologia di calcolo impiegata per la redazione degli APE, aprendo a molteplici scenari di notevole interesse.

Il lavoro svolto rappresenta il cuore dell'intera attività triennale che si concluderà nel terzo anno in cui le equazioni trovate saranno validate con dati di edifici reali di cui saranno disponibili i reali consumi energetici. Qualora si dovessero riscontrare significati differenze a seguito della validazione, sarà possibile raffinare ulteriormente i risultati trovati, nonché condurre nuove simulazioni parametriche che tengano conto di altri fattori.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. D. Palladino, F. Pagliaro, V. Del Fatto, C. Lavinia, F. Margiotta, L. Colasuonno. Ricerca di Sistema Elettrico. Stato dell'arte del patrimonio edilizio nazionale e analisi degli Attestati di Prestazione Energetica (APE). Report RSE/PTR2019/164. 2020.
2. Istat, <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx?lang=it>
3. Istat, 15° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni 2011. <https://www.istat.it/it/censimenti-permanenti/censimenti-precedenti/popolazione-e-abitazioni/popolazione-2011>
4. D.P.R. 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, G.U. 14 ottobre 1993, n. 242.
5. V. Corrado, I. Ballarini, S.P. Corgnati. National scientific report on the TABULA activities in Italy. Politecnico di Torino – Dipartimento Energia, 2012.
6. V. Corrado, I. Ballarini, S.P. Corgnati. Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana. Politecnico di Torino – Dipartimento Energia, 2014.
7. Istat, Annuario Statistico Italiano 2019. <https://www.istat.it/it/archivio/236772>.
8. Decreto Ministeriale 5 luglio 1975. Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896, relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione. G.U. n. 190 del 18 luglio 1975.
9. F. Margiotta, G. Puglisi. Ricerca di Sistema Elettrico. Caratterizzazione del parco edilizio nazionale Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio. Report RSE/2009/164. 2009.
10. M. Citterio. Ricerca di Sistema Elettrico. Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati. Report RSE/2009/161. 2009.
11. D.M. 26/06/2015: Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici
12. IEA. Energy Efficiency Indicators: Essentials for Policy Making. 2014. All rights reserved
13. IEA. Energy Efficiency Indicators. Highlights. 2019. All rights reserved
14. N. Calabrese, A. Carderi, C. Lavinia, F. Caffari, E. Passafaro. Linee guida per la diagnosi energetica degli edifici pubblici. Progetto ES-PA. 2019
15. UNI/TR 11775:2020: Diagnosi energetiche – Linee guida per le diagnosi energetiche degli edifici
16. UNI CEI EN 15900:2010: Servizi di efficienza energetica – Definizioni e requisiti
17. UNI CEI EN 16212:2012: Calcoli dei risparmi e dell'efficienza energetica – Metodi top-down (discendente) e bottom-up (ascendente)
18. UNI CEI EN 16231:2012: Metodologia di benchmarking dell'efficienza energetica
19. UNI CEI EN 16247-2:2014: Diagnosi energetiche – Parte 2: Edifici
20. UNI CEI EN ISO 50001:2018: Sistemi di gestione dell'energia – Requisiti e linee guida per l'uso
21. UNI ISO 50004:2015: Sistemi di gestione dell'energia – Linee guida per l'implementazione, il mantenimento e il miglioramento di un sistema di gestione dell'energia
22. UNI ISO 50006:2015: Sistemi di gestione dell'energia – Misurazione della prestazione energetica utilizzando il consumo di riferimento (Baseline – EnB) e gli indicatori di prestazione energetica (EnPI) – Principi generali e linee guida
23. UNI ISO 50015:2015: Sistemi di gestione dell'energia – Misura e verifica della prestazione energetica delle organizzazioni – Principi generali e linee guida
24. S. Sibilio, A. D'Agostino, M. Fatigati, M. Citterio. Ricerca di Sistema Elettrico. Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici residenziali. Report RSE/2009/115. 2009
25. Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente. Ricerca di Sistema Elettrico. Definizione degli indici e dei livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici e valutazione dei consumi nell'edilizia esistente nel settore alberghiero. Report RSE/2009/120. 2009

26. E. Santini, S. Elia, G. Fasano. Ricerca di Sistema Elettrico. Caratterizzazione dei consumi energetici nazionali delle strutture ad uso ufficio. Report RSE/2009/121. 2009
27. L. Pagliano, M. Pietrobon, P. Zangheri. Ricerca di Sistema Elettrico. Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a uffici - usi termici - analisi del potenziale di risparmio energetico. Report RSE/2009/114. 2009
28. F. Margiotta. Ricerca di Sistema Elettrico. Metodologia per la determinazione delle caratteristiche strutturali ed impiantistiche di "Edifici Tipo" del Parco Edilizio Nazionale ad uso ufficio e Valutazione del Potenziale di Risparmio energetico sulla base della fattibilità degli interventi di riqualificazione energetica. Report RdS/2010/197. 2010
29. F. Toso, A. Mura. Ricerca di Sistema Elettrico. Raccolta dati per la determinazione e caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici destinati a scuole ed uffici. Report RdS/PAR2013/126. 2014
30. W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, D. Della Vista, M. Bandini, L. Niccoli, G. L. Grassini, G. Fasano. Ricerca di Sistema Elettrico. Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri. Report RSE/2009/117. 2009
31. S. Baldazzi, E. Beltrone, P. D'Alessandris, A. Mostacci, A. Mura, D. Napoleoni, F. Pasquino, A. Santangelo, A. Stemperini, F. Toso. Ricerca di Sistema Elettrico. Rapporto sulla raccolta dati per la determinazione e caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici ad uso ospedaliero. Report RdS/PAR2013/115. 2014
32. I. Meroni, A. Bellazzi. Ricerca di Sistema Elettrico. Definizione degli indici e dei livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici e valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati. Report RSE/2009/116. 2009
33. F. Bianchi, M. Acciari, S. Fiori, M. E. Cannata. Ricerca di Sistema Elettrico. Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso commerciale grande distribuzione applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani. Report RdS/2010/194. 2010
34. S. Elia, E. Santini. Ricerca di Sistema Elettrico. Analisi di consumo, elettrico e termico, del Centro Sportivo Giulio Onesti del Coni di Roma. Report RdS/2012/111. 2012
35. E. Santini, S. Elia. Ricerca di Sistema Elettrico. Analisi e raccolta dei dati di consumo dei centri sportivi, disponibili presso il CONI Servizi di Roma, e delle possibili attività di ottimizzazione delle piscine. Report RdS/2013/140. 2013
36. E. Santini, S. Elia. Ricerca di Sistema Elettrico. Studio e validazione di un modello previsionale di consumo energetico per la verifica dell'efficienza energetica dei centri sportivi. Report RdS/PAR2013/122. 2014
37. E. Santini, S. Elia. Ricerca di Sistema Elettrico. Modello matematico e strumento informatico user-friendly per la valutazione del consumo e degli interventi di risparmio energetico dei centri sportivi. Report RdS/PAR2014/080. 2015
38. F. Bianchi, M. Altomonte, M. E. Cannata, G. Fasano. Ricerca di Sistema Elettrico. Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a scuole – consumi energetici delle scuole primarie e secondarie. Report RSE/2009/119. 2009
39. L. Pagliano, M. Pietrobon, P. Zangheri. Ricerca di Sistema Elettrico. Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico. Applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani. Report RdS/2010/192. 2010
40. S. P. Corgnati, E. Fabrizio, F. Ariaudo, L. Rollino. Ricerca di Sistema Elettrico. Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico (medie superiori e istituti tecnici), applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani. Report RdS/2010/190. 2010
41. S. Ferrari, V. Zanotto, M., Bonomi, M. Baldinazzo. Ricerca di Sistema Elettrico. Analisi delle prestazioni energetiche di un parco edifici del terziario (Politecnico di Milano, Campus Città Studi e Campus Bovisa), con particolare riferimento al potenziale di riduzione dei consumi elettrici in fase d'uso. Report RdS/2010/191. 2010
42. S. Ferrari, P. Caputo. Ricerca di Sistema Elettrico. Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici: analisi dei consumi elettrici del parco edifici del Politecnico di Milano. Report RdS /2013/151. 2013

43. S. Ferrari. Ricerca di Sistema Elettrico. Analisi critica dei dati sui consumi elettrici del terziario: gli edifici del Politecnico di Milano. Report RdS/PAR2013/105. 2014
44. P. Romagnoni, E. Antonini, M. Boscolo, F. Cappelletti. Ricerca di Sistema Elettrico. Riqualficazione di edifici scolastici: risultati di una campagna di monitoraggio energetico. Report RdS/2010/193. 2010
45. A. Madeddu, F. Poggi. Ricerca di Sistema Elettrico. Realizzazione di un data base degli edifici pubblici insistenti sul territorio del Sulcis: caratterizzazione edifici e indicatori statistici". Report RdS/PAR2014/101. 2015
46. L. Calcagnini, P. Marrone. Ricerca di Sistema Elettrico. Sistema informativo basato su benchmark di casi per la valutazione di soluzioni progettuali e tecnologiche per l'efficienza energetica del patrimonio costruito: il caso degli edifici scolastici della Regione Lazio. Report RdS/PAR2016/012. 2017
47. M. Cellura, F. Guarino, V. La Rocca, V. Lo Brano, G. Maniscalco, M. Morale. Ricerca di Sistema Elettrico. Caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana. Report RdS/PAR2013/116. 2014
48. R. Armani, L. Pagliano, M. Pietrobon, S. Erba. Ricerca di Sistema Elettrico. Definizione di indicatori prestazionali energetico-ambientali per la caratterizzazione degli edifici scolastici. Report RdS/PAR2016/014. 2017
49. R. Armani, L. Pagliano, M. Pietrobon, S. Erba. Ricerca di Sistema Elettrico. Criteri di normalizzazione dei KPI di riferimento e di stime di risparmi energetici conseguibili in reali condizioni d'uso per edifici scolastici esistenti. Report RdS/PAR2017/055. 2018
50. S. Elia, E. Santini. Ricerca di Sistema Elettrico. Caratterizzazione e validazione della funzionalità della scheda informativa di rilevazione per gli edifici scolastici. Report RdS/PAR2016/013. 2017
51. S. Elia, E. Santini. Ricerca di Sistema Elettrico. Individuazione di edifici scolastici di riferimento per diverse destinazioni d'uso, applicazione della Scheda PELL Edifici Scolastici ed individuazione dei diversi KPI di riferimento. Report RdS/PAR2017/054. 2018
52. S. Elia, E. Santini. Ricerca di Sistema Elettrico. Individuazione e valutazione dei reali usi energetici nell'applicazione della Scheda PELL Edifici Scolastici. Report RdS/PAR2018/028. 2018
53. S. Baldazzi, E. Beltrone, P. D'Alessandris, A. Mostacci, A. Mura, D. Napoleoni, F. Pasquino, A. Santangelo, A. Stemperini, F. Toso. Ricerca di Sistema Elettrico. Rapporto sulla raccolta dati per la determinazione e caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici destinati a scuole ed uffici. Report RdS /2013/141. 2013
54. D.P.R. 16 aprile 2013 n. 74: Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del d.lgs. 19 agosto 2005, n. 192
55. UNI EN ISO 15927-6:2008: Prestazione termoigrometrica degli edifici – Calcolo e presentazione dei dati climatici – Parte 6: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno)
56. D.Lgs. 4 luglio 2014 n. 102: Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE
57. L. Terrinoni, P. Signoretti, D. Iatauro. Ricerca di Sistema Elettrico. Definizione delle zone climatiche estive e della durata della stagione di climatizzazione estiva per gli edifici residenziali nel territorio italiano attraverso la metodologia di severità climatica ENEA. Report RdS/PAR2013/129. 2014
58. <https://www.youtube.com/watch?v=64CdJMclmDc> (aggiornamento 20 gennaio 2021)
59. R. Lollini, D. Antonucci, G. Peasso, T. Nuic, B. Huberlant. ExcEED Guidelines – project findings and technical solutions. Report D.6.8. Progetto ExcEED. Copyright 2019, ExcEED. All rights reserved
60. IEA. Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics. 2014. All rights reserved
61. UNI TS 11300/2014 –1: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
62. UNI TS 11300/2014 –2: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali.

63. UNI TS 11300/2010 –3: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 3: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.
64. UNI TS 11300/2016 –4: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 4: utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.
65. UNI TS 11300/2016 –5: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 5: Calcolo dell’energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili.
66. UNI TS 11300/2016 –6: Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 6: determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili.
67. 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 calcolare l’irradianza solare su di una superficie inclinata.
68. Legge dello Stato 30/04/1976 n. 373. “Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici”. G.U. 07 giugno 1976 n. 148.
69. Legge 10/91: Norme per l’attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell’energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia, G.U. 16 gennaio 1991, n. 13.
70. D. Lgs. 19/8/2005, n. 192: Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia, G.U. 23 settembre 2005, n. 222 – Supplemento Ordinario n. 158.
71. D. Lgs. 29/12/2006, n. 311: Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia, G.U. 1 febbraio 2007, n. 26 – Supplemento Ordinario n. 26/L.
72. Caleffi. Produzione di acqua calda ad accumulo. Idraulica – pubblicazione periodica di informazione tecnico–professionale. 1991.
73. Caleffi. Il dimensionamento degli impianti idrosanitari. Vasi di espansione e accumulo. Focus Tecnico. 2015.
74. G. Cammarata, M. Cammarata, G. Capizzi – Ricerca di Sistema Elettrico – “Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici” (Report RdS/2013/119)
75. M. Caldera, A. Federici, F. Margiotta, A. Martelli, M. Nocera, A. Pannicelli, S. Piccinelli, G. Puglisi, F. Zanghirella – Ricerca di Sistema Elettrico – “Metodologie e strumenti per la raccolta di dati e la definizione di modelli di riferimento dei consumi energetici nel settore residenziale, terziario e pubblico” (Report RdS/2015/143)
76. P. Corbetta – La ricerca sociale: metodologia e tecniche; IV. L’analisi dei dati – Editore Il Mulino, Seconda edizione 2015.
77. <https://www.orari-di-apertura.it/uffici-pubblici.htm>

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

ACS	Acqua calda sanitaria
APE	Attestato di Prestazione Energetica
CEI	Comitato Elettrotecnico Italiano
COP	Coefficiente di prestazione
CRESME	Centro ricerche economiche sociali di mercato per l'edilizia e il territorio
DSR	Determinanti, Stato, Risposte
E.1 (1)	Edifici adibiti a residenza con carattere continuativo [...]
E.1 (3)	Edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari [...]
E.2	Edifici adibiti a uffici e assimilabili
E.3	Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili [...]
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili
E.6	Edifici adibiti ad attività sportive
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili
E1.i	Edificio isolato unifamiliare su piano Unico (U)
E1.t	Edificio isolato unifamiliare su piano Terra (PT)
E1.t	Edificio isolato unifamiliare su piano Intermedio (PI)
E1.t	Edificio su piano Ultimo (PU)
E2.t	Edificio su piano Terra (PT)
E2.t	Edificio su piano Intermedio (PI)
E2.t	Edificio su piano Ultimo (PU)
E5.t	Edificio su piano Terra (PT)
ECA	edifici in cemento armato
EM	edifici in muratura
EN	Comitato Europeo di Normazione
EnB	Indicatori di prestazione energetica di baseline
Enbuibench	Energy and comfort building performance characterization and benchmarking platform
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
EnPI	Indicatori di prestazione energetica
EP	Energia primaria
ES-PA	Energia e Sostenibilità per la Pubblica Amministrazione
EURAC	Accademia Europea di Bolzano
ExcEED	European Energy Efficient building district Database
FST	fattore correttivo della producibilità del solare termico
Gge	Gradi Giorno estivi
GGi	Gradi Giorno invernali
$h_{\text{impianto}}$	ore di accensione dell'impianto
$\eta_{\text{impianto}}$	rendimento dell'impianto termico
IEM	indicatore energetico medio
IEN	Indicatore Energetico Normalizzato
ISO	Organizzazione Internazionale per la Normazione
KPI	Indicatori di prestazione energetica
KPI	costante del volume di acqua per usi sanitari consumato
M&V	misura e verifica
OCSE	Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico

PA	Pubblica Amministrazione
$P_{acs-max}$	volume di acqua consumato per la prosuzione di acqua calda sanitaria nel caso di tre fruenti l'immobile
$P_{acs-med}$	volume di acqua consumato per la prosuzione di acqua calda sanitaria nel caso di due fruenti l'immobile
$P_{acs-min}$	volume di acqua consumato per la prosuzione di acqua calda sanitaria nel caso di un fruento l'immobile
PC	parametro climatico
PELL	Public Energy Living Lab
PMI	Piccole e Medie Imprese
$P_{nimpianto}$	potenza nominale dell'impianto
$P_{raff-max}$	profilo di utilizzo (ore giornaliere) massimo per la climatizzazione estiva
$P_{raff-med}$	profilo di utilizzo (ore giornaliere) medio per la climatizzazione estiva
$P_{raff-min}$	profilo di utilizzo (ore giornaliere) minimo per la climatizzazione estiva
$P_{risc-max}$	profilo di utilizzo (ore giornaliere) massimo per la climatizzazione invernale
$P_{risc-med}$	profilo di utilizzo (ore giornaliere) medio per la climatizzazione invernale
$P_{risc-min}$	profilo di utilizzo (ore giornaliere) minimo per la climatizzazione invernale
PST	producibilità del solare termico
RdS	Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale
SGE	sistema di gestione dell'energia
ST	solare termico
TR	Rapporto Tecnico
UE	Unione Europea
UNI	Ente Italiano di Normazione
$V_{H_2O}$	Volume di acqua per usi sanitari