



Ricerca di Sistema elettrico

Modelli di regressione per la stima dei fabbisogni energetici per la climatizzazione degli edifici

P. Signoretti, L. Terrinoni, D. Iatauro

MODELLI DI REGRESSIONE PER LA STIMA DEI FABBISOGNI ENERGETICI PER LA CLIMATIZZAZIONE DEGLI EDIFICI

P. Signoretti, L. Terrinoni, D. Iatauro (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso di energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso ufficio e scuole, Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano, ENEA



Indice

SOMMARIO.....	1
1 INTRODUZIONE.....	2
1 DEFINIZIONE DEI MODELLI DI EDIFICIO	3
1.1 I MODELLI DI EDIFICIO UTILIZZATI.....	3
1.2 GLI EDIFICI RESIDENZIALI CAMPIONE	3
1.2.1 <i>Edificio Monofamiliare</i>	5
1.2.2 <i>Piccolo Condominio</i>	6
1.2.3 <i>Grande Condominio</i>	7
2 LA SCELTA DELLE LOCALITÀ DI RIFERIMENTO.....	8
2.1 LE ZONE CLIMATICHE ITALIANE E LA POPOLAZIONE RESIDENTE	8
2.2 LE LOCALITÀ GEOGRAFICHE DI RIFERIMENTO.....	10
3 CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO.....	14
3.1 LE CONFIGURAZIONI DI INVOLUCRO EDILIZIO	14
3.2 I COEFFICIENTI MEDI GLOBALI DI SCAMBIO TERMICO	16
4 IL FABBISOGNO IDEALE DI ENERGIA TERMICA PER IL RISCALDAMENTO.....	18
4.1 IL CALCOLO DEL FABBISOGNO IDEALE DI ENERGIA TERMICA PER IL RISCALDAMENTO	18
4.2 LE COMPONENTI DEL FABBISOGNO IDEALE DI ENERGIA TERMICA.....	25
4.3 UNA RELAZIONE SEMPLIFICATA TRA IL FABBISOGNO IDEALE DI ENERGIA TERMICA E LO SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE.....	31
4.4 SVILUPPO DI ALGORITMI DI REGRESSIONE PER IL CALCOLO DEL FABBISOGNO ENERGETICO NORMALIZZATO	34
5 DEFINIZIONE DI UNA RELAZIONE SEMPLIFICATA PER LA STIMA DEL FABBISOGNO IDEALE NORMALIZZATO.....	39
5.1 SVILUPPO DI UN ALGORITMO DI REGRESSIONE BASATO SUI GRADI-GIORNO DEL DPR 412/93.....	39
5.2 UN TEST NUMERICO ATTRAVERSO EDIFICI DI CONFRONTO	42
5.3 UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE	46
6 CONCLUSIONI.....	48
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	49
8 APPENDICE.....	49
ANALISI DELLA REGRESSIONE LINEARE APPLICATA.....	50
<i>Cenni di statistica applicata</i>	50
<i>Analisi della regressione effettuata</i>	52
<i>Analisi dei residui</i>	52
<i>Test di ipotesi sui parametri del modello lineare</i>	55

Sommario

Quanto riportato in questo rapporto s'inserisce nell'ambito del supporto istituzionale dell'ENEA al Ministero dello Sviluppo economico per la preparazione dei decreti di attuazione della direttiva 2010/31/UE sull'efficienza energetica negli edifici (recepita dalla L.90-2013) e, in particolare, sulle modalità di applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche e l'utilizzo delle fonti rinnovabili negli edifici nonché dell'applicazione di prescrizioni e requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici e unità immobiliari. Nel lavoro presentato è proposta una metodologia di calcolo speditiva che consente di definire, attraverso pochi e semplici parametri, il fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale valutato secondo la metodologia standardizzata prevista dalla normativa italiana sulla certificazione energetica degli edifici (D.Lgs. 19/08/2005 n.192 e successive modifiche ed integrazioni) . Questo strumento può risultare un utile supporto al legislatore in fase di definizione delle caratteristiche prestazionali dell'involucro edilizio, in quanto consente di verificare rapidamente come le variazioni di tali caratteristiche vadano a modificare i fabbisogni energetici degli edifici. Partendo da tre diverse tipologie di edifici, monofamiliare, piccolo condominio e grande condominio, sono state eseguite delle simulazioni numeriche per la valutazione del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento, attraverso un codice di calcolo stazionario che utilizza la metodologia definita dalle Norme UNI TS 11300. I test sono stati effettuati per delle località di riferimento poste in diverse zone climatiche invernali, rappresentative dei diversi climi italiani. Successivamente è stato sviluppato un algoritmo di regressione attraverso il quale è possibile calcolare il fabbisogno energetico normalizzato dell'involucro edilizio una volta noti il rapporto di forma S/V , la trasmittanza dell'involucro e i Gradi-Giorno della località. Tale relazione può essere utilizzata per la stima della prestazione energetica anche in condizioni di calcolo differenti (Gradi-Giorno, fattore di forma, trasmittanza termica dell'involucro).

Parole chiave: edilizia, certificazione energetica, gradi-giorno, fabbisogno ideale di energia termica

In this report is described an ENEA study aimed to provide technical support to the Ministry of Economic Development within the implementation of European Directive on the energy efficiency of the buildings (2010/31/EU), and, in particular, on the calculation method and the application of minimum energy performance requirements. A simplified methodology, aimed to evaluate the energy need for heating, by mean simple parameters, is proposed. The energy demand has been estimated through a standardized procedure according to the Italian legislation for energy certification of buildings (D.Lgs. 19/08/2005 n.192 and subsequent modifications and additions) This method can represent an useful tool for the legislator, in phase of definition of the thermal characteristics of the building envelope, allowing to verify, in a quick way, as the variation of few main parameters can modify the energy demand. Considering three different reference buildings, detached house, small and large multifamily buildings, it has been carried out a numerical simulation to calculate the energy need for heating through the methodology given by national technical standards.

The tests have been done locating the buildings in different reference sites (15 cities), representative of different climatic zones of the Italian climate. It was subsequently defined a calculation procedure based on regression methods to evaluate the heating energy need starting from few parameters, like the building shape factor S/V , the overall thermal transmittance and the Degrees-Day of the site. Regression analysis has showed the goodness of fit of the model, and has been highlighted the possibility of using it also for the estimation of the energy performance in different conditions of calculation (Degrees-Day, shape factor, overall thermal transmittance).

"Aevo rarissima nostro simplicitas". ARS AMATORIA, Ovidio (43 a.c - 18 d.c)

1 Introduzione

Con il nuovo decreto del Ministero per lo Sviluppo Economico (MISE) del 26 giugno 2015 sono stati definiti i "Requisiti minimi", nei termini sia delle caratteristiche termofisiche dei singoli componenti dell'involucro degli edifici che dell'edificio nel suo insieme.

Sono stati, infatti, resi maggiormente stringenti rispetto al passato, sulla base dell'ottimizzazione del rapporto tra costi e benefici degli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica, gli standard energetici minimi per la realizzazione di nuovi edifici e per la ristrutturazione di quelli esistenti, con lo scopo di portare progressivamente verso la definizione di edifici a energia quasi zero (NZEB), in linea con quanto previsto dalla direttiva 2010/31/UE. La determinazione di questi requisiti è basata sulla valutazione del **fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento**: la quantità di energia che deve essere fornita all'ambiente climatizzato per mantenere la temperatura di 20°C per l'intero periodo di riscaldamento, funzione della fascia climatica invernale (DPR 412/93). La procedura di calcolo che è adottata è tipo standardizzato e si riferisce a quanto previsto dalla Norma UNI 11300-1/2014 (Asset Rating).

La grande varietà delle tipologie edilizie presenti in Italia obbliga a valutare i fabbisogni, e quindi i requisiti, per un numero non esaustivo di queste tipologie, scegliendo tra quelle maggiormente rilevanti in fatto di rappresentatività. Il presente lavoro riporta e generalizza quanto fatto a supporto del MISE per la predisposizione del decreto in questione.

Le valutazioni energetiche ivi riportate sono inquadrare in uno schema sintetico che consente, senza bisogno di eseguire valutazioni puntuali per edifici particolari, che possono essere anche differenti da quelli considerati, di inferire le variazioni relative indotte da variazioni delle caratteristiche geometriche, termofisiche e di localizzazione, sul fabbisogno di energia termica per il riscaldamento.

Oltre che per le finalità normative anzidette, lo schema sintetico è stato messo a punto per costituire uno strumento utile anche al progettista/calcolatore privato che deve valutare in maniera speditiva le prestazioni energetiche dell'edificio sul quale opera e suggerire la direzione nella quale muoversi, cambiando le caratteristiche termofisiche generali dell'edificio, per mirare con sufficiente precisione all'obiettivo energetico che si è prefisso.

Nel seguito si seguiranno i passi che sono stati compiuti per arrivare a quest'obiettivo.

1 Definizione dei modelli di edificio

1.1 i modelli di edificio utilizzati

Gli edifici presi a riferimento sono stati quelli utilizzati per l'applicazione italiana della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica, richiesta dalla Direttiva EPBD 2010/31/CE sull'efficienza energetica negli edifici, e per la definizione dei "Requisiti Minimi" del nuovo decreto MISE.

Gli edifici considerati rappresentano degli archetipi delle categorie prescelte, che sono:

- a. abitazioni monofamiliari;
- b. piccolo condominio;
- c. grande condominio.

Per ognuna di queste tipologie edilizie sono stati individuati, per le ciascuna delle zone climatiche invernali più rappresentative (5 da B ad F, ai sensi del D.P.R. 412/93), tre modelli di edificio caratterizzati da differenti proprietà termofisiche (differenti livelli nei valori di trasmittanza termica dei componenti) ma stesse dimensioni, fattori di forma e di esposizione.

Ciascuno di questi modelli è stato poi collocato in tre diverse località di riferimento nell'ambito della medesima fascia climatica.

Quanto descritto è riassunto dalla tabella che segue.

CATEGORIE DI RIFERIMENTO	N. EDIFICI	N. ZONE CLIMATICHE	N. MODELLI PER ZONA CLIMATICA	N. LOCALITÀ PER ZONA CLIMATICA	N. MODELLI PER EDIFICIO
Monofamiliare	1	5	3	3	45
Piccolo condominio	1	5	3	3	45
Grande condominio	1	5	3	3	45
				Totale	135

Tabella 1. Modelli di edificio esaminati

1.2 Gli edifici residenziali campione

I modelli riguardano le seguenti tipologie di edifici:

1. Edificio monofamiliare costituito da un unico piano;
2. Edificio piccolo condominio di 3 piani, con 6 unità abitative;
3. Edificio grande condominio di 8 piani, con 24 unità abitative.

Tali edifici hanno la forma di un parallelepipedo regolare, sono dotati di sottotetto (non riscaldato), con tetto isolato, poggiano su di un locale non climatizzato (ad esempio un garage) e sono dotati di infissi e di strutture opache tipo, di cui si riportano di seguito alcune delle caratteristiche principali.

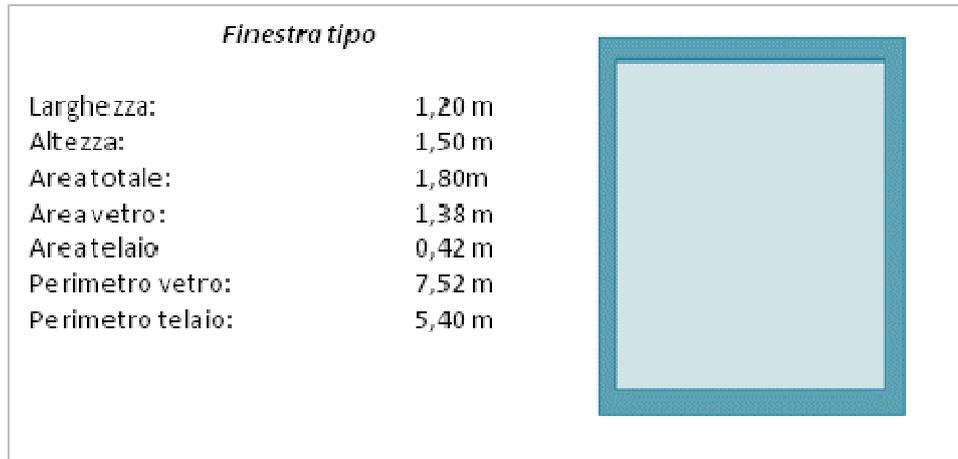


Figura 2. Caratteristiche dimensionali della finestra tipo

DESCRIZIONE STRATO	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	C (kJ/kgK)	μ
<u>PARETE VERTICALE PERIMETRALE</u>				
Intonaco di gesso e sabbia	0,800	1600	1,00	10
Muratura in laterizio pareti esterne	0,680	1600	0,84	7
Polistirene espanso, estruso senza pelle	0,034	50	1,25	140
Intonaco di calce e sabbia	0,800	1600	1,00	10
<u>PARETE VS INGRESSO/ VANO SCALE</u>				
Intonaco di gesso e sabbia	0,800	1600	1,00	10
Muratura in laterizio pareti interne	0,500	1400	0,84	7
Polistirene espanso, estruso con pelle	0,036	30	1,25	300
Pannello di cartongesso	0,600	750	0,84	8
<u>SOLAIO SOTTOTETTO</u>				
Massetto ripartitore in calcestruzzo con rete	1,490	2200	0,88	70
Polistirene espanso, estruso senza pelle	0,034	50	1,25	140
C.l.s. in genere	0,470	1200	1,00	100
Blocco da solaio	0,600	950	0,84	9
Intonaco di gesso e sabbia	0,800	1600	1,00	10
<u>PAVIMENTO SU LOCALE NON CLIMATIZZATO</u>				
Piastrelle	1,000	2300	0,84	10 ²⁰
C.l.s. in genere	0,220	500	1,00	100
Polistirene espanso	0,040	25	1,25	45
Blocco da solaio	0,667	842	0,84	9
Intonaco di calce e gesso	0,700	1400	1,00	11

Tabella 2. caratteristiche termofisiche delle pareti opache

1.2.1 Edificio Monofamiliare

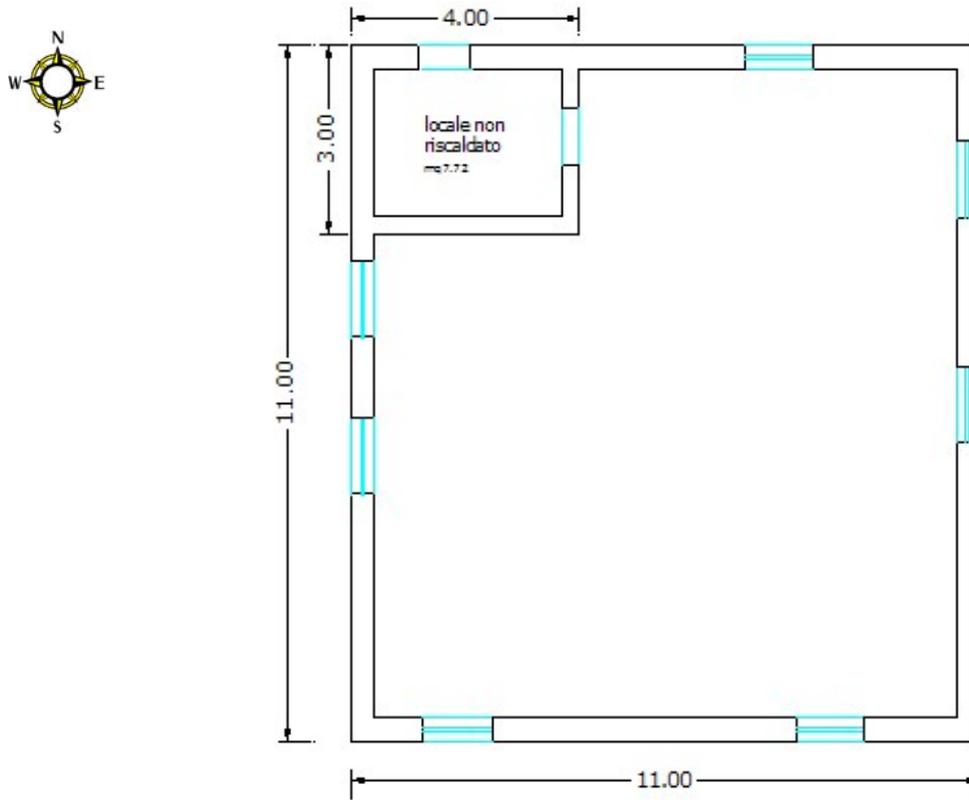


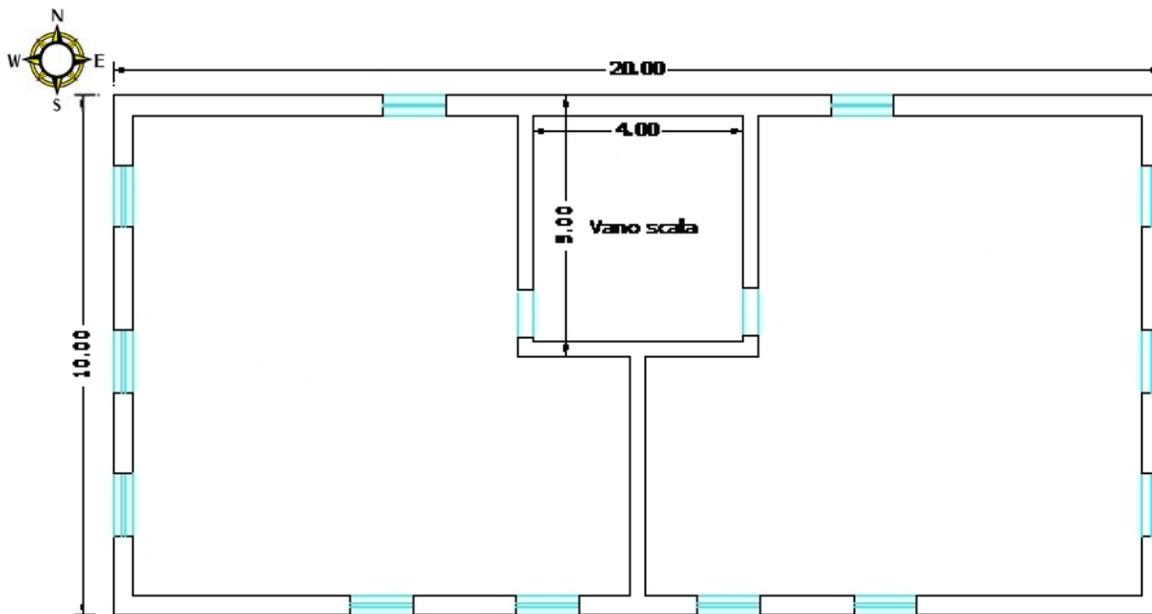
Figura 3. Edificio Monofamiliare - Pianta

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELL'EDIFICIO MONOFAMILIARE	
Altezza interpiano [m]	2,7
Larghezza [m]	11,0
Profondità [m]	11,0
Pavimento (netto) [m ²]	97,5
Serramenti [m ²] ¹	12,6
Volume netto [m ³]	263
Volume lordo [m ³]	371
Superficie lorda disperdente totale [m ²]	365,6
S/V [m ⁻¹]	0,99

Tabella 3. Edificio Monofamiliare - Caratteristiche geometriche

¹ La superficie vetrata è poco superiore al 10% della superficie verticale disperdente complessiva .

1.2.2 Piccolo Condominio



PIANTA PIANO TIPO

Figura 4. Piccolo Condominio - Pianta

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELL'EDIFICIO PICCOLO CONDOMINIO	
Numero di piani	3
Altezza interpiano [m]	2,7
Larghezza [m]	20,0
Profondità [m]	10,0
Pavimento totale (netto) [m ²]	450
Pavimento singolo piano (netto) [m ²]	150
Serramenti [m ²] ²	64,8
Volume netto [m ³]	1215
Volume lordo [m ³]	1620
Superficie lorda disperdente totale [m ²]	990
S/V [m ⁻¹]	0,61

Tabella 4. Piccolo Condominio - Caratteristiche geometriche

² La superficie vetrata è circa l'11% della superficie verticale disperdente complessiva

1.2.3 Grande Condominio

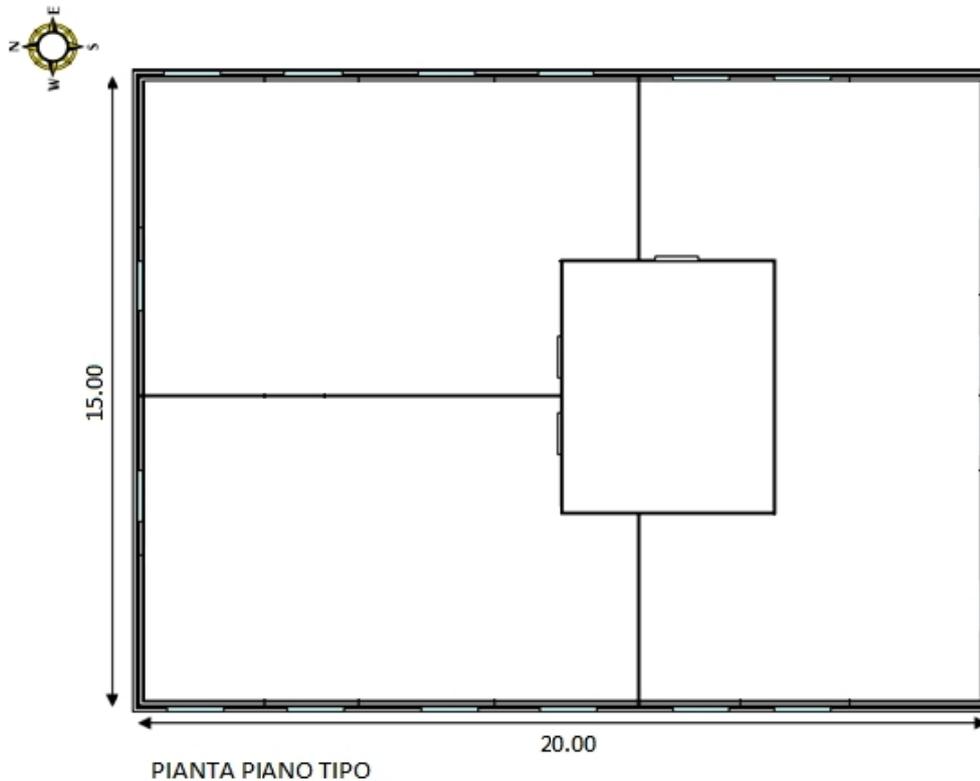


Figura 5. Grande Condominio - Pianta

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELL'EDIFICIO GRANDE CONDOMINIO	
Numero di piani	8
Altezza interpiano [m]	2,7
Larghezza [m]	20,0
Profondità [m]	15,0
Pavimento totale (netto) [m ²]	1900
Pavimento singolo piano (netto) [m ²]	237,5
Serramenti [m ²] ⁽¹⁾³	257
Volume netto [m ³]	5130
Volume lordo [m ³]	6626
Superficie lorda disperdente totale [m ²]	2810
S/V [m ⁻¹]	0,42

Tabella 5. Grande Condominio - Caratteristiche geometriche

³ La superficie vetrata è poco superiore allo 12,5% della superficie verticale disperdente complessiva

2 La scelta delle località di riferimento

2.1 Le zone climatiche italiane e la popolazione residente

La classificazione climatica del territorio italiano, relativamente alla climatizzazione invernale, è stata introdotta dal Decreto del Presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993. L'Italia risulta essere suddivisa nelle seguenti sei zone climatiche (da A a F) definite in base ai Gradi-Giorno e indipendenti dalla ubicazione geografica:

ZONA CLIMATICA	GRADI-GIORNO
A	$GG \leq 600$
B	$600 < GG \leq 900$
C	$900 < GG \leq 1.400$
D	$1.400 < GG \leq 2.100$
E	$2.100 < GG \leq 3.000$
F	$GG > 3.000$

Tabella 6. Superficie media regionale delle abitazioni italiane

In base a questa classificazione delle zone climatiche invernali, risulta che circa il 92% della popolazione italiana risiede in località i cui Gradi-Giorno sono compresi nell'intervallo $900 < GG \leq 3000$ (zone C, D ed E); del restante 8% della popolazione, i 2/3 risiedono in località con un numero di Gradi-Giorno < 900 (zone A e B).

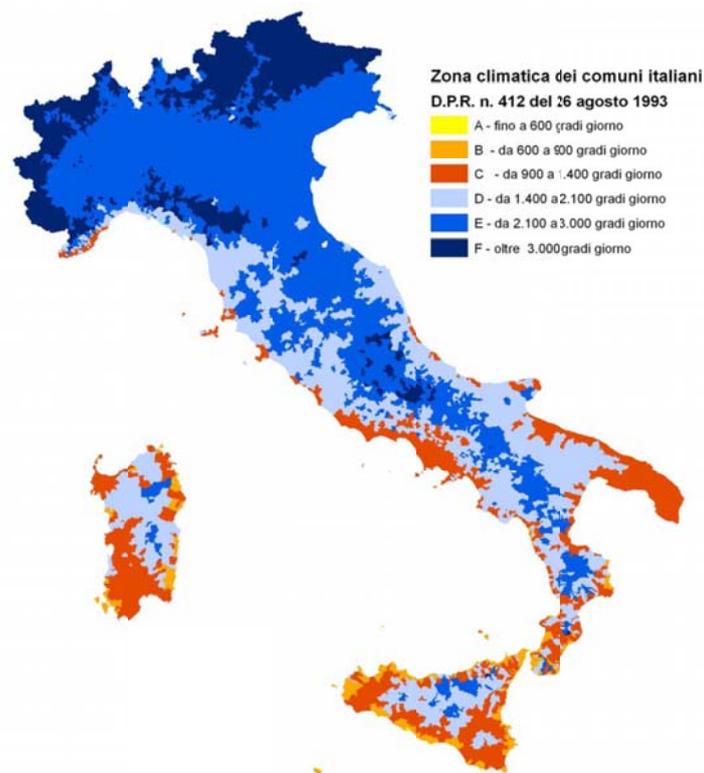


Figura 7. Classificazione in zone climatiche del territorio nazionale

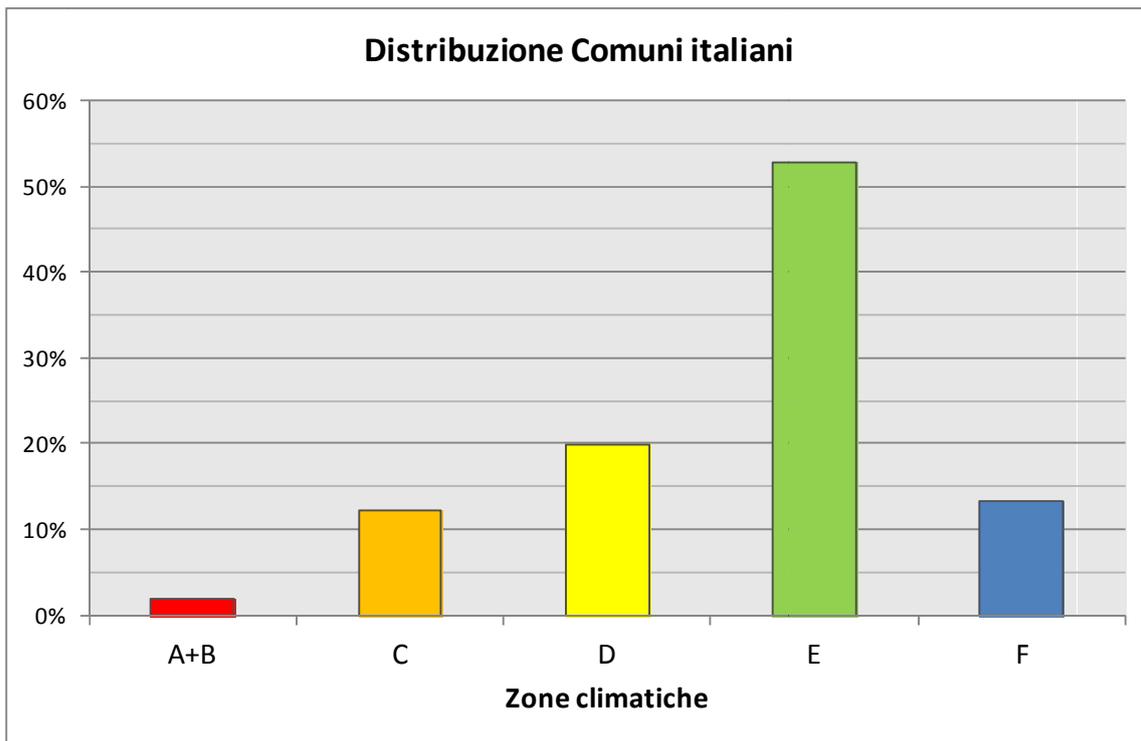


Figura 8. Distribuzione % Comuni italiani

	ZONA CLIMATICA					
	A	B	C	D	E	F
POPOLAZIONE ⁴	23.474	3.216.313	12.785.737	15.213.234	27.444.809	1.662.785
	0,04%	5,3%	21,2%	25,2%	45,5%	2,8%
N. COMUNI	2	157	985	1.602	4.273	1.074
	0,02%	1,9%	12,2%	19,8%	52,8%	13,3%
GG medi	576	781	1147	1658	2467	3454
GG pesati⁵	574	782	1178	1761	2524	3522

tabella 7. Distribuzione % dei comuni italiani

⁴ Popolazione residente al 31/12/2009.

⁵ Media pesata rispetto alla popolazione.

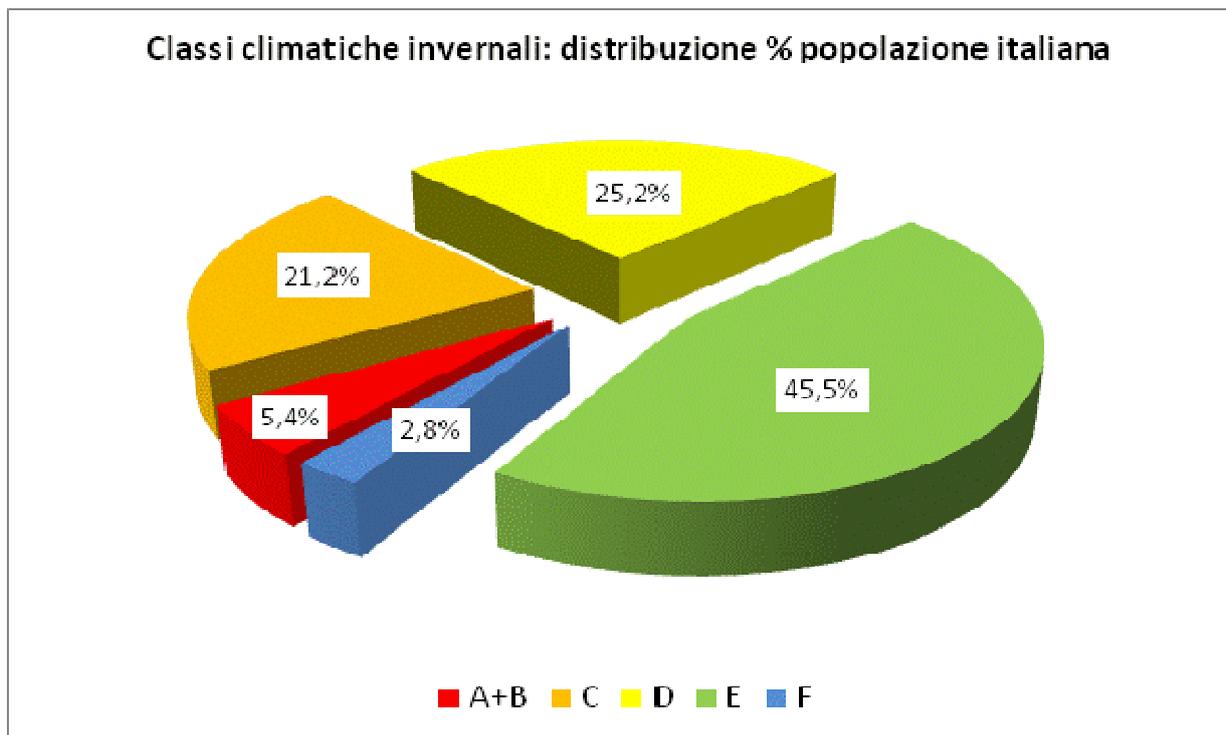


Figura 9. Distribuzione % Popolazione italiana per classi climatiche

Per la climatizzazione invernale, i consumi energetici per ciascuna località, degli edifici esistenti, possono ritenersi proporzionali al prodotto tra i Gradi-Giorno e la popolazione; in base a questa considerazione, si può osservare come la zona climatica E sia quella che ha un peso maggiore sui consumi, mentre la zona climatica B quella con un peso minore (escludendo la zona A con solo lo 0,04 % della popolazione italiana). (Figura 9)

2.2 Le località geografiche di riferimento

Per ciascuna zona climatica considerata sono state scelte tre località di riferimento secondo il criterio di seguito descritto.

- Località 1: capoluogo di provincia con un numero di Gradi-Giorno (GG) più vicino al valore medio pesato rispetto alla popolazione della fascia. Tale valore è pari al rapporto tra la somma dei prodotti dei GG dei singoli comuni per il numero di abitanti e la popolazione complessiva della zona climatica.
- Località 2: capoluogo di provincia con un numero di GG più vicino al valore massimo.
- Località 3: località con numero di Gradi-Giorno massimo.

Per la fascia climatica F la località 1 e 2 coincidono pertanto si è scelto come Località 2 un comune con un numero di GG pari a quello medio pesato rispetto alla popolazione della fascia.

FASCIA CLIMATICA	LOCALITA'		GG DPR 412/93
B	1	REGGIO CALABRIA	772
	2	CROTONE	899
	3	SAPONARA ME	900
C	1	LECCE	1153
	2	CATANZARO	1328
	3	CALTAGIRONE CT	1399
D	1	TERNI	1650
	2	FORLI'	2087
	3	CASTIGLIONE DEL LAGO PG	2099
E	1	ROVIGO	2466
	2	AOSTA	2850
	3	CASINA RE	2999
F	1	BELLUNO	3043
	2	CALASCIO AQ	3454
	3	SESTRIERE TO	5165

tabella 8. Località di riferimento per classe climatica

LOCALITA'		PERIODO DI RISCALDAMENTO		GIORNI	IRRADIAZIONE SOLARE ⁶ (kWh/m ²)	T media (°C)
1	REGGIO CALABRIA	1-dic	31-mar	121	338	12,0
2	CROTONE	1-dic	31-mar	121	327	10,5
3	SAPONARA ME	1-dic	31-mar	121	334	11,7
1	LECCE	15-nov	31-mar	137	332	10,4
2	CATANZARO	15-nov	31-mar	137	348	9,7
3	CALTAGIRONE CT	15-nov	31-mar	137	420	8,6
1	TERNI	1-nov	15-apr	166	373	8,9
2	FORLI'	1-nov	15-apr	166	356	6,5
3	CASTIGLIONE DEL LAGO PG	1-nov	15-apr	166	366	8,0
1	ROVIGO	15-ott	15-apr	183	360	6,0
2	AOSTA	15-ott	15-apr	183	397	3,8
3	CASINA RE	15-ott	15-apr	183	377	2,9
1	BELLUNO	5-ott	22-apr	200	433	5,5
2	CALASCIO AQ	5-ott	22-apr	200	485	3,4
3	SESTRIERE TO	5-ott	22-apr	200	467	-3,9

tabella 9. Località di riferimento - Periodi di riscaldamento e dati climatici

Nella figura 10 è indicata la localizzazione delle località prescelte nell'ambito del territorio nazionale.

⁶ Valore medio sul piano orizzontale nel periodo di riscaldamento.

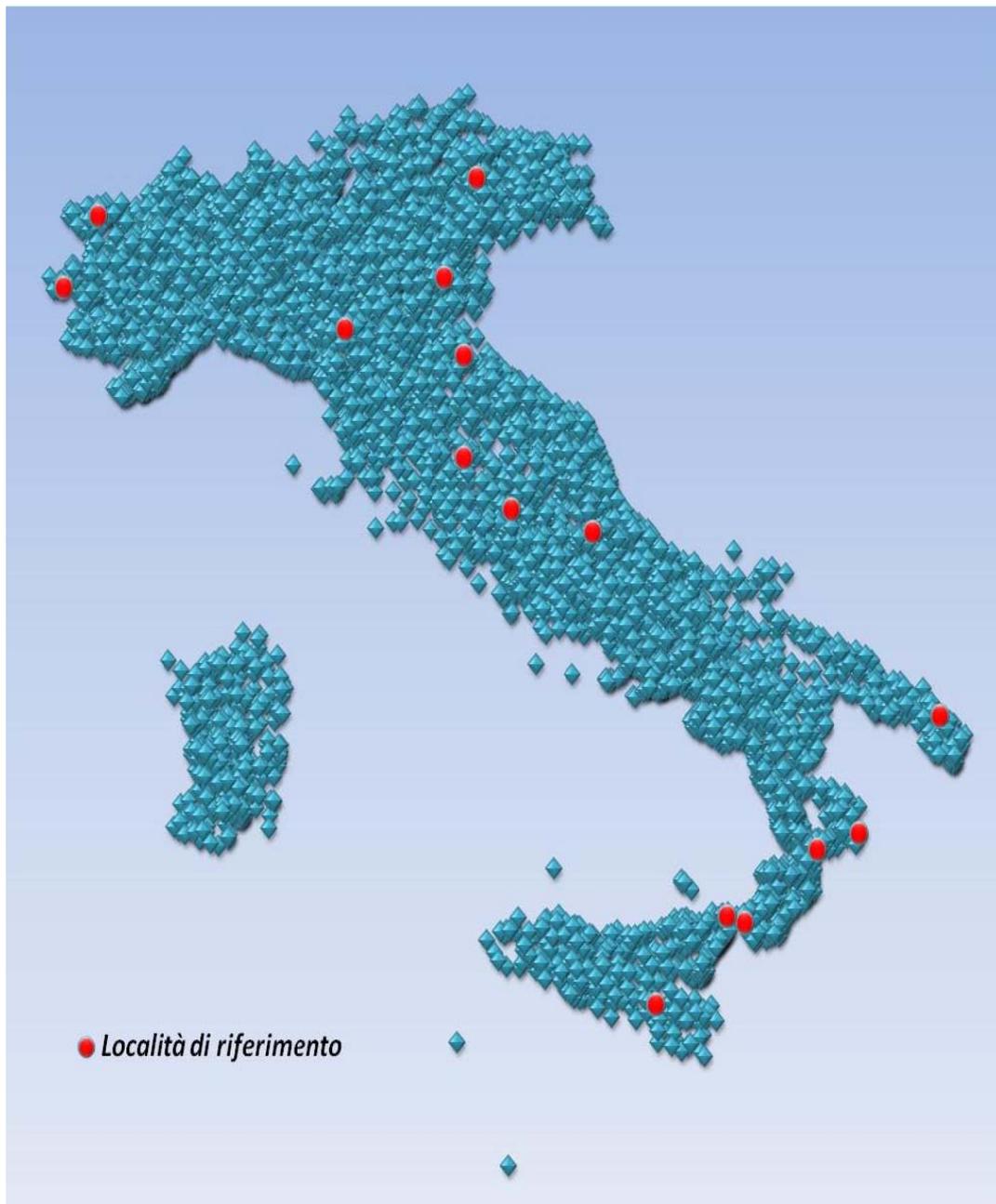


Figura 10. Distribuzione geografica delle località di riferimento

Come si può osservare dalla tabella che segue, esiste una difformità tra i valori dei Gradi-Giorno riportati nell'allegato A del DPR 412/93, e utilizzati per l'individuazione delle 6 zone climatiche nazionali, e quelli calcolati a partire dalla media mensile della temperatura giornaliera esterna, riportata dalla Norma UNI 10349/94.

Questi ultimi sono quelli utilizzati nelle analisi del fabbisogno energetico degli edifici.

FASCIA CLIMATICA		LOCALITA'		Gradi-Giorno DPR 412/93	Gradi-Giorno calcolati
B	1	REGGIO CALABRIA		772	963
	2	CROTONE		899	1147
	3	SAPONARA	ME	900	1009
C	1	LECCE		1153	1316
	2	CATANZARO		1328	1413
	3	CALTAGIRONE	CT	1399	1567
D	1	TERNI		1650	1842
	2	FORLI'		2087	2234
	3	CASTIGLIONE DEL LAGO	PG	2099	1990
E	1	ROVIGO		2466	2564
	2	AOSTA		2850	2959
	3	CASINA	RE	2999	3124
F	1	BELLUNO		3043	2893
	2	CALASCIO	AQ	3454	3329
	3	SESTRIERE	TO	5165	4778

tabella 10. Gradi-Giorno delle località di riferimento

La figura 11 mostra come esista comunque un'ottima correlazione lineare tra i valori dei Gradi-Giorno calcolati a partire dalla Norma UNI 10349 e quelli del DPR 412/93 .

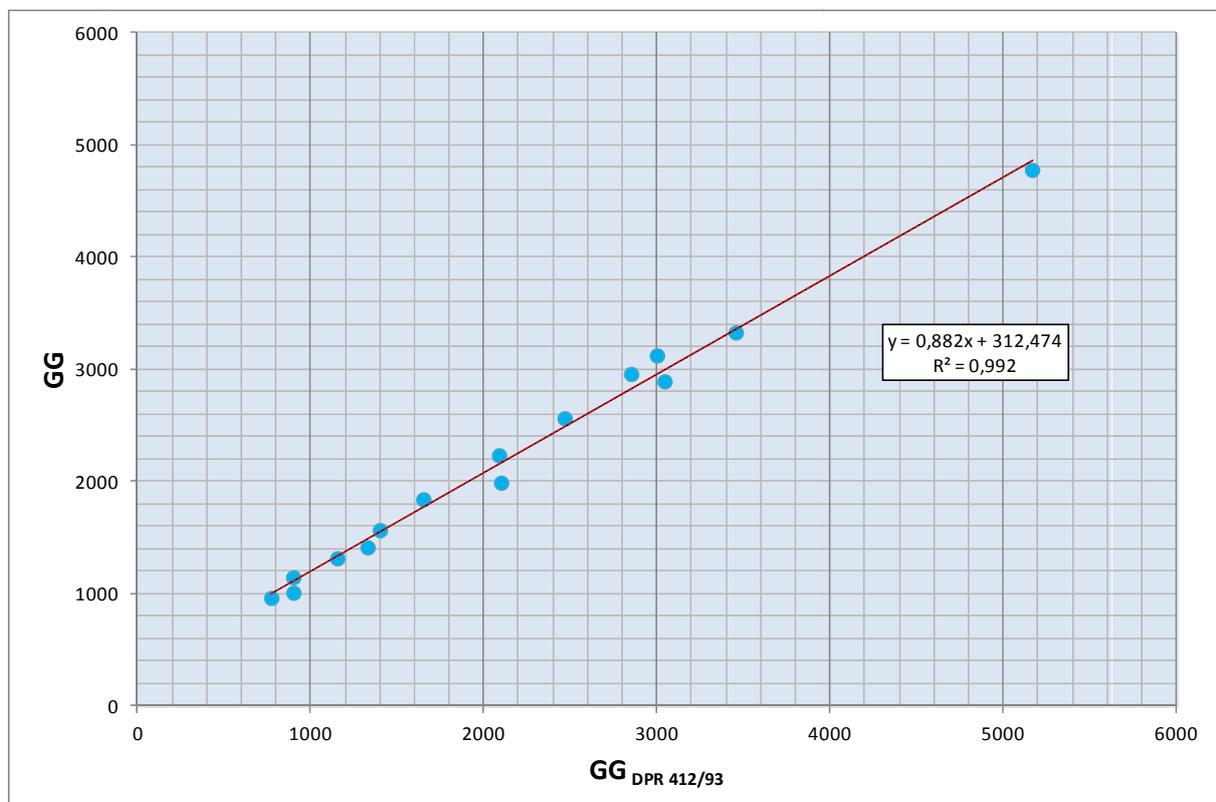


figura 11. Correlazione tra i Gradi-Giorni del DPR 412/93 e quelli calcolati

3 Caratteristiche prestazionali dell'involucro edilizio

3.1 Le configurazioni di involucro edilizio

Per ciascuna fascia climatica sono stati considerati tre diverse configurazioni di involucro edilizio (casi studio) così caratterizzati⁷:

- Caso studio livello 1: valori di trasmittanza = valori limiti previsti dal DPR 311/06;
- Caso studio livello 2: valori di trasmittanza < valori limiti previsti dal DPR 311/06
- Caso studio livello 3: valori di trasmittanza < valori di trasmittanza Caso studio livello 2

CASO STUDIO LIVELLO 1 trasmittanza termica				
FASCIA CLIMATICA	Pareti verticali perimetrali	Solaio piano terreno	Copertura	infissi
	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
B	0,48	0,49	0,38	3,00
C	0,40	0,42	0,38	2,60
D	0,36	0,36	0,32	2,40
E	0,34	0,33	0,30	2,20
F	0,33	0,32	0,29	2,00

tabella 11. Caso studio 1 - Valori di trasmittanza termica

CASO STUDIO LIVELLO 2 trasmittanza termica				
FASCIA CLIMATICA	Pareti verticali perimetrali	Solaio piano terreno	Copertura	infissi
	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
B	0,38	0,46	0,32	2,60
C	0,36	0,38	0,32	2,20
D	0,32	0,34	0,28	2,00
E	0,30	0,30	0,26	1,80
F	0,26	0,28	0,25	1,60

tabella 12. Caso studio 2 - Valori di trasmittanza termica

⁷ I valori di trasmittanza per i casi studio livelli 2 e 3 sono stati scelti tra una serie di n-ple utilizzate per una campagna di simulazione numerica, richiesta dal MISE, finalizzata alla definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.

CASO STUDIO LIVELLO 3 trasmissione termica				
FASCIA CLIMATICA	Pareti verticali perimetrali	Solaio piano terreno	Copertura	infissi
	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
B	0,34	0,38	0,27	2,00
C	0,28	0,33	0,27	1,75
D	0,24	0,28	0,22	1,67
E	0,23	0,25	0,20	1,50
F	0,22	0,23	0,19	1,33

tabella 13. Caso studio 3 - Valori di trasmittanza termica

Nella figura 12 sono riassunte, per fascia climatica, le riduzioni percentuali dei valori di trasmittanza delle singole strutture edilizie riferite ai valori limiti previsti dal DPR 311/06 (Caso studio Livello 1); per quanto riguarda il Livello 2 la riduzione media è di circa il 14%, mentre per il Livello 3 si aggira intorno al 30%.

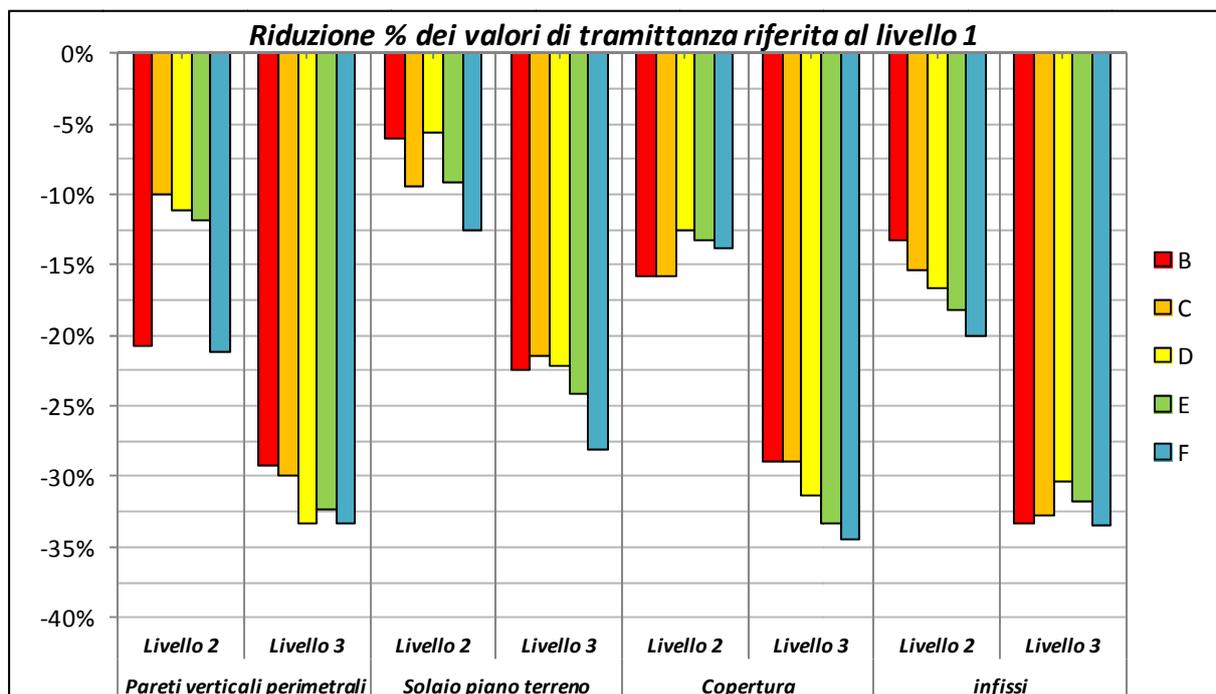


figura 12. Variazioni dei valori di trasmittanza dei livelli 2 e 3 riferiti al livello 1

In termini generali, come indicato nella tabella che segue, le variazioni percentuali dei valori di trasmittanza considerati, nell'ambito della stessa struttura edilizia, indipendentemente dalla fascia climatica, sono uguali o superiori al 100%.

	Valore minimo	Valore massimo	$\Delta\%$
	W/m ² K	W/m ² K	
Pareti verticali perimetrali	0,22	0,48	118%
Solaio piano terreno	0,23	0,49	113%
Copertura	0,19	0,38	100%
infissi	1,33	3,00	126%

tabella 14. Range di variazione dei valori di trasmittanza considerati

3.2 I coefficienti medi globali di scambio termico

Un parametro di sintesi delle caratteristiche prestazionali dell'involucro edilizio, che può essere preso a riferimento, è il *coefficiente medio globale di scambio termico*, definito come:

$$H'_T = \frac{H_{tr,adj}}{S} \quad [W / m^2 K]$$

dove

$H_{tr,adj}$: coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della configurazione considerata corretto per tener conto della differenza di temperatura interno-esterno

$S = \sum_K A_K$ Superficie lorda disperdente dell'edificio che racchiude il volume riscaldato, ovvero sommatoria della superficie A_k , estesa a tutti i k-esimi componenti disperdenti che costituiscono l'involucro edilizio della configurazione considerata [m²]

Tale parametro rappresenta in sostanza la trasmittanza termica media dell'intero involucro edilizio, pesata rispetto alle superfici. I valori più bassi caratterizzano involucri più performanti dal punto di vista delle dispersioni termiche per trasmissione.

Nella tabella seguente viene proposta una sintesi dei range di variabilità dei valori di H'_T per i tre casi studio analizzati. Il modello di edificio Monofamiliare risulta essere quello con i valori più bassi, mentre il Grande condominio quello con valori più alti.

Coefficiente medio globale di scambio termico H'_T (W/m ² K)			
	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio
Monofamiliare	0,30	0,55	0,41
Piccolo condominio	0,37	0,67	0,49
Grande condominio	0,40	0,72	0,53

tabella 15. Range di variazione del coefficiente H'_T

Le variazioni riscontrate tra modelli di edificio differenti si attestano intorno ad un valore massimo di circa il 30% e dipendono principalmente dall'incidenza delle superfici vetrate rispetto alla superficie disperdente complessiva .

I dati riportati in tabella 16 mostrano come siano meno efficienti, dal punto di vista delle dispersioni termiche per trasmissione, quegli involucri in cui gli infissi risultano avere un peso maggiore.

Rapporto $H_{\text{infissi}} / H'_T$			
	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio
Monofamiliare	20,7%	23,0%	21,8%
Piccolo condominio	33,7%	36,8%	35,2%
Grande condominio	44,4%	48,2%	46,2%

tabella 16. Range di variazione del rapporto $H_{\text{infissi}} / H'_T$

4 Il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento

4.1 Il calcolo del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento

Con il termine **fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento** si intende definire la quantità di calore che deve essere fornita all'ambiente climatizzato per mantenere la temperatura di 20°C per l'intero periodo di riscaldamento, funzione della fascia climatica.

La procedura di calcolo che viene adottata risulta essere di tipo standardizzato e si riferisce a quanto previsto dalla Norma UNI 11300-1/2014 (Asset Rating).

FASCIA CLIMATICA	PERIODO DI RISCALDAMENTO		GIORNI
B	1-dic	31-mar	121
C	15-nov	31-mar	137
D	1-nov	15-apr	166
E	15-ott	15-apr	183
F	5-ott	22-apr	200

tabella 17. Periodi di riscaldamento per fascia climatica

Per ogni mese, o frazione, il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ assume la seguente espressione:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} - \eta_{H,gn} \times (Q_{int} + Q_{sol,w}) \quad (1)$$

$Q_{H,tr}$: scambio di energia termica per trasmissione

$Q_{H,ve}$: scambio di energia termica per ventilazione

Q_{int} : apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne

$Q_{sol,w}$: apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati

$\eta_{H,gn}$: fattore di utilizzazione degli apporti di energia.

Le simulazioni numeriche effettuate sui singoli modelli di edificio sono state realizzate tramite un codice di calcolo stazionario, certificato dal CTI per la conformità alle metodologie di calcolo definite dalle norme UNI TS 11300 parte 1 e 2, come previsto al D.Lgs. 115/2009 e dal D.P.R. 59/2009.

Nelle tabelle che seguono sono riportati, per tutte le località geografiche di riferimento, i valori del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento, relativi ai modelli di edifici considerati, e per i tre casi studio analizzati; accanto al valore del fabbisogno è indicata anche la riduzione percentuale % dei livelli 2 e 3 riferita al livello 1.

FASCIA CLIMATICA	EDIFICIO MONOFAMILIARE							
	LOCALITA'	GG	Q _{H,nd} (kWh)			ΔQ _{H,nd} %		
			Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 2	Livello 3	
B	REGGIO CALABRIA	772	2.603	2.070	1.671	-20,5%	-35,8%	
	CROTONE	899	3.620	2.962	2.453	-18,2%	-32,2%	
	SAPONARA	ME	900	2.908	2.337	1.903	-19,6%	-34,6%
C	LECCE	1153	3.527	3.114	2.400	-11,7%	-32,0%	
	CATANZARO	1328	3.966	3.515	2.737	-11,4%	-31,0%	
	CALTAGIRONE	CT	1399	4.395	3.910	3.052	-11,0%	-30,6%
D	TERNI	1650	5.148	4.502	3.481	-12,5%	-32,4%	
	FORLI'	2087	6.939	6.155	4.907	-11,3%	-29,3%	
	CASTIGLIONE del LAGO	PG	2099	5.837	5.134	4.016	-12,0%	-31,2%
E	ROVIGO	2466	7.571	6.624	5.352	-12,5%	-29,3%	
	AOSTA	2850	8.979	7.879	6.396	-12,3%	-28,8%	
	CASINA	RE	2999	9.890	8.726	7.152	-11,8%	-27,7%
F	BELLUNO	3043	8.473	7.065	5.868	-16,6%	-30,7%	
	CALASCIO	AQ	3454	10.089	8.467	7.081	-16,1%	-29,8%
	SESTRIERE	TO	5165	16.226	13.888	11.890	-14,4%	-26,7%

tabella 18. Edificio Monofamiliare - Fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento

FASCIA CLIMATICA	PICCOLO CONDOMINIO							
	LOCALITA'	GG	Q _{H,nd} (kWh)			ΔQ _{H,nd} %		
			Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 2	Livello 3	
B	REGGIO CALABRIA	772	5.440	3.859	2.863	-29,1%	-47,4%	
	CROTONE	899	8.387	6.272	4.883	-25,2%	-41,8%	
	SAPONARA	ME	900	6.345	4.589	3.462	-27,7%	-45,4%
C	LECCE	1153	7.710	6.608	4.475	-14,3%	-42,0%	
	CATANZARO	1328	8.930	7.706	5.307	-13,7%	-40,6%	
	CALTAGIRONE	CT	1399	9.913	8.617	5.959	-13,1%	-39,9%
D	TERNI	1650	12.892	10.703	7.724	-17,0%	-40,1%	
	FORLI'	2087	18.879	16.139	12.322	-14,5%	-34,7%	
	CASTIGLIONE del LAGO	PG	2099	15.085	12.648	9.294	-16,2%	-38,4%
E	ROVIGO	2466	20.888	17.696	13.854	-15,3%	-33,7%	
	AOSTA	2850	24.846	21.066	16.480	-15,2%	-33,7%	
	CASINA	RE	2999	28.343	24.327	19.434	-14,2%	-31,4%
F	BELLUNO	3043	23.117	18.396	15.028	-20,4%	-35,0%	
	CALASCIO	AQ	3454	27.954	22.385	18.359	-19,9%	-34,3%
	SESTRIERE	TO	5165	48.818	40.650	34.684	-16,7%	-29,0%

tabella 19. Piccolo Condominio - Fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento

FASCIA CLIMATICA	GRANDE CONDOMINIO							
	LOCALITA'	GG	Q _{H,nd} (kWh)			ΔQ _{H,nd} %		
			Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 2	Livello 3	
B	REGGIO CALABRIA	772	14.463	10.151	7.420	-29,8%	-48,7%	
	CROTONE	899	22.880	16.842	12.887	-26,4%	-43,7%	
	SAPONARA	ME	900	16.988	12.117	8.986	-28,7%	-47,1%
C	LECCE	1153	20.827	17.704	11.764	-15,0%	-43,5%	
	CATANZARO	1328	24.250	20.763	13.982	-14,4%	-42,3%	
	CALTAGIRONE	CT	1399	27.198	23.496	15.925	-13,6%	-41,4%
D	TERNI	1650	36.810	30.105	21.795	-18,2%	-40,8%	
	FORLI'	2087	55.616	46.985	36.004	-15,5%	-35,3%	
	CASTIGLIONE del LAGO	PG	2099	43.411	35.849	26.370	-17,4%	-39,3%
E	ROVIGO	2466	62.128	52.218	41.228	-16,0%	-33,6%	
	AOSTA	2850	74.304	62.463	49.280	-15,9%	-33,7%	
	CASINA	RE	2999	85.465	72.839	58.687	-14,8%	-31,3%
F	BELLUNO	3043	68.490	54.201	44.797	-20,9%	-34,6%	
	CALASCIO	AQ	3454	82.895	65.831	54.502	-20,6%	-34,3%
	SESTRIERE	TO	5165	150.543	124.949	107.702	-17,0%	-28,5%

tabella 20. Grande Condominio - Fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento

Le tre diverse configurazioni di involucro edilizio (casi studio) sono caratterizzati da ampie variabilità dei valori di fabbisogno

- Edificio monofamiliare: a parità di livello, il fabbisogno nella località con il più alto numero di *GG* è in media circa 7 volte quello nella località con il più basso numero di *GG*. Nel passaggio dal caso studio 1 ai casi studi 2 e 3 si hanno riduzioni medie del fabbisogno rispettivamente del 14% e del 31%.
- Piccolo Condominio: a parità di livello, il fabbisogno nella località con il più alto numero di *GG* è in media circa 10 volte quello nella località con il più basso numero di *GG*. Nel passaggio dal caso studio 1 ai casi studi 2 e 3 si hanno riduzioni medie del fabbisogno rispettivamente del 18% e del 38%.
- Grande condominio: a parità di livello, il fabbisogno nella località con il più alto numero di *GG* è in media circa 12 volte quello nella località con il più basso numero di *GG*. Nel passaggio dal caso studio 1 ai casi studi 2 e 3 si hanno riduzioni medie del fabbisogno rispettivamente del 19% e del 39%.

Il rapporto tra il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ e l'area della superficie utile (netta) dell'ambiente climatizzato $A_{sup\ utile}$ viene definito come **indice di prestazione termica utile per il riscaldamento**

$$EP_{H,nd} = \frac{Q_{H,nd}}{A_{sup\ utile}} \quad [kWh/m^2]$$

In realtà tale indice di per sé non ha alcun significato fisico in quanto l'entità normalizzatrice ovvero la superficie utile non entra direttamente nell'equazione (1) del fabbisogno. Pertanto non può essere utilizzato per confrontare modelli di edificio diversi tra loro; ha senso invece considerarlo per valutare le variazioni di prestazione energetica per uno stesso edificio.

Nelle figure seguenti è riportato il valore dell'indice di prestazione termica utile per le configurazioni esaminate.

Il confronto di questi indici per edifici differenti altera l'effettivo rapporto tra i fabbisogni energetici; infatti dall'analisi degli istogrammi riprodotti emerge che l'edificio monofamiliare ha mediamente un valore di $EP_{H,nd}$ circa 2 volte quello dell'edificio Piccolo Condominio e circa 3 volte quello del Grande Condominio.

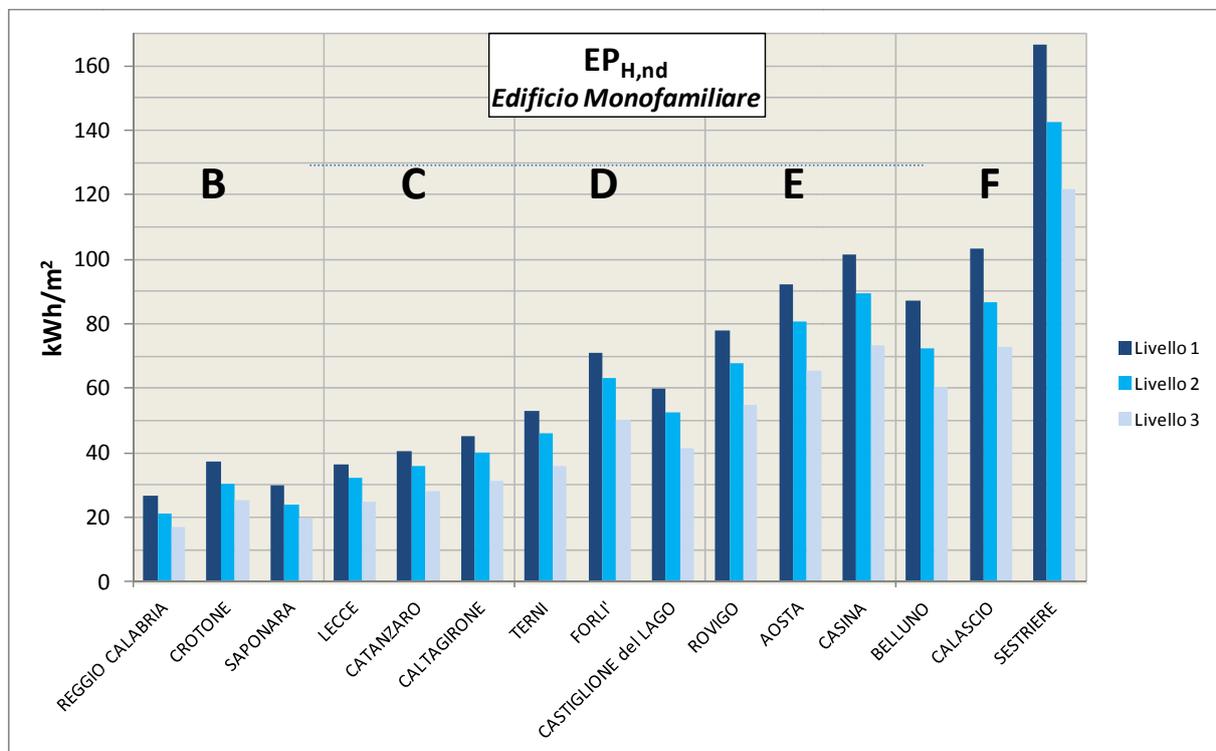


figura 13. Edificio Monofamiliare - Indice di prestazione termica utile

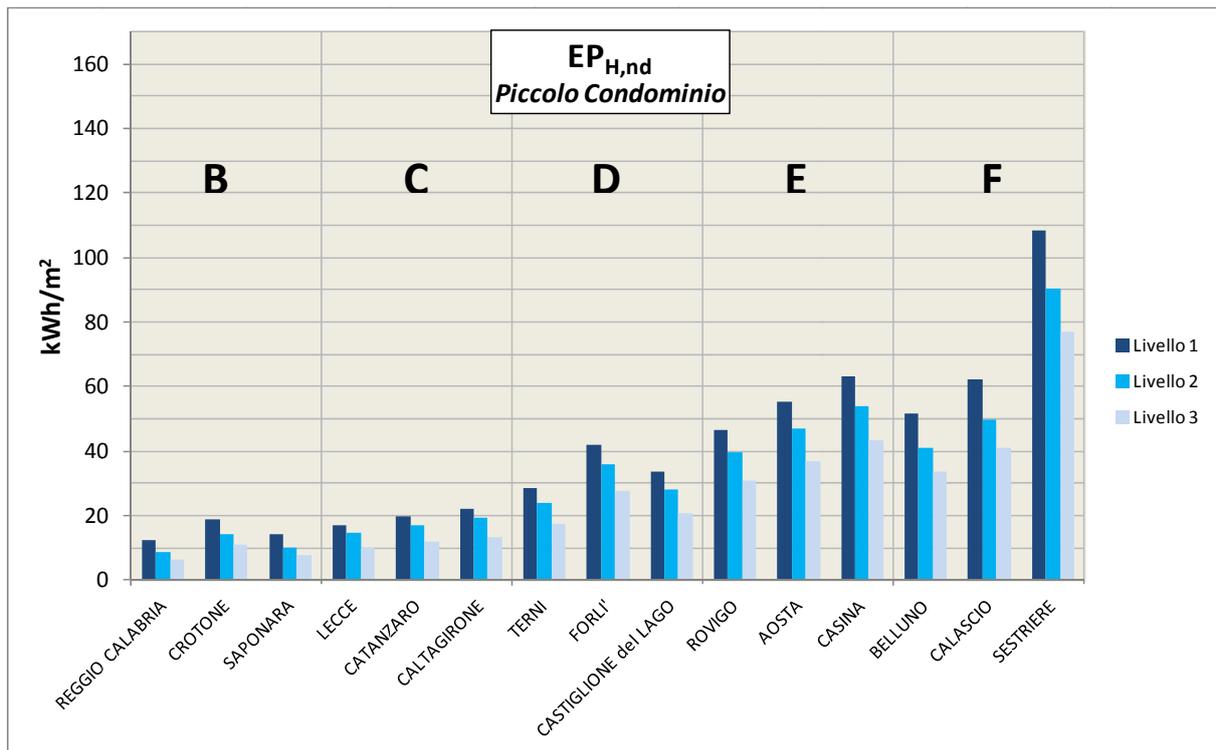


figura 14. Piccolo Condominio - Indice di prestazione termica utile

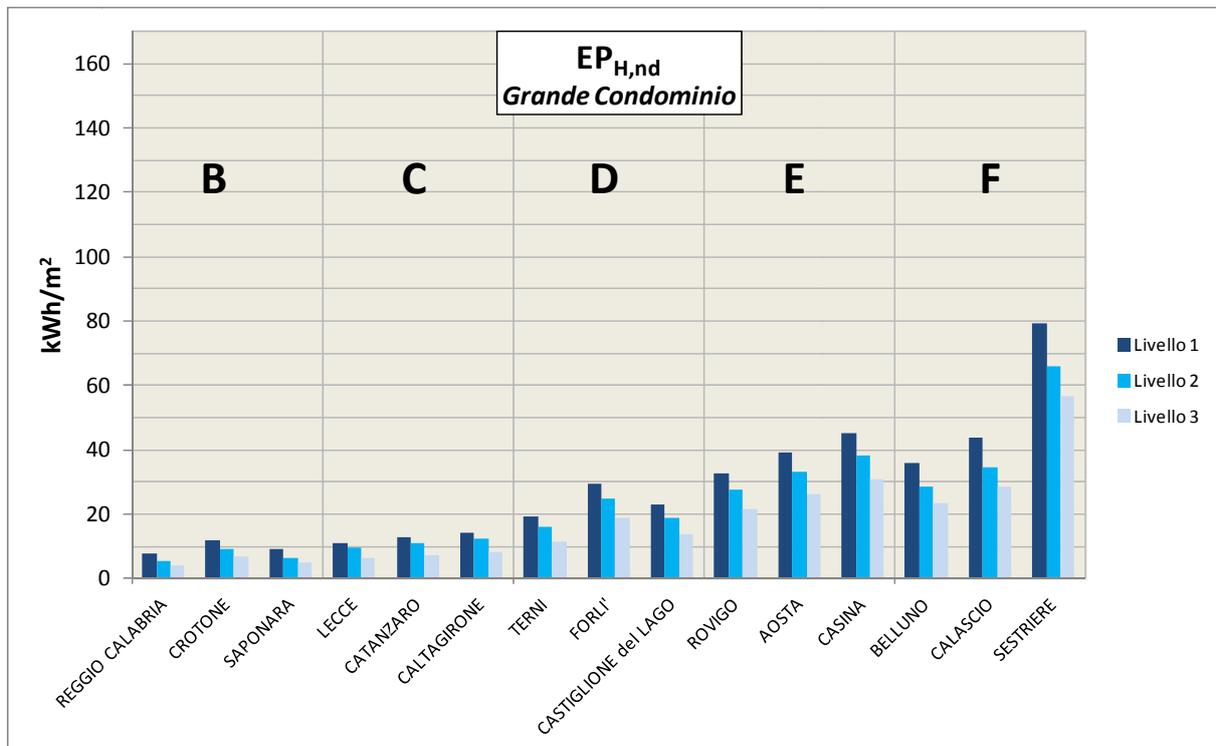


figura 15. Grande Condominio - Indice di prestazione termica utile

Per un confronto tra le prestazioni energetiche dei diversi modelli, un indicatore più adeguato si può ricavare dal rapporto tra il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ e la superficie lorda disperdente dell'edificio che delimita il volume climatizzato S

$$\frac{Q_{H,nd}}{S} \quad [kWh / m^2]$$

Nella tabella seguente è riportata una sintesi dei valori di tale indice, il cui quadro complessivo è proposto nei successivi grafici, calcolati per le configurazioni analizzate.

Dall'analisi dei risultati si evidenzia come, a parità di livello, il valore medio per ciascun modello di edificio dipende poco dal modello stesso.

$Q_{H,nd} / S$ (kWh/m ²)									
	Livello 1			Livello 2			Livello 3		
	min	max	media	min	max	media	min	max	media
Monofamiliare	7,12	44,39	18,27	5,66	37,99	15,75	4,57	32,53	12,83
Piccolo condominio	5,49	49,31	18,02	3,90	41,06	14,93	2,89	35,03	11,73
Grande condominio	5,15	53,58	18,66	3,61	44,47	15,34	2,64	38,33	12,13

tabella 21. Range di variabilità del rapporto $Q_{H,nd}/S$

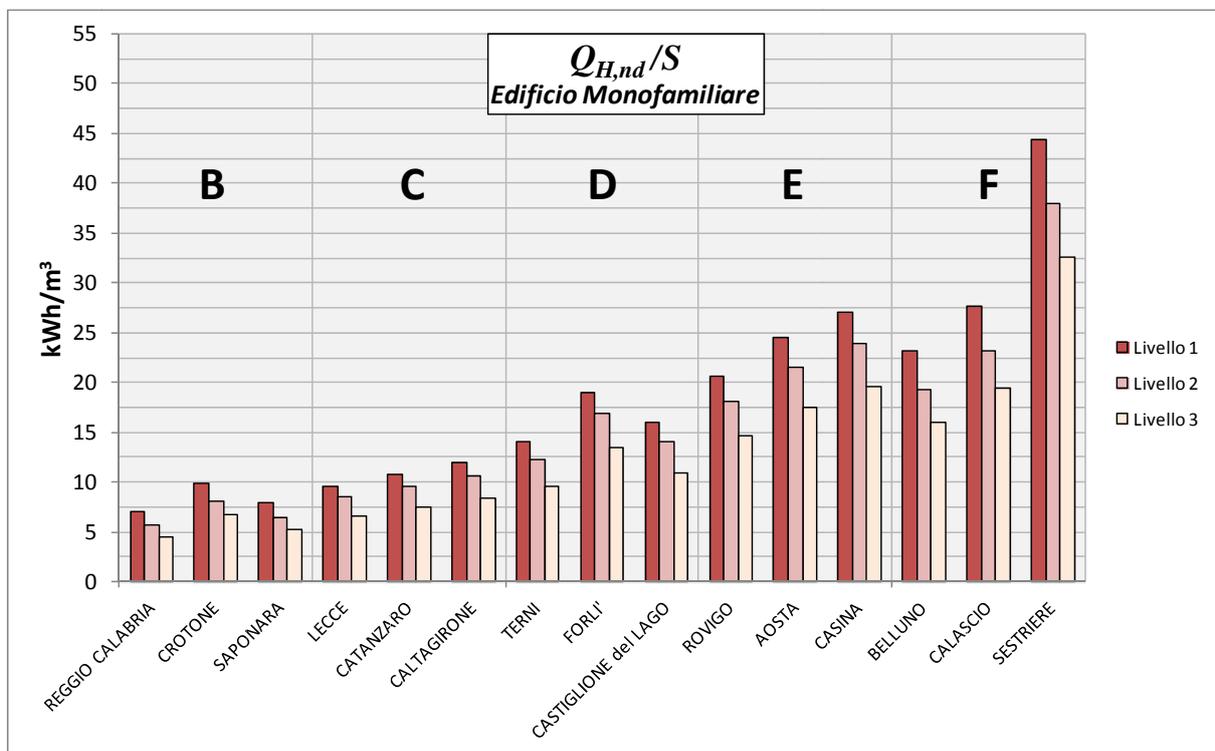


figura 16. Edificio Monofamiliare - Rapporto $Q_{H,nd}/S$

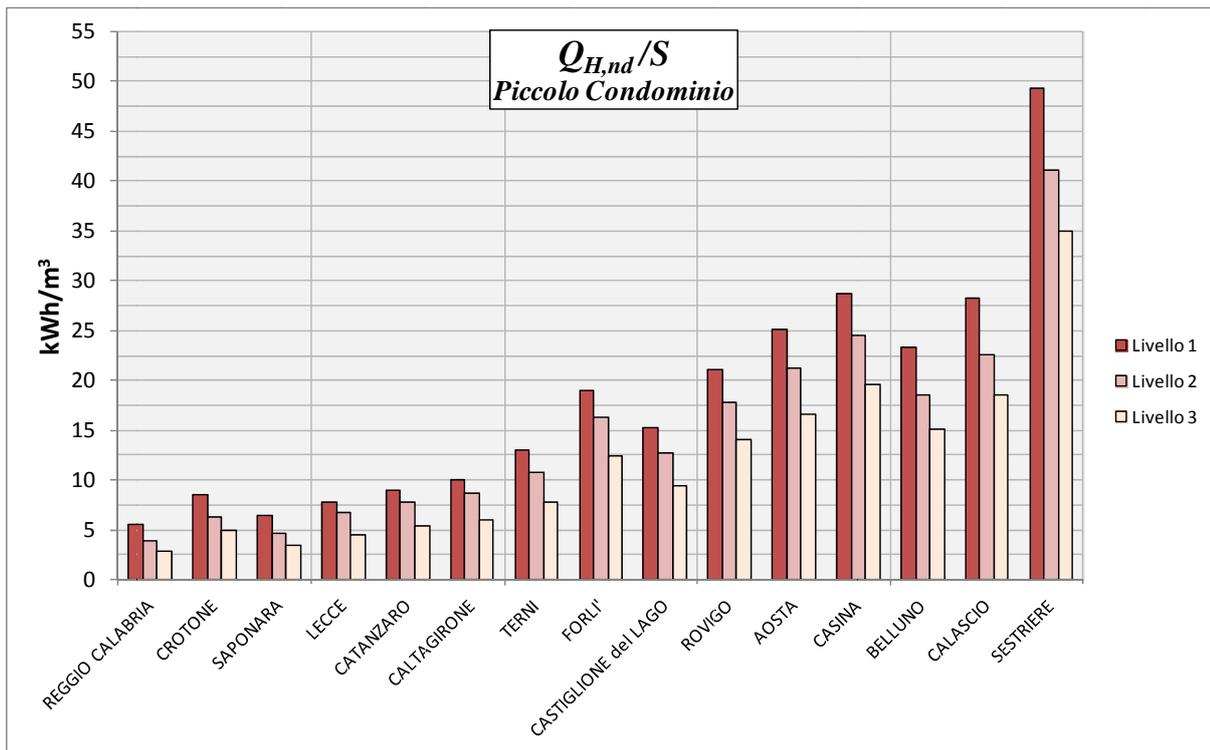


figura 17. Piccolo Condominio - Rapporto $Q_{H,nd}/S$

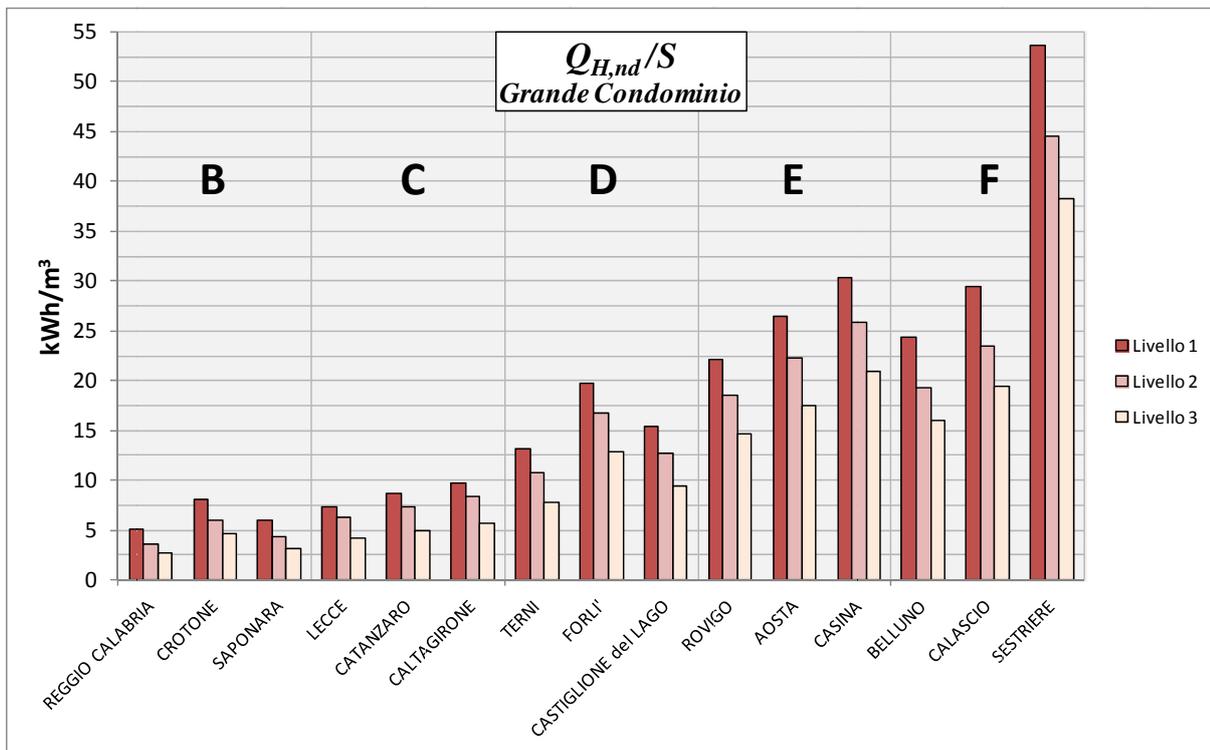


figura 18. Grande Condominio - Rapporto $Q_{H,nd}/S$

4.2 Le componenti del fabbisogno ideale di energia termica

Riprendiamo l'equazione (1) del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ riscrivendola in forma compatta.

$$Q_{H,nd} = F(Q_{H,tr}, Q_{H,ve}, Q_{int}, Q_{sol,w}) \quad (2)$$

Il fabbisogno è funzione degli scambi di energia termica e degli apporti dovuti alla radiazione solare e alle sorgenti interne.

Nei grafici che seguono sono proposti i confronti tra le varie componenti che concorrono alla formazione del fabbisogno, per tre diverse fasce climatiche (B, D, E).

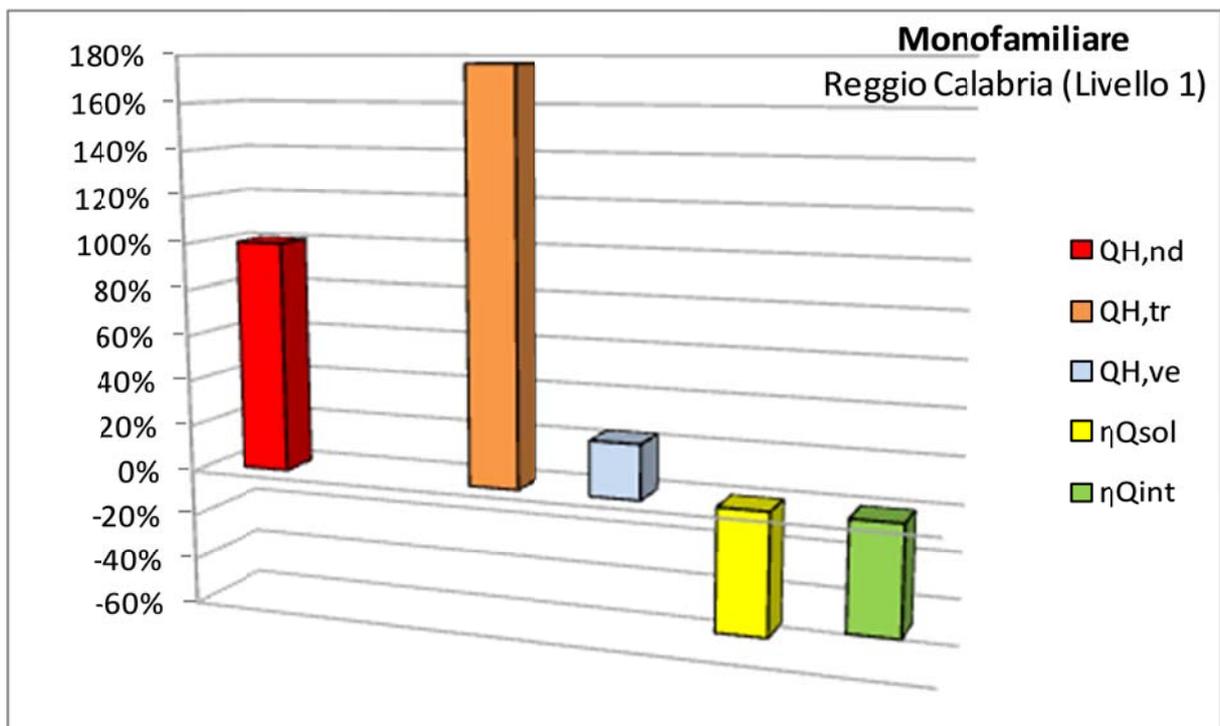


figura 19. Edificio Momofamiliare (Reggio Calabria) - Le componenti del fabbisogno ideale di energia termica

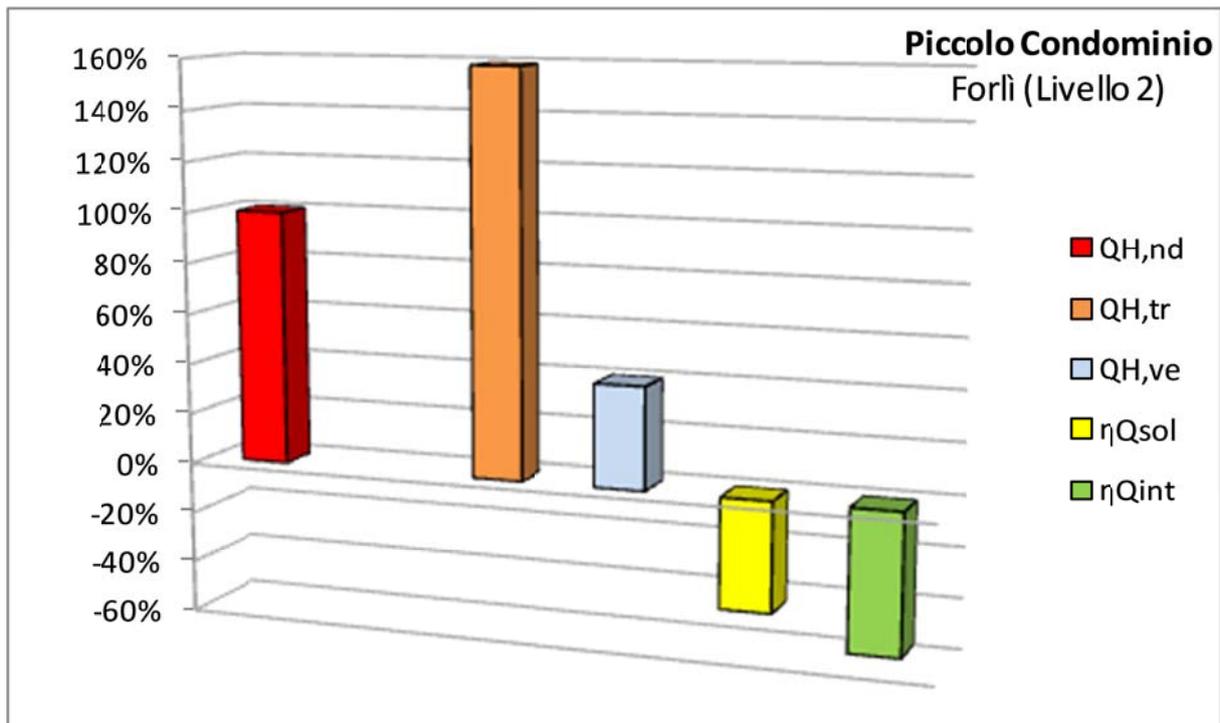


figura 20. Piccolo Condominio (Forlì) - Le componenti del fabbisogno ideale di energia termica

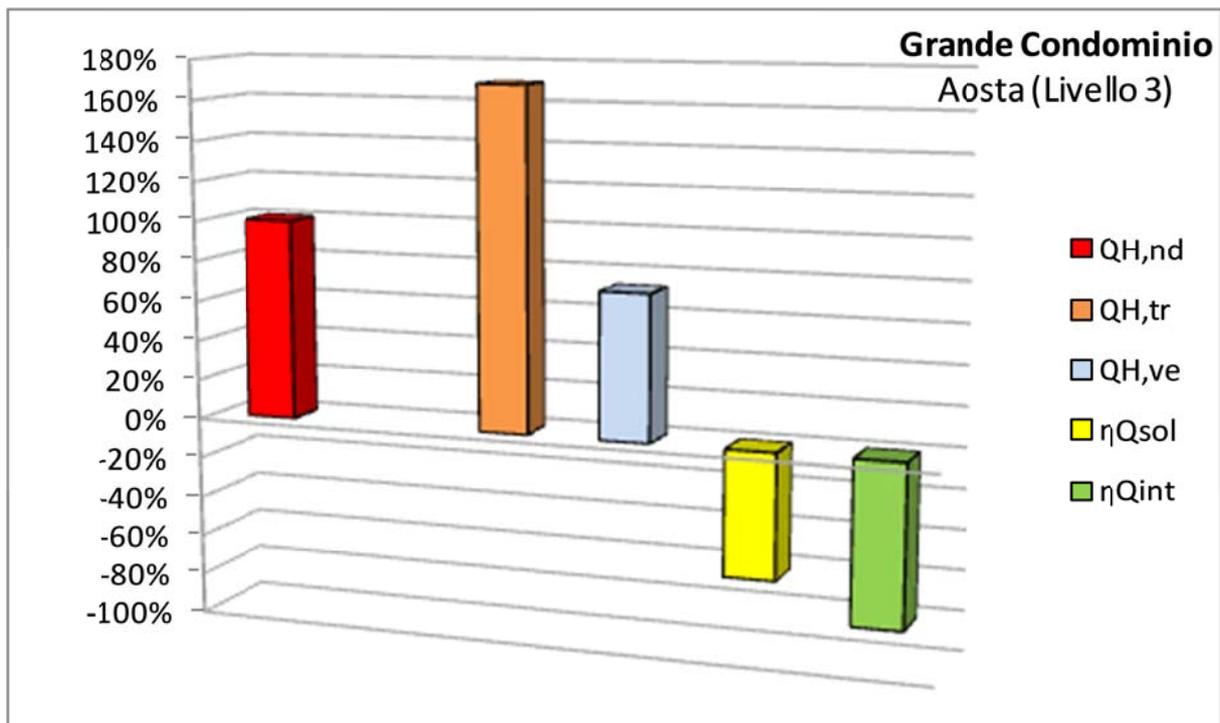


figura 21. Grande Condominio (Aosta) - Le componenti del fabbisogno ideale di energia termica

La componente principale è costituita dallo scambio di energia termica per trasmissione $Q_{H,tr}$ (per i casi esaminati è mediamente da 2 a 6 volte più grande delle altre componenti).

Questa tiene conto degli scambi termici per trasmissione dovuti alla differenza tra temperatura interna e temperatura esterna $H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set} - \theta_e)$, dell'extraflusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso

la volta celeste (mediato sul tempo) $\Phi_{r,mn}$, e degli apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti opachi $Q_{sol,op}$:

$$Q_{H,nd} = H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set} - \theta_e) \times t + f_{\Phi}(\Phi_{r,mn}) \times t - Q_{sol,op} \quad (3)$$

Per quanto riguarda i modelli di edificio esaminati in questo studio, le simulazioni numeriche effettuate hanno evidenziato come lo scambio termico per trasmissione rappresenti il fenomeno determinante nella definizione del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento.

FASCIA CLIMATICA	LOCALITÀ	Livello 1		Livello 2		Livello 3		
		$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	
EDIFICIO MONOFAMILIARE	B	REGGIO CALABRIA	2.603	4.603	2.070	4.053	1.671	3.507
		CROTONE	3.620	5.527	2.962	4.862	2.453	4.209
		SAPONARA ME	2.908	4.867	2.337	4.282	1.903	3.705
	C	LECCE	3.527	5.577	3.114	5.015	2.400	4.287
		CATANZARO	3.966	6.017	3.515	5.410	2.737	4.623
		CALTAGIRONE CT	4.395	6.654	3.910	5.983	3.052	5.114
	D	TERNI	5.148	7.161	4.502	6.508	3.481	5.468
		FORLI'	6.939	8.677	6.155	7.886	4.907	6.623
		CASTIGLIONE del LAGO PG	5.837	7.764	5.134	7.055	4.016	5.925
	E	ROVIGO	7.571	9.334	6.624	8.379	5.352	7.088
		AOSTA	8.979	10.774	7.879	9.672	6.396	8.184
		CASINA RE	9.890	11.406	8.726	10.240	7.152	8.662
F	BELLUNO	8.473	10.416	7.065	8.999	5.868	7.785	
	CALASCIO AQ	10.089	11.943	8.467	10.318	7.081	8.928	
	SESTRIERE TO	16.226	17.164	13.888	14.825	11.890	12.827	

tabella 22. Edificio Monofamiliare - I valori di $Q_{H,nd}$ e $Q_{H,tr}$

FASCIA CLIMATICA	LOCALITÀ	Livello 1		Livello 2		Livello 3		
		$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	
PICCOLO CONDOMINIO	B	REGGIO CALABRIA	5.440	15.067	3.859	13.133	2.863	11.328
		CROTONE	8.387	18.103	6.272	15.762	4.883	13.605
		SAPONARA ME	6.345	15.967	4.589	13.905	3.462	11.994
	C	LECCE	7.710	18.050	6.608	16.209	4.475	13.698
		CATANZARO	8.930	19.491	7.706	17.502	5.307	14.786
		CALTAGIRONE CT	9.913	21.544	8.617	19.345	5.959	16.350
	D	TERNI	12.892	23.525	10.703	21.155	7.724	17.812
		FORLI'	18.879	28.483	16.139	25.618	12.322	21.561
		CASTIGLIONE del LAGO PG	15.085	25.529	12.648	22.954	9.294	19.318
	E	ROVIGO	20.888	30.657	17.696	27.296	13.854	23.168
		AOSTA	24.846	35.339	21.066	31.470	16.480	26.720
		CASINA RE	28.343	37.430	24.327	33.333	19.434	28.290
F	BELLUNO	23.117	33.986	18.396	29.014	15.028	25.373	
	CALASCIO AQ	27.954	38.934	22.385	33.244	18.359	29.075	
	SESTRIERE TO	48.818	55.926	40.650	47.742	34.684	41.754	

tabella 23. Piccolo Condominio I valori di $Q_{H,nd}$ e $Q_{H,tr}$

FASCIA CLIMATICA	LOCALITÀ	Livello 1		Livello 2		Livello 3	
		$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh	$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,tr}$ kWh
GRANDE CONDOMINIO	REGGIO CALABRIA	14.463	46.986	10.151	40.900	7.420	35.153
	B CROTONE	22.880	56.417	16.842	49.058	12.887	42.199
	SAPONARA ME	16.988	49.834	12.117	43.340	8.986	37.252
	LECCE	20.827	56.016	17.704	50.261	11.764	42.288
	C CATANZARO	24.250	60.499	20.763	54.282	13.982	45.654
	CALTAGIRONE CT	27.198	66.877	23.496	60.003	15.925	50.841
	TERNI	36.810	73.617	30.105	65.830	21.795	55.723
	D FORLI'	55.616	89.000	46.985	79.611	36.004	67.382
	CASTIGLIONE del LAGO PG	43.411	79.899	35.849	71.442	26.370	60.439
	ROVIGO	62.128	95.817	52.218	84.956	41.228	72.631
	E AOSTA	74.304	110.444	62.463	97.945	49.280	83.762
	CASINA RE	85.465	116.880	72.839	103.659	58.687	88.617
BELLUNO	68.490	105.757	54.201	90.038	44.797	79.388	
F CALASCIO AQ	82.895	121.069	65.831	103.095	54.502	90.914	
SESTRIERE TO	150.543	173.732	124.949	147.917	107.702	130.444	

tabella 24. Grande Condominio I valori di $Q_{H,nd}$ e $Q_{H,tr}$

L'esame dei dati energetici proposti nelle tabelle precedenti ha portato a considerare la possibilità di sviluppare, per ognuna delle tre tipologie di edificio considerate, un'analisi di correlazione tra il fabbisogno e lo scambio termico per trasmissione.

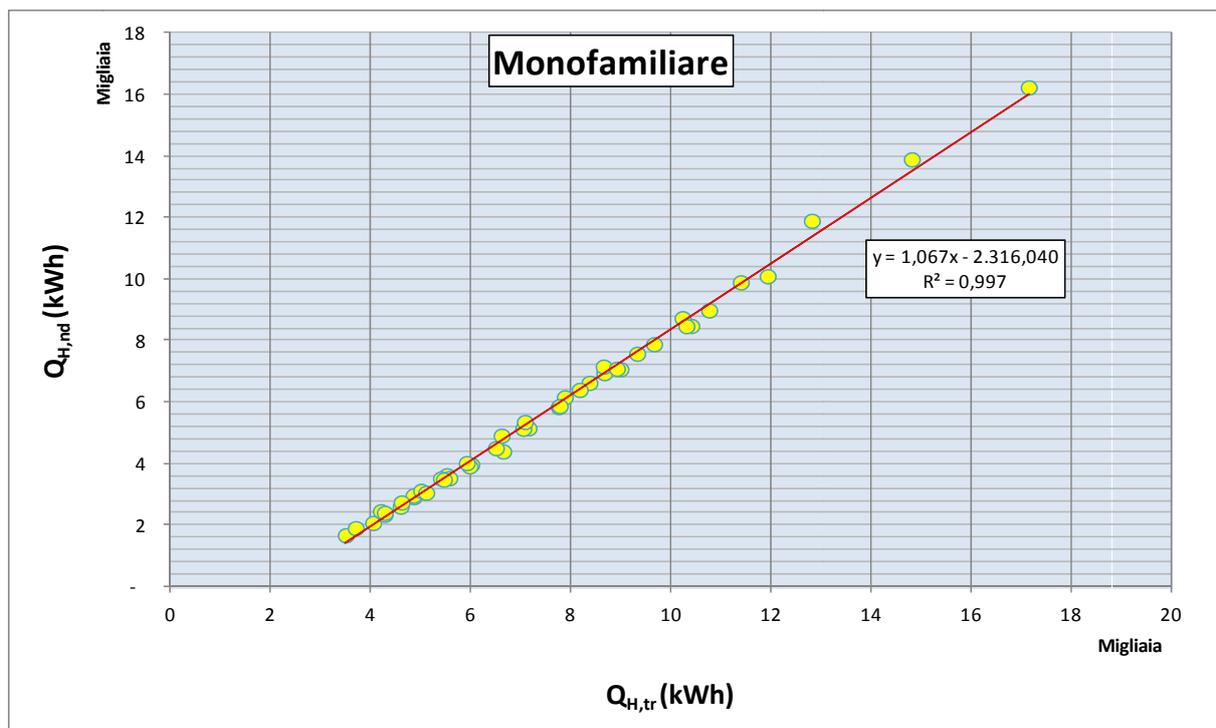


figura 22. Edificio Monofamiliare - Analisi di correlazione tra $Q_{H,nd}$ e $Q_{H,tr}$

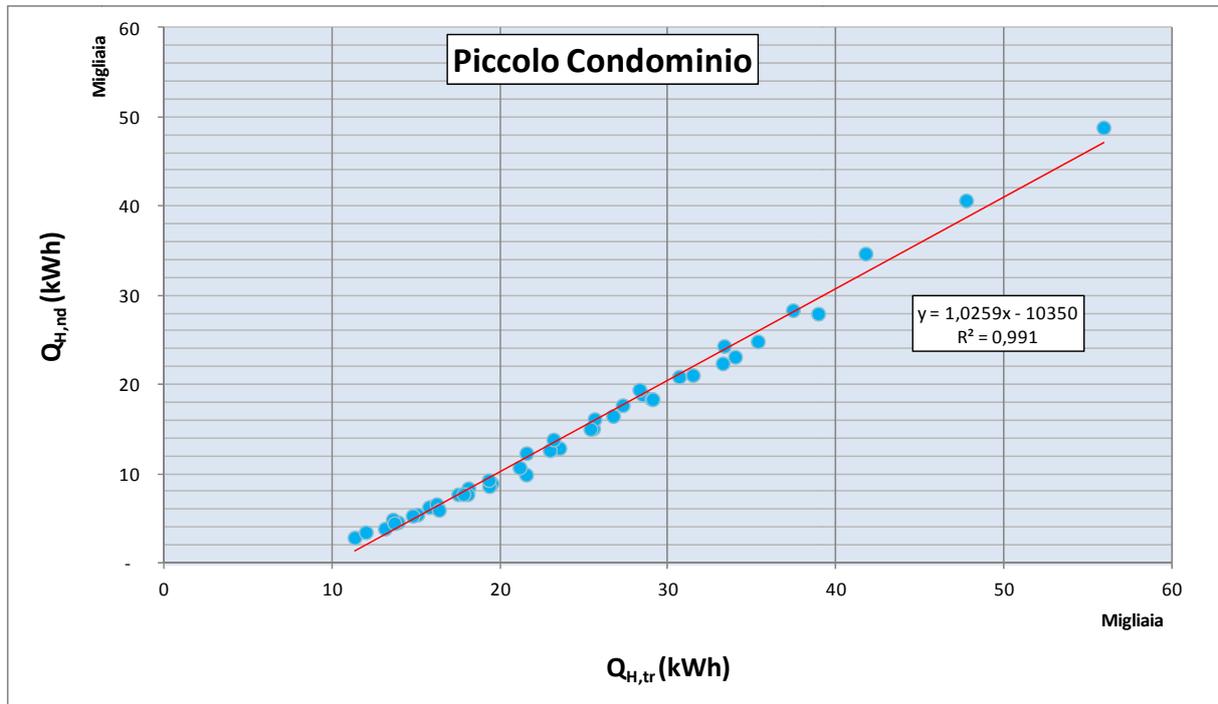


figura 23. Piccolo Condominio - Analisi di correlazione tra $Q_{H,nd}$ e $Q_{H,tr}$

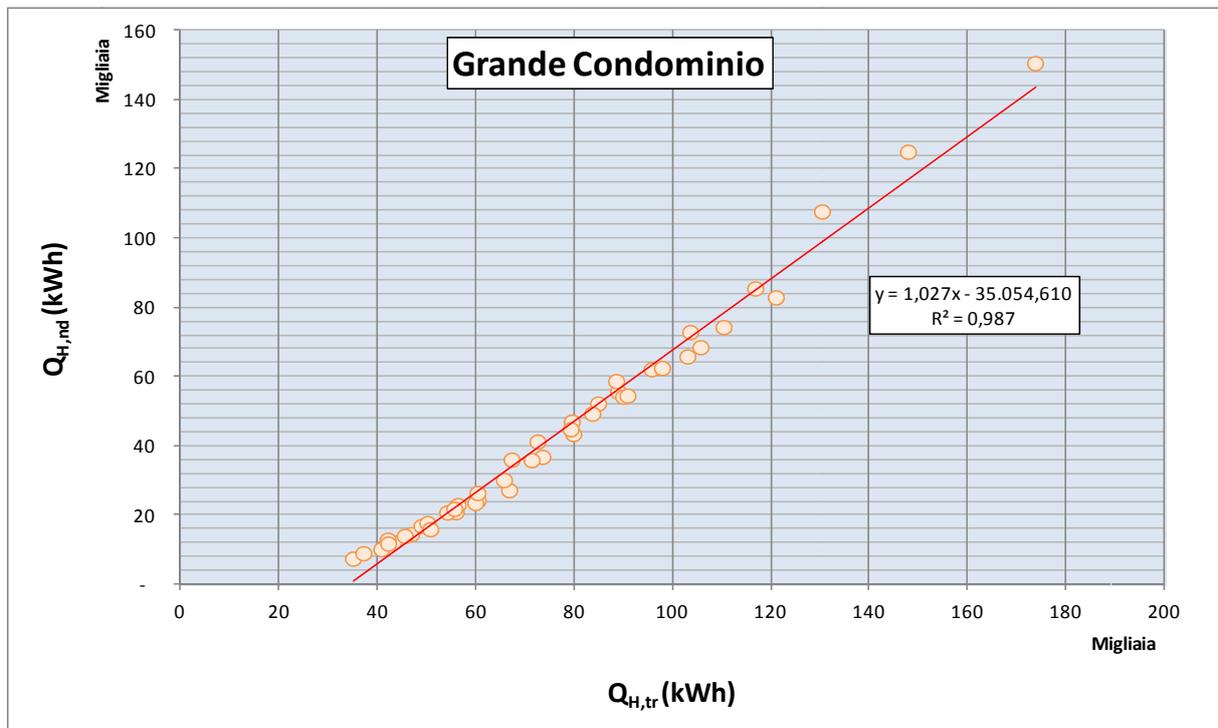


figura 24. Grande Condominio - Analisi di correlazione tra $Q_{H,nd}$ e $Q_{H,tr}$

I grafici riprodotti mostrano i risultati di queste analisi; le correlazioni ottenute sono di tipo lineare (positiva) e quasi perfette.

Questa risulta essere una ulteriore conferma a quanto evidenziato precedentemente circa il peso decisivo, nell'ambito dei modelli esaminati, dello scambio termico per trasmissione nella definizione del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento.

A questo punto della trattazione, visti gli esiti fin qui ottenuti, si può pensare di riscrivere l'equazione (2) in una forma ancora più compatta, ovvero

$$Q_{H,nd} = f(Q_{H,tr}) \quad (4)$$

L'equazione scritta in questa forma sintetizza un primo importante risultato delle simulazione effettuate: *"nell'insieme analizzato, il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ è, dal punto di vista numerico, funzione dello scambio termico per trasmissione $Q_{H,tr}$; gli altri contributi presenti (ventilazione e apporti) introducono un effetto apparente di riduzione dell'ampiezza di $Q_{H,tr}$."*

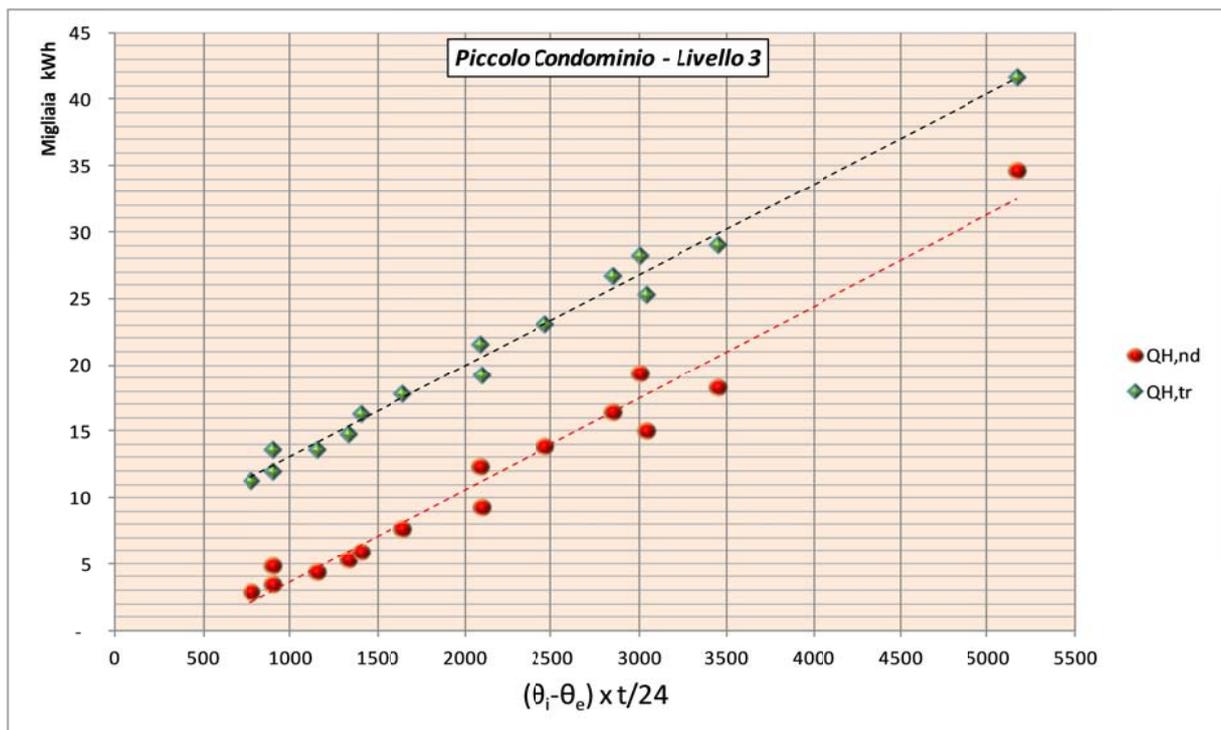


figura 25. Andamenti di $Q_{H,nd}$ e $Q_{H,tr}$ in funzione delle variazioni di temperatura interna-esterna

4.3 Una relazione semplificata tra il fabbisogno ideale di energia termica e lo scambio termico per trasmissione

Riprendiamo a questo punto l'equazione (3) e introduciamo un'ipotesi semplificativa ovvero quella di trascurare i termini relativi all'extraflusso $f_{\Phi}(\Phi_{r,mm})$ e agli apporti solari $Q_{sol,op}$

$$Q_{H,tr} \cong H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set} - \theta_e) \times t \quad (5)$$

L'errore introdotto da questa semplificazione è modesto, infatti le variazioni medie

$$\Delta_{\%} = \left| \frac{Q_{H,tr} - H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set} - \theta_e) \times t}{Q_{H,tr}} \right|_{\%}$$

si attestano intorno al 3%, con punte massime di circa l'11%; scarti superiori al 4,5% si hanno solo per le simulazioni relative alla località Caltagirone

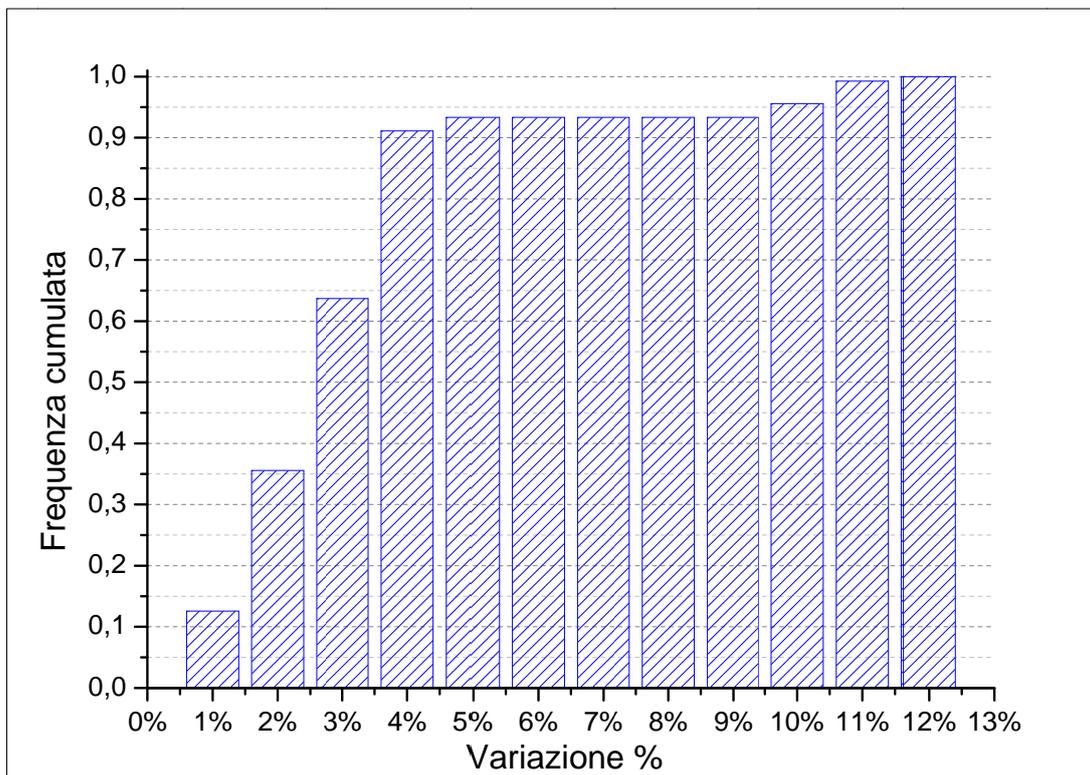


figura 26. Frequenza cumulata dello scarto $\Delta_{\%}$

	Valore minimo	Valore massimo	Valore medio
$\Delta_{\%}$	0,1%	11,1%	2,8%

tabella 25. Range di variazione dello scarto $\Delta_{\%}$

Assunta valida l'ipotesi fatta, partendo dalla definizione dei Gradi-Giorno, e ricordando che la temperatura interna di set-point $\theta_{int,set}$ è pari a 20°C, lo scambio termico per trasmissione espresso dalla (3) può essere esplicitato attraverso la seguente relazione semplificata:

$$Q_{H,tr} = H'_T \times S \times GG \times 24 \times 10^{-3} \quad [kWh] \quad (6)$$

dove

H'_T Coefficiente medio globale di scambio termico [W/m²K]

S Superficie lorda disperdente dell'edificio che racchiude il volume riscaldato [m²]

GG Gradi-Giorno [K d]⁸

Utilizzando come fattore normalizzante il volume lordo delle parti di edificio riscaldate V e, per semplicità di scrittura, sostituendo il valore 0,024 con il termine c , si può caratterizzare lo scambio termico per trasmissione con la seguente espressione:

$$\frac{Q_{H,tr}}{V} = c \times H'_T \times \frac{S}{V} \times GG \quad \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \quad (7)$$

Questa formulazione introduce il cosiddetto *fattore di forma* S/V che mette in evidenza come, a parità di coefficiente medio globale di scambio termico, un edificio risulterà tanto più disperdente tanto più grande sarà il valore di tale rapporto.

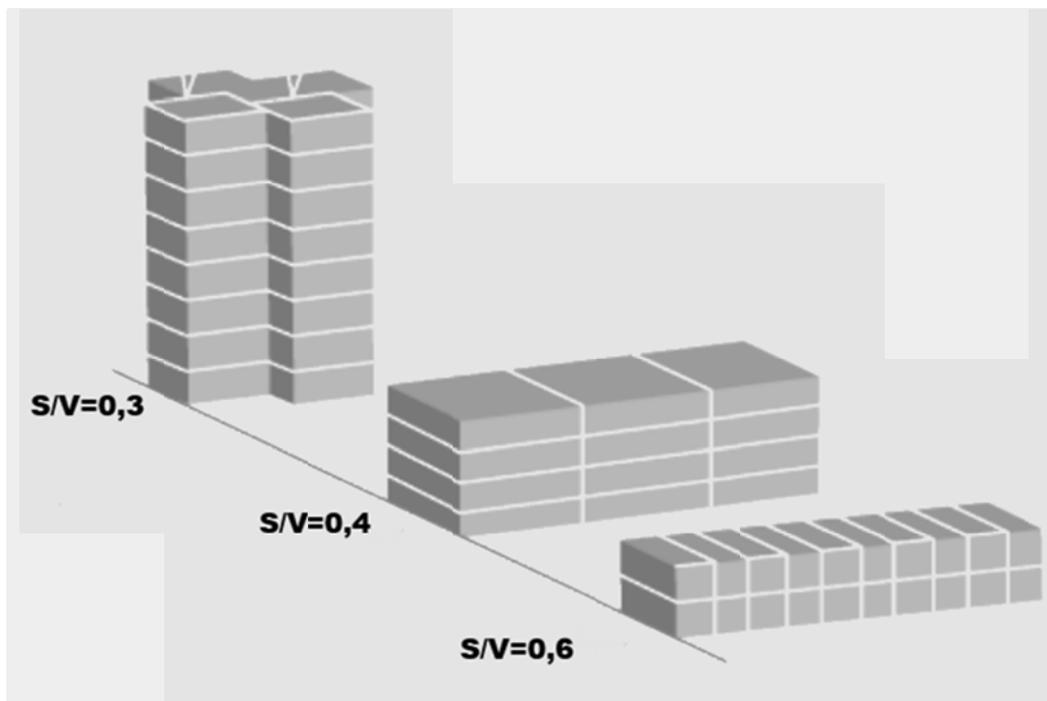


figura 27. Esempio di fattore di forma per tipologie di edifici differenti

⁸In questa trattazione, se non specificato, diversamente, con il simbolo GG ci si riferisce ai gradi giorno calcolati a partire dalla temperatura media mensile della temperatura giornaliera esterna, riportata dalla Norma UNI 10349

Riprendiamo l'equazione (4) precedentemente definita, e introduciamo lo stesso fattore normalizzante V ; essendo questo una costante non va evidentemente ad alterare l'insieme delle argomentazioni che hanno portato alla definizione dell'equazione stessa

$$\frac{Q_{H,nd}}{V} = G \left(\frac{Q_{H,tr}}{V} \right) \quad (8)$$

L'equazione appena scritta ci dice che il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento normalizzato (rispetto al volume lordo delle parti di edificio riscaldate V), può essere considerato una funzione dello scambio termico per trasmissione normalizzato.

Per la (7), l'equazione (8) può essere quindi scritta nella forma seguente

$$\frac{Q_{H,nd}}{V} = g \left(H'_T \times \frac{S}{V} \times GG \right) \quad (9)$$

che evidenzia come il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento (per unità di volume), possa essere considerato, per l'insieme dei casi esaminati, una funzione del prodotto tra il coefficiente medio di scambio termico H'_T , il rapporto di forma S/V e i Gradi-Giorno GG .

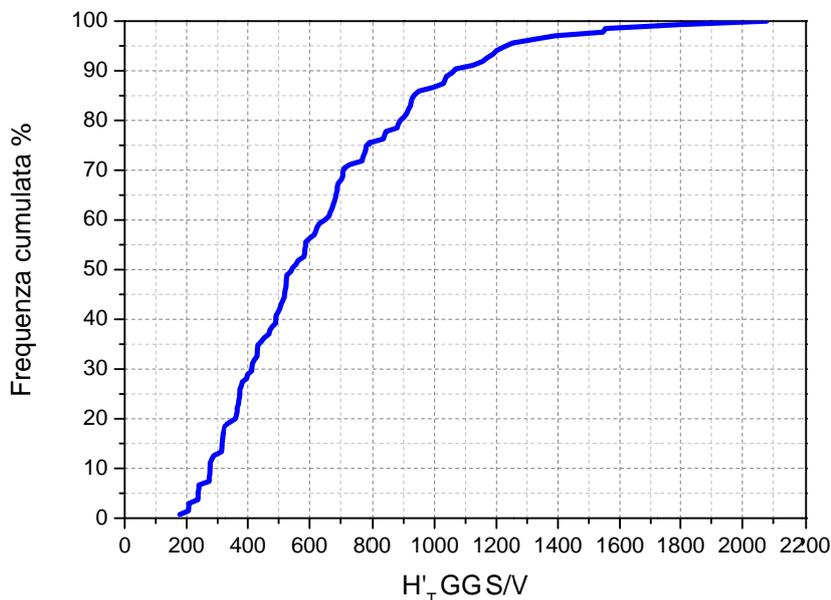


figura 28. Andamento della frequenza cumulata del prodotto $H'_T GG S/V$

Nella figura è proposta la distribuzione della frequenza cumulata del parametro $H'_T \times \frac{S}{V} \times GG$.

Per quanto riguarda i modelli di edifici esaminati, tale parametro è compreso indicativamente tra 180 e 2080 con un valore medio pari a circa 633.

4.4 Sviluppo di algoritmi di regressione per il calcolo del fabbisogno energetico normalizzato

Di seguito è presentata una prima ipotesi di sviluppo della (9), per ciascuno dei tre modelli di edificio analizzati.

FASCIA CLIMATICA	LOCALITÀ	Livello 1		Livello 2		Livello 3		
		$Q_{H,nd}/V$	$H'_T GG S/V$	$Q_{H,nd}/V$	$H'_T GG S/V$	$Q_{H,nd}/V$	$H'_T GG S/V$	
		kWh/m ³	Wd/m ³	kWh/m ³	Wd/m ³	kWh/m ³	Wd/m ³	
EDIFICIO MONOFAMILIARE	REGGIO CALABRIA	7,0	525,6	5,6	461,2	4,5	400,5	
	CROTONE	9,8	626,1	8,0	549,4	6,6	477,0	
	SAPONARA	ME	7,8	550,7	6,3	483,3	5,1	419,7
	LECCE		9,5	643,1	8,4	578,7	6,5	493,9
	CATANZARO		10,7	690,5	9,5	621,4	7,4	530,4
	CALTAGIRONE	CT	11,9	765,8	10,6	689,1	8,2	588,2
	TERNI		13,9	813,9	12,1	740,1	9,4	620,8
	FORLI'		18,7	987,1	16,6	897,6	13,2	752,9
	CASTIGLIONE del LAGO	PG	15,8	879,3	13,9	799,6	10,8	670,7
	ROVIGO		20,4	1069,5	17,9	960,7	14,4	812,0
	AOSTA		24,2	1234,3	21,3	1108,7	17,3	937,1
	CASINA	RE	26,7	1303,1	23,5	1170,5	19,3	989,3
	BELLUNO		22,9	1164,5	19,1	1005,6	15,8	870,1
	CALASCIO	AQ	27,2	1340,0	22,8	1157,1	19,1	1001,2
	SESTRIERE	TO	43,8	1923,3	37,5	1660,8	32,1	1437,0

tabella 26. Edificio Monofamiliare - Le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $H'_T GG S/V$

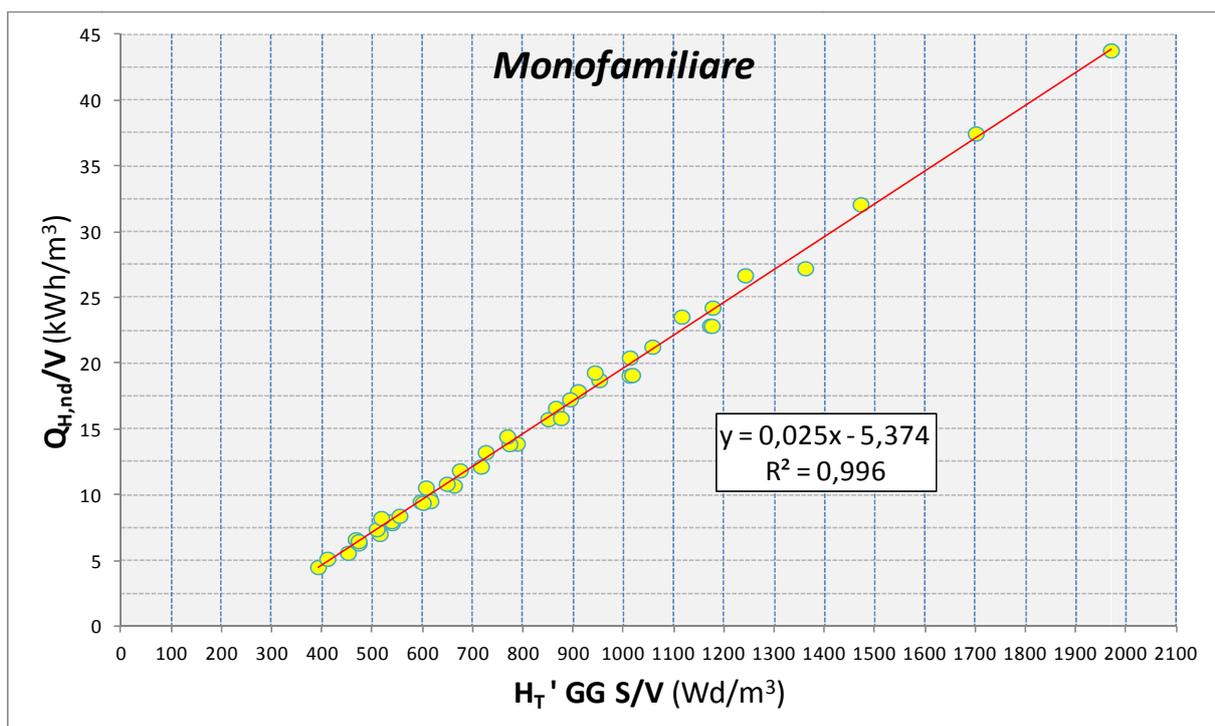


figura 29. Edificio Monofamiliare - Correlazione tra le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $H'_T GG S/V$

FASCIA CLIMATICA	LOCALITÀ	Livello 1		Livello 2		Livello 3	
		$Q_{H,nd}/V$ kWh/m ³	$H'_T GG$ S/V Wd/m ³	$Q_{H,nd}/V$ kWh/m ³	$H'_T GG$ S/V Wd/m ³	$Q_{H,nd}/V$ kWh/m ³	$H'_T GG$ S/V Wd/m ³
B	REGGIO CALABRIA	3,4	391,6	2,4	340,1	1,8	294,7
	CROTONE	5,2	466,5	3,9	405,1	3,0	351,0
	SAPONARA ME	3,9	410,4	2,8	356,3	2,1	308,8
C	LECCE	4,8	474,1	4,1	426,4	2,8	359,9
	CATANZARO	5,5	509,1	4,8	457,8	3,3	386,4
	CALTAGIRONE CT	6,1	564,6	5,3	507,7	3,7	428,5
D	TERNI	8,0	608,2	6,6	547,5	4,8	460,2
	FORLI'	11,7	737,7	10,0	664,0	7,6	558,2
	CASTIGLIONE del LAGO PG	9,3	657,1	7,8	591,5	5,7	497,2
E	ROVIGO	12,9	799,8	10,9	713,0	8,6	604,6
	AOSTA	15,3	923,0	13,0	822,8	10,2	697,8
	CASINA RE	17,5	974,5	15,0	868,7	12,0	736,7
F	BELLUNO	14,3	865,7	11,4	739,0	9,3	646,4
	CALASCIO AQ	17,3	996,2	13,8	850,3	11,3	743,8
	SESTRIERE TO	30,1	1429,8	25,1	1220,4	21,4	1067,5

tabella 27. Piccolo Condominio - Le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $H'_T GG S/V$

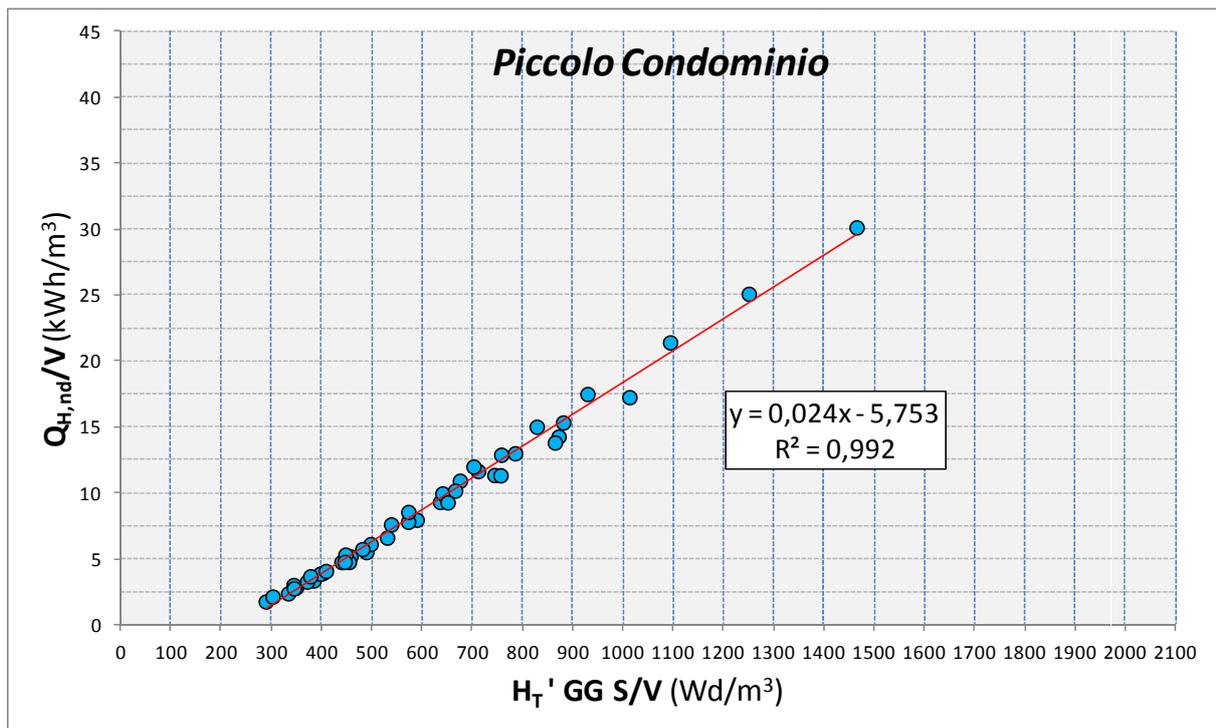


figura 30. Piccolo Condominio - Correlazione tra le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $H'_T GG S/V$

FASCIA CLIMATICA	LOCALITÀ	Livello 1		Livello 2		Livello 3		
		$Q_{H,nd}/V$	$H'_T GG$	$Q_{H,nd}/V$	$H'_T GG$	$Q_{H,nd}/V$	$H'_T GG$	
		kWh/m ³	S/V	kWh/m ³	S/V	kWh/m ³	S/V	
GRANDE CONDOMINIO	REGGIO CALABRIA	2,2	295,5	1,5	256,4	1,1	221,6	
	CROTONE	3,5	352,0	2,5	305,3	1,9	263,9	
	SAPONARA	ME	2,6	309,7	1,8	268,6	1,4	232,2
	LECCE		3,1	356,9	2,7	320,8	1,8	270,2
	CATANZARO		3,7	383,2	3,1	344,4	2,1	290,1
	CALTAGIRONE	CT	4,1	425,0	3,5	382,0	2,4	321,8
	TERNI		5,6	462,1	4,5	413,7	3,3	350,4
	FORLI'		8,4	560,4	7,1	501,8	5,4	424,9
	CASTIGLIONE del LAGO	PG	6,6	499,2	5,4	447,0	4,0	378,5
	ROVIGO		9,4	607,9	7,9	539,9	6,2	461,2
	AOSTA		11,2	701,6	9,4	623,0	7,4	532,3
	CASINA	RE	12,9	740,7	11,0	657,8	8,9	562,0
	BELLUNO		10,3	655,4	8,2	558,0	6,8	492,3
	CALASCIO	AQ	12,5	754,1	9,9	642,1	8,2	566,5
	SESTRIERE	TO	22,7	1082,4	18,9	921,6	16,3	813,0

tabella 28. Grande Condominio - Le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $H'_T GG S/V$

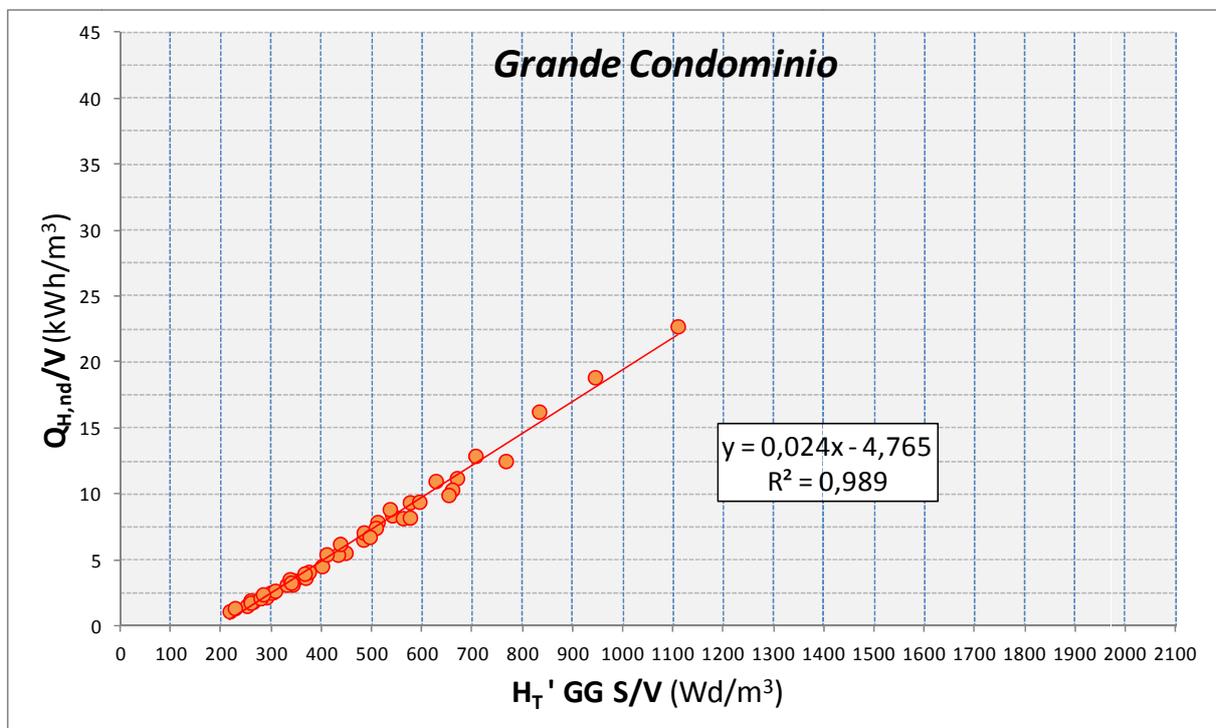


figura 31. Grande Condominio - Correlazione tra le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $H'_T GG S/V$

I grafici riportati mostrano che, per ognuna delle tipologie di edificio studiate, la funzione (9), può essere descritta dall'equazione di una retta, la cui pendenza risulta poco dipendente dal tipo di edificio analizzato. Questo rappresenta un importante risultato perché, se il coefficiente angolare rimane praticamente costante al variare del modello, è possibile sviluppare la (9) in maniera indipendente dalla tipologia di edificio, e quindi proporre un'unica rappresentazione per la totalità dei modelli esaminati.

Introduciamo, per semplicità di trattazione il coefficiente

$$\xi = H'_T \times \frac{S}{V} \quad (10)$$

che chiameremo **fattore di dispersione per unità di volume dell'involucro edilizio**⁹.

Questo caratterizza ciascun modello dal punto di vista della dispersione termica; edifici con forma e coefficiente medio globale di scambio termico differenti possono avere il medesimo fattore di dispersione

L'introduzione di tale coefficiente consente di riscrivere la (9) in una forma più compatta, dalla quale partire per l'analisi di correlazione.

$$\frac{Q_{H,nd}}{V} = g(GG \times \xi) \quad (11)$$

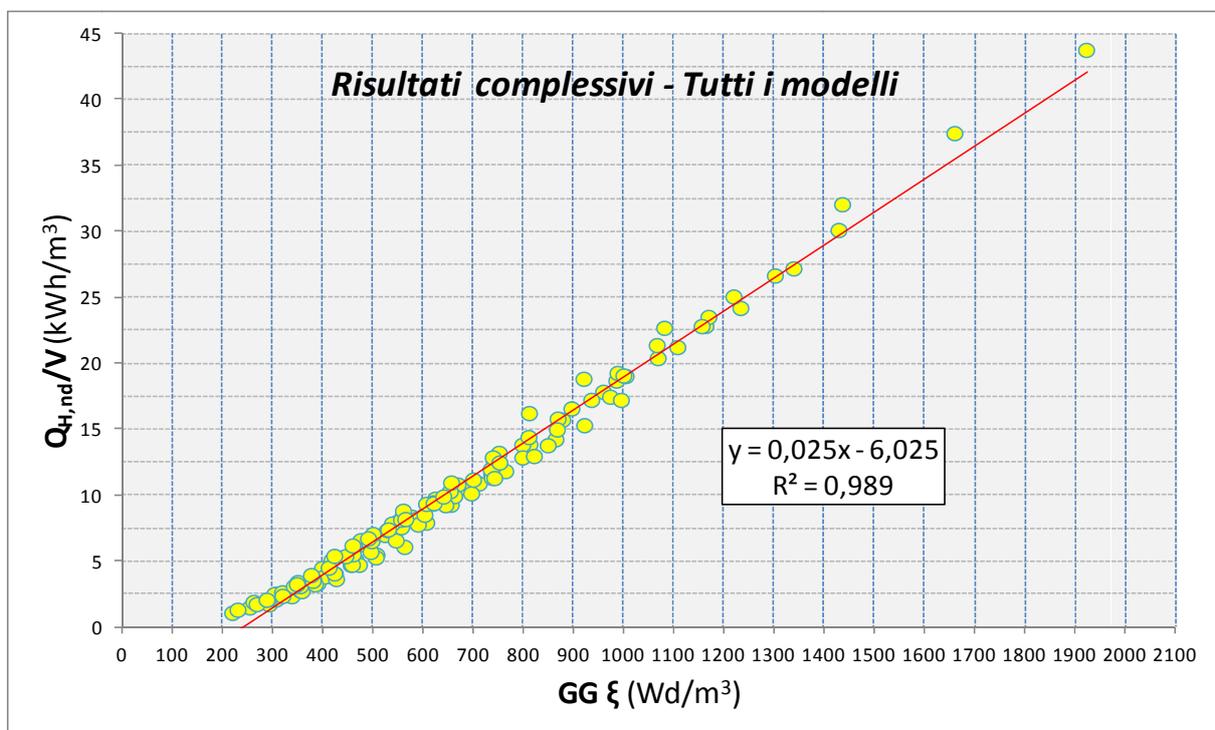


figura 32. Tutti i modelli - Correlazione tra le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $GG \xi$

⁹ Tale fattore ha le stesse dimensioni del *coefficiente di dispersione volumico di progetto* C_d (W/m^3K), ma ne differisce nella definizione (vedi Norma UNI 10379/94 Appendice E), infatti caratterizza il grado di isolamento dell'involucro edilizio a partire dai soli dati geometrici e di trasmittanza.

Quello mostrato nel grafico di figura 32 è sicuramente il risultato più importante delle simulazioni effettuate e si può riassumere in questa forma:

"nell'insieme analizzato, il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ è, dal punto di vista numerico, indipendente dalla tipologia di edificio esaminato ma dipende dal prodotto tra i Gradi-Giorno GG della località esaminata e il fattore di dispersione per unità di volume dell'involucro edilizio ξ che caratterizza ciascun modello dal punto di vista delle perdite per trasmissione".

In termini analitici, quanto detto, può essere sintetizzato attraverso l'equazione della retta di regressione trovata:

$$\frac{Q_{H,nd}}{V} = 0,025 \times GG \times \xi - 6,025 \quad (12)$$

Tale semplice relazione consente di definire una metodologia di calcolo speditiva per stimare, attraverso pochi parametri, il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento invernale, valutato secondo la metodologia standardizzata prevista dalla normativa italiana sulla certificazione energetica degli edifici (D.Lgs. 19/08/2005 n.192 e successive modifiche ed integrazioni).

Bisogna osservare che la relazione (12) può essere utilizzata in condizioni di calcolo differenti da quelle realizzate, fermo restando che, avendo studiato un range di variabilità del coefficiente medio globale di scambio termico H'_T compreso tra 0,3 e 0,72 (W/m²K), per valori al di fuori di questo intervallo, la stima potrebbe risultare inadeguata.

Questo è vero soprattutto per valori di H'_T minori dell'estremo inferiore dell'intervallo considerato, perché in questi casi potrebbe risultare non più verificata la condizione per cui la componente principale del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$ è costituita dallo scambio di energia termica per trasmissione $Q_{H,tr}$.

5 Definizione di una relazione semplificata per la stima del fabbisogno ideale normalizzato

5.1 Sviluppo di un algoritmo di regressione basato sui Gradi-Giorno del DPR 412/93

Riassumiamo quanto fatto fino ad ora. A partire da tre diverse tipologie di edifici sono state eseguite delle simulazioni numeriche per la valutazione del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$, attraverso un codice di calcolo stazionario, considerando diverse configurazioni di involucro edilizio e diverse località di riferimento rappresentative del clima italiano. Elaborazioni successive sui risultati delle analisi realizzate hanno portato a concludere che in pratica, nell'insieme di modelli in esame, il fabbisogno $Q_{H,nd}$ non dipende dal tipo di edificio esaminato (monofamiliare, piccolo condominio e grande condominio), ma dipende dal prodotto tra un coefficiente ξ (definito come fattore di dispersione per unità di volume dell'involucro edilizio), che caratterizza ciascun modello dal punto di vista delle perdite per trasmissione, e i Gradi-Giorno GG , calcolati a partire dalla media mensile della temperatura giornaliera esterna (Norma UNI 10349).

Il coefficiente di dispersione può essere valutato in maniera analitica, una volta note le dimensioni e le proprietà termofisiche dei componenti dell'involucro edilizio che si sta analizzando, e quindi si tratta di una caratteristica intrinseca del modello; i Gradi-Giorno invece dipendono dalla località in cui si va a collocare il modello stesso.

Per rendere più speditiva la metodologia di calcolo fornita, nell'equazione (11) si può sostituire ai Gradi-Giorno calcolati quelli tabellati definiti dal DPR 412/93, che come visto in precedenza (figura 11) risultano avere un'ottima correlazione lineare con i primi.

La relazione (11) modificata assume pertanto la seguente forma:

$$\frac{Q_{H,nd}}{V} = h(GG_{DPR412} \times \xi) \quad (13)$$

Per lo sviluppo dell'algoritmo di regressione con cui descrivere tale funzione si ripercorre quanto fatto nel capitolo precedente, partendo dai dati relativi al fabbisogno per unità di volume e dai nuovi valori del prodotto tra i Gradi-Giorno (DPR 412) e il fattore di dispersione per unità di volume .

FASCIA CLIMATICA	LOCALITÀ	Livello 1		Livello 2		Livello 3		
		$Q_{H,nd}/V$ kWh/m ³	ξGG_{DPR412} Wd/m ³	$Q_{H,nd}/V$ kWh/m ³	ξGG_{DPR412} Wd/m ³	$Q_{H,nd}/V$ kWh/m ³	ξGG_{DPR412} Wd/m ³	
EDIFICIO MONOFAMILIARE	B	REGGIO CALABRIA	2,2	421,4	1,5	369,8	1,1	321,1
		CROTONE	3,5	490,7	2,5	430,6	1,9	373,9
		SAPONARA ME	2,6	491,2	1,8	431,1	1,4	374,3
	C	LECCE	3,1	563,4	2,7	507,1	1,8	432,8
		CATANZARO	3,7	649,0	3,1	584,0	2,1	498,4
		CALTAGIRONE CT	4,1	683,7	3,5	615,2	2,4	525,1
	D	TERNI	5,6	729,1	4,5	663,0	3,3	556,1
		FORLI'	8,4	922,2	7,1	838,5	5,4	703,4
		CASTIGLIONE L. PG	6,6	927,5	5,4	843,4	4,0	707,4
	E	ROVIGO	9,4	1028,6	7,9	924,0	6,2	780,9
		AOSTA	11,2	1188,8	9,4	1067,9	7,4	902,5
		CASINA RE	12,9	1251,0	11,0	1123,7	8,9	949,7
F	BELLUNO	10,3	1224,9	8,2	1057,7	6,8	915,2	
	CALASCIO AQ	12,5	1390,3	9,9	1200,6	8,2	1038,8	
	SESTRIERE TO	22,7	2079,0	18,9	1795,3	16,3	1553,4	
PICCOLO CONDOMINIO	B	REGGIO CALABRIA	2,2	314,0	1,5	272,6	1,1	236,3
		CROTONE	3,5	365,6	2,5	317,5	1,9	275,1
		SAPONARA ME	2,6	366,0	1,8	317,8	1,4	275,4
	C	LECCE	3,1	415,4	2,7	373,6	1,8	315,3
		CATANZARO	3,7	478,5	3,1	430,3	2,1	363,2
		CALTAGIRONE CT	4,1	504,1	3,5	453,3	2,4	382,6
	D	TERNI	5,6	544,8	4,5	490,4	3,3	412,3
		FORLI'	8,4	689,1	7,1	620,3	5,4	521,4
		CASTIGLIONE L. PG	6,6	693,1	5,4	623,9	4,0	524,4
	E	ROVIGO	9,4	769,2	7,9	685,7	6,2	581,5
		AOSTA	11,2	889,0	9,4	792,5	7,4	672,1
		CASINA RE	12,9	935,5	11,0	833,9	8,9	707,2
F	BELLUNO	10,3	910,6	8,2	777,3	6,8	679,9	
	CALASCIO AQ	12,5	1033,6	9,9	882,3	8,2	771,7	
	SESTRIERE TO	22,7	1545,6	18,9	1319,3	16,3	1154,0	
GRANDE CONDOMINIO	B	REGGIO CALABRIA	2,2	236,9	1,5	205,5	1,1	177,6
		CROTONE	3,5	275,9	2,5	239,3	1,9	206,9
		SAPONARA ME	2,6	276,2	1,8	239,6	1,4	207,1
	C	LECCE	3,1	312,7	2,7	281,1	1,8	236,7
		CATANZARO	3,7	360,2	3,1	323,7	2,1	272,7
		CALTAGIRONE CT	4,1	379,4	3,5	341,0	2,4	287,3
	D	TERNI	5,6	413,9	4,5	370,6	3,3	313,9
		FORLI'	8,4	523,5	7,1	468,8	5,4	397,0
		CASTIGLIONE L. PG	6,6	526,5	5,4	471,5	4,0	399,3
	E	ROVIGO	9,4	584,7	7,9	519,2	6,2	443,6
		AOSTA	11,2	675,8	9,4	600,1	7,4	512,7
		CASINA RE	12,9	711,1	11,0	631,5	8,9	539,5
F	BELLUNO	10,3	689,4	8,2	587,0	6,8	517,8	
	CALASCIO AQ	12,5	782,5	9,9	666,2	8,2	587,7	
	SESTRIERE TO	22,7	1170,1	18,9	996,3	16,3	878,9	

tabella 28. Tutti i modelli - Le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $GG_{DPR412} \xi$

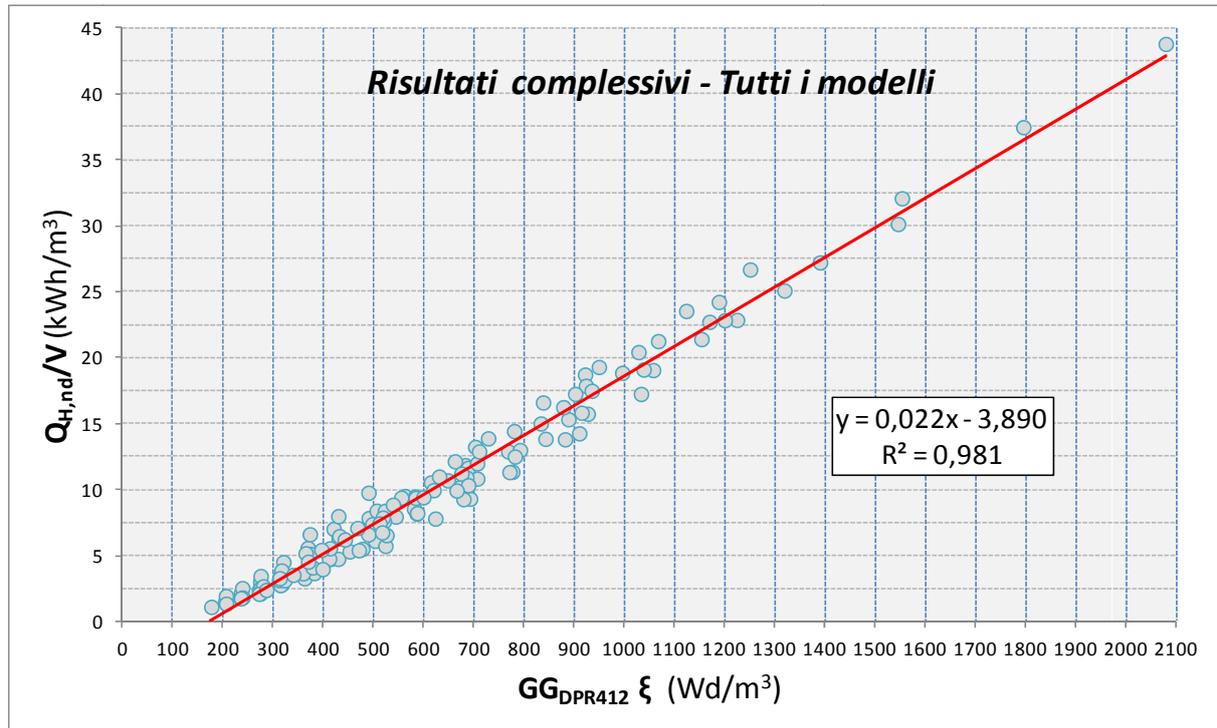


figura 33. Tutti i modelli - Correlazione tra le grandezze $Q_{H,nd}/V$ e $GG_{DPR412} \xi$

La regressione trovata assume la seguente espressione analitica:

$$\frac{Q_{H,nd}}{V} = 0,022 \times GG_{DPR412} \times \xi - 3,890 \quad (14)$$

Si può osservare che la ricerca della soluzione lineare porta ad una leggera riduzione del coefficiente angolare, rispetto alla precedente (caso con i Gradi-Giorno GG calcolati dalla Norma UNI 10349/94), di circa il 10%.

La bontà del fitting resta elevata, la riduzione del coefficiente di determinazione R^2 è infatti inferiore all'1%.

L'algoritmo definito dall'equazione (14), offre un'utile strumento di supporto al legislatore in fase di definizione delle caratteristiche prestazionali dell'involucro edilizio, in quanto consente di verificare rapidamente come le variazioni di tali caratteristiche vadano a modificare il fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento degli edifici.

Nel grafico a seguire, accanto ai risultati della regressione lineare già proposti in figura 33 è riportato anche l'*intervallo di previsione* al 95% definito come la banda di previsione del valore di $\frac{Q_{H,nd}}{V}$ in corrispondenza dei singoli valori del prodotto $GG_{DPR412} \times \xi$, pensato come variabile casuale distribuita in accordo alla distribuzione normale di Gauss, con il 95% di probabilità ($\pm 2\sigma$).

Come si può osservare dalla figura 34, i risultati delle simulazioni effettuate ricadono nella (quasi) totalità dei casi entro la banda di previsione definita.

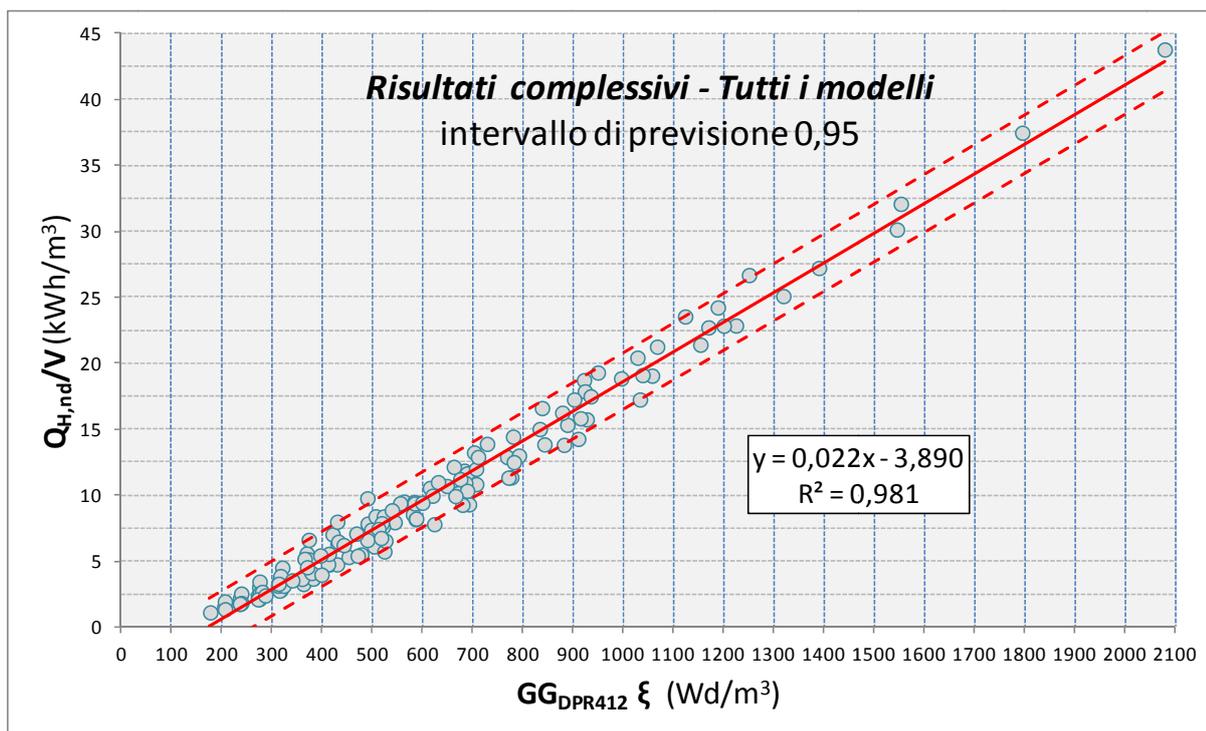


figura 34. Tutti i modelli - Correlazione con intervallo di previsione al 95%

5.2 Un test numerico attraverso edifici di confronto

Per valutare la bontà dell'algorithmo definito dall'equazione (14), abbiamo preso in considerazione due edifici con caratteristiche dimensionali diverse da quelle degli edifici campioni utilizzati; su questi sono state poi effettuate delle simulazioni per la stima del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento $Q_{H,nd}$, mediante lo stesso codice di calcolo stazionario utilizzato nelle precedenti analisi.

Gli edifici Test considerati sono¹⁰:

- Villa singola unifamiliare (*Test 1*);
- Multipiano con 11 unità immobiliari ed 1 ufficio (*Test 2*).

Nella tabella seguente si riportano alcune delle caratteristiche principali di questi edifici.

Caratteristiche termofisiche e dimensionali degli edifici TEST		
	Villa singola	Multipiano
Pavimento (netto) [m ²]	140	788
Volume lordo [m ³]	610	3111
Superficie lorda disperdente totale [m ²]	584	3070
S/V [m ⁻¹]	0,96	0,99
H'_T [W/m ² K]	0,36	0,37

¹⁰ I risultati e le figure presentate sono tratte da valutazioni energetiche dell'ing. Laurent Socal.

tabella 29. Edifici Test - Caratteristiche principali

La Villa singola (figura 35) ha una forma analoga a quella dell'archetipo di riferimento ma presenta una maggiore superficie in pianta e quindi maggior volumetria (+65%) e maggior superficie disperdente (+60%); il rapporto di forma rimane però pressoché costante.

Per quanto riguarda invece l'edificio multipiano, questi si caratterizza per il fatto di avere, rispetto all'edificio campione Piccolo condominio, una forma più articolata e complessa con piante che cambiano in funzione del piano (figura 36). La superficie calpestabile risulta essere superiore del 75% rispetto alla precedente mentre la volumetria è quasi doppia ed è invece tripla la superficie disperdente. Ne consegue un rapporto di forma S/V molto diverso dal precedente, con un valore simile a quello degli edifici tipo monofamiliari.



figura 35. Villa singola - Prospetti

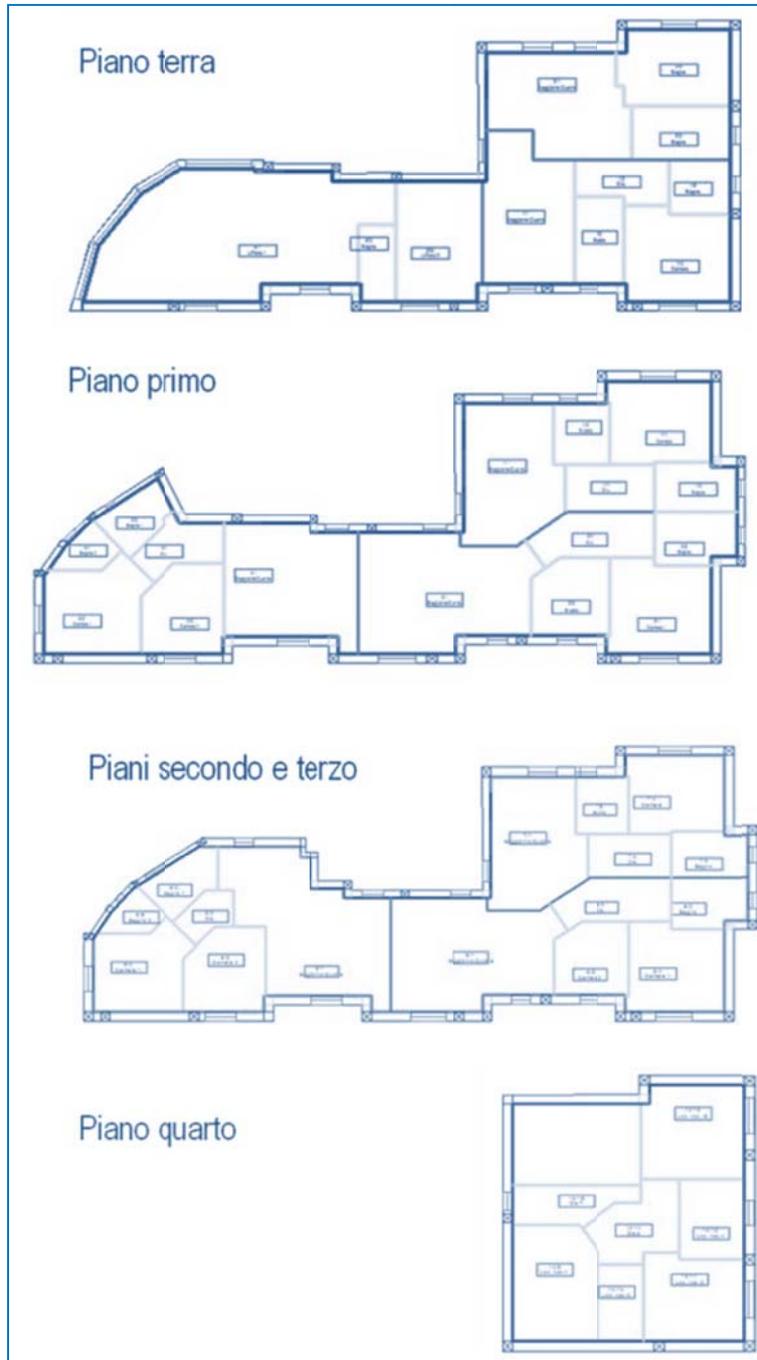


figura 36. Edificio multipiano - Piante

	Località		GG_{DPR412} °C d	V m ³	$Q_{H,nd}$ kWh	$Q_{H,nd}/V$ kWh/m ³	ξGG_{DPR412} Wd/m ³	$(Q_{H,nd}/V)_{\text{algoritmo}}$ kWh/m ³	$\Delta\%$
Test 1	Noventa di Piave	VE	2349	610	10.513	17,2	809	14,3	17,1%
Test 2	Milano		2404	3.111	51.180	16,5	878	15,8	3,7%

tabella 30. Edifici Test - Risultati

Nella tabella 30 sono riportati i risultati principali dei due test realizzati. I valori del fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento per unità di volume, stimati attraverso l'algoritmo di regressione sono statisticamente in linea con quelli forniti dal codice di calcolo; i valori residui sono contenuti mediamente entro il 10%.

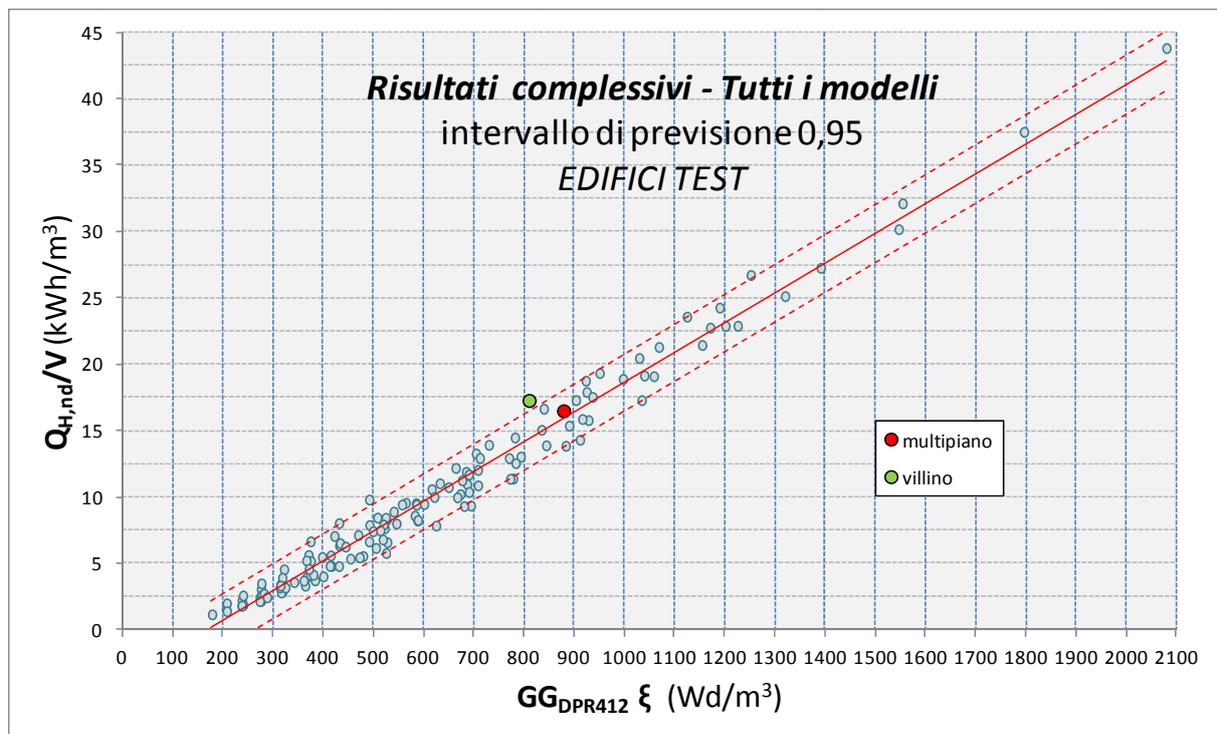


figura 34. Edifici Test - Distribuzione dei risultati nell'intervallo di previsione

5.3 Un esempio di applicazione

Pur in presenza di un buon adattamento della regressione lineare descritto in precedenza, è possibile, da un punto di vista operativo, raffinare la relazione di "fitting" individuata per migliorare ulteriormente l'utilizzo del modello adottato a scopo previsionale.

La retta di regressione, ottenuta mediante ottimizzazione ai minimi quadrati, minimizza i quadrati delle distanze residue di tutti i dati esaminati, e fornisce quindi la miglior stima per la variabile prevista, considerando tutto il range di variazione delle variabili esplicative.

E' possibile tuttavia che, a parità di incertezze prevista $\pm 2\sigma$, per determinati valori di $GG_{DPR412} \times \xi$, la stima del fabbisogno sia affetta da un errore percentualmente piuttosto elevato.

Questo è ciò che accade ad esempio per valori di $GG_{DPR412} \times \xi < 700$, range in cui, in base a quanto mostrato nella fig. 28 (distribuzione della frequenza cumulata), si concentra quasi il 70% del campione osservato.

A tal fine può essere allora utile adottare una relazione di fitting diversa da quella lineare, tale da ridurre i valori residui in uno specifico range di interesse.

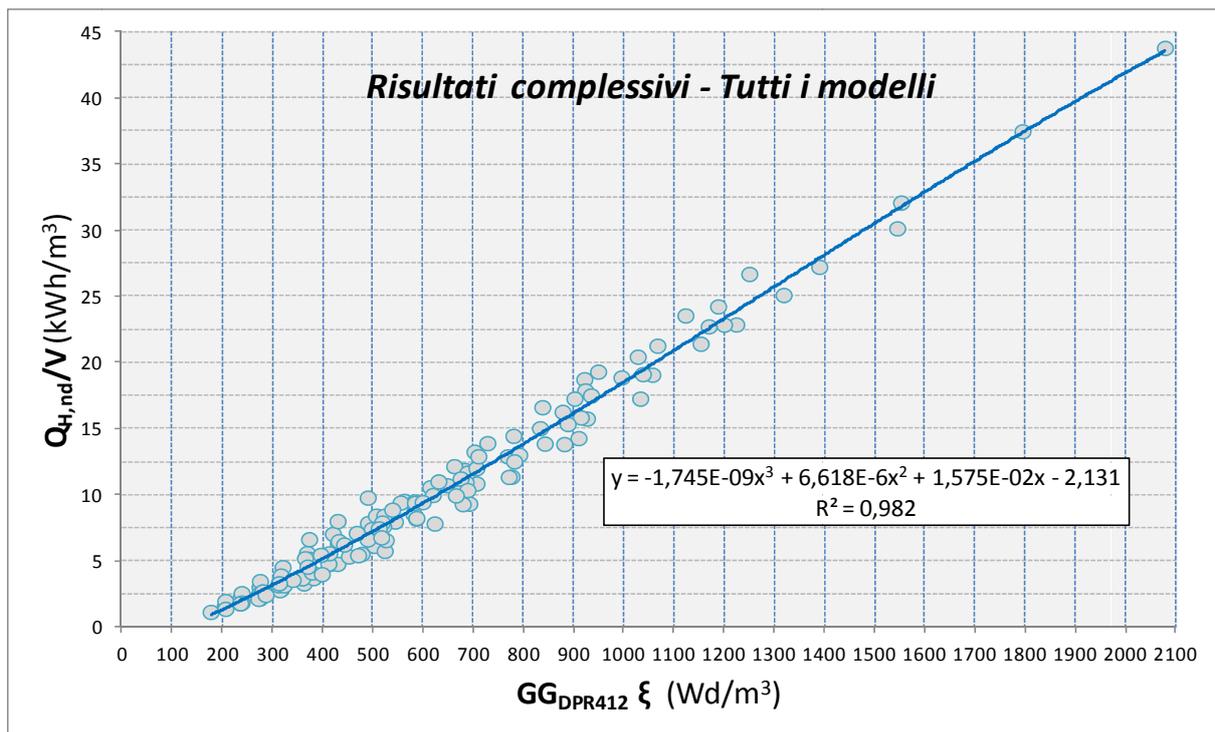


figura 35. Tutti i modelli - Regressione cubica

la fig. 35 mostra la regressione ottenuta, ad esempio, con una curva polinomiale di terzo grado, che pur mantenendo valori di R^2 simili al modello lineare, consente di avere valori residui percentualmente più bassi per valori di $GG_{DPR412} \times \xi < 1000$ (frequenza cumulata del campione pari a circa 87%).

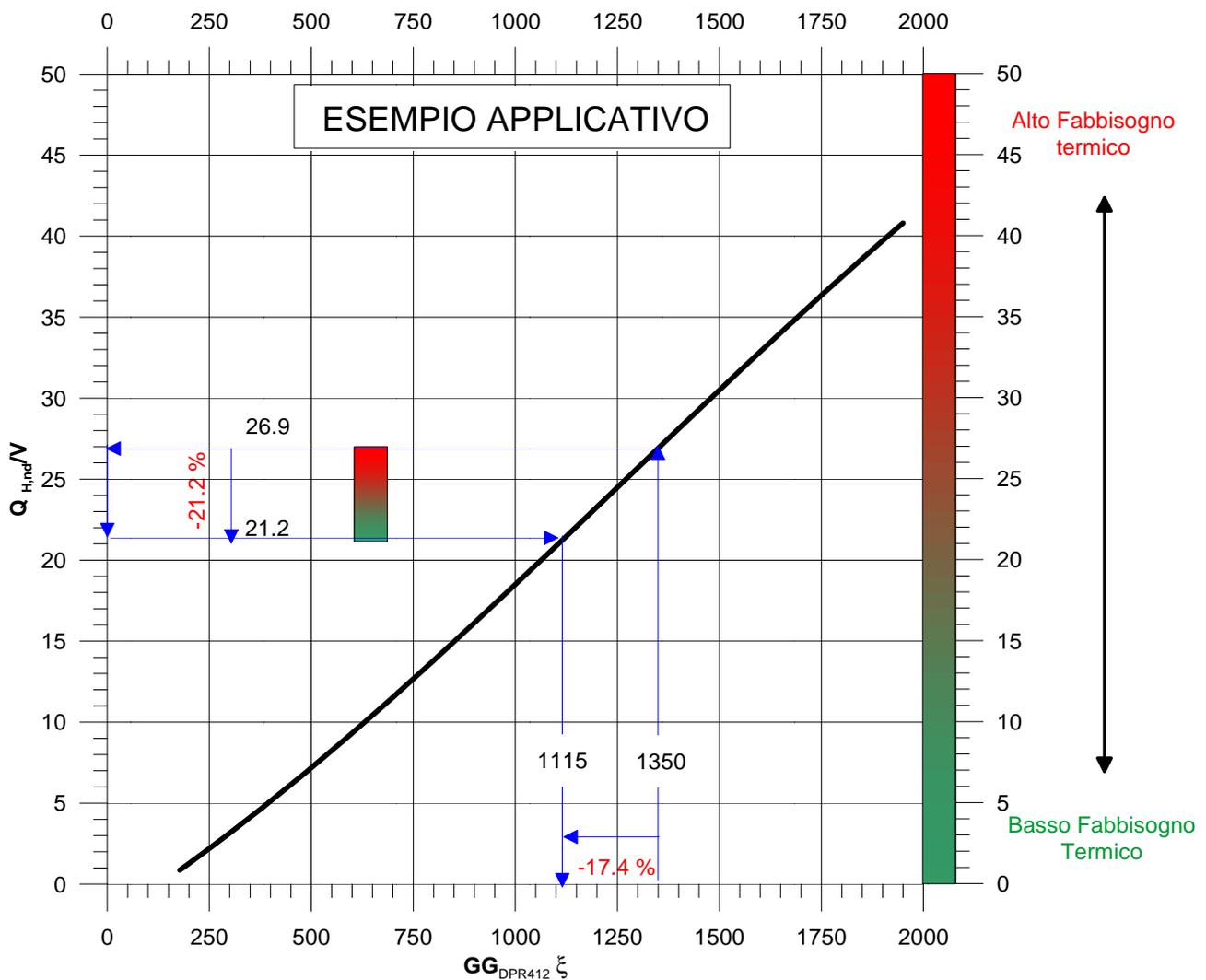


figura 36. Tutti i modelli - Un esempio applicativo

Il grafico mostrato sopra mostra un utile impiego della relazione individuata.

L'equazione 13, per quanto visto in precedenza, rappresenta uno strumento di previsione del fabbisogno energetico normalizzato di un edificio, in quanto consente di stimarne il valore entro una certa banda di previsione.

La curva di regressione individuata permette tuttavia di valutare con minore incertezza anche le variazioni relative tra le grandezze considerate: cioè quale variazione percentuale è lecito aspettarsi in termini di fabbisogno, in funzione delle variazioni di GG_{DPR412} o di ξ .

La pendenza della curva di regressione infatti è indicativa di un trend di variazione che consente di calcolare le riduzioni o gli incrementi relativi, tra le variabili in gioco.

Ad esempio, come si può osservare in figura 36, ad una variazione del -17,4% del parametro $GG_{DPR412} \times \xi$ (variazione singola o congiunta delle componenti in gioco), corrisponde una variazione del -21,2% del valore di $\frac{Q_{H,nd}}{V}$.

Questo criterio di stima delle variazioni relative, è valido per i modelli di edificio che si trovano nella banda di previsione e anche ragionevolmente per quelli al di fuori, per i quali pur essendoci margini di incertezza

superiori a quelli previsti ($\pm 2\sigma$) sulla stima del valore assoluto del fabbisogno, è legittimo ipotizzare variazioni percentuali che seguano lo stesso trend.

6 Conclusioni

Nei precedenti capitoli è stato descritto un metodo semplificato, basato su modelli di regressione, che consente di stimare il fabbisogno energetico normalizzato di un edificio.

In particolare, considerando 3 diverse tipologie edilizie (con 3 livelli di isolamento), e 15 località rappresentative del clima italiano, è stato calcolato il fabbisogno energetico per il riscaldamento con metodo stazionario (UNI TS 11300) e ne è stata analizzata la correlazione in funzione dei gradi giorno del sito (GG) e di un parametro caratteristico dell'involucro edilizio ξ , che rappresenta sostanzialmente il fattore di dispersione per unità di volume dell'edificio.

L'analisi delle curve di regressione, elaborate prima per le singole tipologie edilizie e successivamente su tutto il campione considerato (135 configurazioni), ha dimostrato un buon adattamento del modello lineare, ottenuto mediante ottimizzazione ai minimi quadrati.

Successivamente un test numerico su 2 edifici differenti da quelli considerati nel campione iniziale, ha confermato la validità del modello per la stima del fabbisogno energetico, entro la banda di previsione al 95%.

Da un punto di vista operativo, è stato inoltre considerato, l'utilizzo di un modello di *fitting* diverso da quello lineare, al fine di minimizzare gli scarti e raffinare ulteriormente le stime entro specifici *range* delle variabili esplicative.

E' stato altresì evidenziato come l'analisi delle curve di regressione consente di individuare quale sia il trend di variazione del fabbisogno energetico in funzione dei parametri GG e ξ ; in questo modo è possibile utilizzare il modello descritto, non solo a scopo previsionale, ma anche per valutare le variazioni relative di

$\frac{Q_{H,nd}}{V}$ a seguito di variazioni dei parametri di calcolo.

Il modello descritto costituisce quindi un utile strumento di valutazione per il legislatore nella fase di definizione dei requisiti minimi per le prestazioni energetiche degli edifici. L'impiego di questo metodo semplificato, permette, infatti, di stimare rapidamente, come le variazioni dei suddetti requisiti, influenzano la domanda energetica dell'edificio e ne determinano la classificazione.

Possibile sviluppo del lavoro svolto, potrà essere l'analisi di modelli di regressione anche per edifici con caratteristiche diverse da quelle considerate, quali ad esempio quelli del terziario ad uso ufficio, nonché l'applicazione di tali modelli, anche per la stima del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva.

7 Riferimenti bibliografici

[1] European Directive on Energy Performance of Buildings 2010/31/EU

[2] Italian Standard UNI/TS 11300-1, Energy performance of buildings: Evaluation of energy need for space heating and cooling,-2014

[3] Italian Standard UNI 10349/94 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici, 1994

[4] D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412 Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia

[5] Modern Regression Analysis For Scientists and Engineers Thomas P.Ryan, National Institute of Standards of Technology Gaithersburg, MD 2003

[6] Probability and Statistics for engineers & scientists, Ronald E. Walpole Raymond H. Myers S. L. Myers Keying Ye, 2012

8 Appendice

Analisi della regressione lineare applicata

Cenni di statistica applicata

L'utilizzo di un modello di regressione, consente di evidenziare, se esiste, una relazione funzionale tra due variabili. L'analisi di tale relazione, valuta la bontà del modello adottato (goodness of fit), e fornisce indicazioni sul tipo di "risposta" che una variabile (osservata) fornisce, in funzione delle variazioni di una o più variabili esplicative.

Dopo aver riportato a puro scopo di richiamo alcune basilari definizioni, sicuramente note ai più, vengono di seguito descritte alcune verifiche di tipo statistico, che è importante effettuare per valutare l'attendibilità del modello scelto e la possibilità di utilizzarlo a scopo previsionale. A riguardo, è utile ricordare, che non è corretto ottenere stime al di fuori del campo di variazione delle variabili esplorato: in sostanza non è possibile utilizzare la relazione individuata, per estrapolare valori di stima.

Nei capitoli precedenti, è stata condotta una regressione lineare tra il Fabbisogno energetico ideale di un edificio, normalizzato rispetto al volume, $\frac{Q_{H,ed}}{V}$, e la grandezza $H_T' \times S \times GG$, che rappresenta sostanzialmente l'energia scambiata per trasmissione attraverso l'involucro edilizio.

Adottare un modello di regressione lineare significa esprimere una variabile dipendente Y , nella fattispecie il fabbisogno energetico, mediante una relazione del tipo :

$$Y = aX + b + \varepsilon$$

in cui:

(a, b) sono i coefficienti del modello

X è una variabile (indipendente) detto regressore

ε un valore residuo, (errore di stima) assunto di natura casuale.

La variabile Y viene quindi ad essere scomposta in una componente "spiegata" dal modello, di tipo deterministico, e in una componente aleatoria (ε) che ne costituisce il valore residuo.

Le regressioni sui singoli modelli di edificio, sono state condotte utilizzando il metodo dei minimi quadrati, che permette di stimare i coefficienti del modello lineare, minimizzando la somma dei quadrati delle distanze dei punti osservati Y dalla retta stimata. In base a tale criterio la funzione da minimizzare risulta essere:

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX)^2$$

Le stime dei coefficienti del modello si ottengono pertanto uguagliando a zero:

$$\frac{\partial f(a,b)}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial f(a,b)}{\partial b} = 0$$

Detta Y la variabile "osservata", Y_p la variabile prevista dal modello pari ad $(aX + b)$ e detto ε il valore residuo dato dalla differenza $Y - Y_p$ definiamo:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

Devianza totale, la Somma dei Quadrati degli scarti tra Y e il suo valor medio (SQT); rappresenta la variabilità di Y rispetto al valor medio.

$$\sum_{i=1}^n (Y_{pi} - \bar{Y}_p)^2$$

Devianza della Regressione, la Somma dei Quadrati degli scarti tra Y_p ed il suo valor medio (SQR). E' la Devianza spiegata dalla regressione, ossia la quota di variabilità di Y "spiegata" dal modello lineare.

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{pi})^2$$

Devianza residua: la Somma dei Quadrati degli Errori (SQE); rappresenta la variabilità residua, non "spiegata" dalla regressione.

In caso di **perfetto legame lineare**, tutti i punti osservati giacciono sulla retta di regressione per cui

$$SQR = SQT \text{ ed } SQE = 0.$$

L'adozione di un modello di regressione lineare implica quindi che:

$$DEV_{totale}(Y) = DEV_{spiegata}(Y) + DEV_{residua}(Y)$$

Il coefficiente di determinazione lineare R^2 , è definito come il rapporto tra la Devianza di regressione e la Devianza totale, e costituisce un primo indicatore della bontà di adattamento (goodness of fit) del modello lineare utilizzato.

$$R^2 = \frac{\text{Devianza spiegata}}{\text{Devianza totale}} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{pi} - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{Dev(\varepsilon)}{Dev\ totale} = 1 - \frac{SQE}{SQT}$$

R^2 può assumere valori compresi tra 0 e 1 ed in particolare sarà pari a:

- 1 nel caso in cui ci sia perfetta dipendenza lineare tra le variabili,
- 0 nel caso di totale indipendenza

Come descritto in seguito, il solo indicatore R^2 non è di per se esaustivo e per una migliore analisi del modello adottato sarà necessario verificare se la distribuzione dei valori residui rispetta determinate assunzioni, nonché la significatività statistica delle variabili esplicative utilizzate.

Analisi della regressione effettuata

Prendendo a titolo d'esempio in esame, la regressione condotta sull'insieme delle varie configurazioni di edifici, $Q_{H,nd}$ e $H_T' \times S \times GG$ (135 osservazioni), è possibile dunque analizzare la validità del modello adottato, valutando in primis il coefficiente di Determinazione lineare R^2 , e in seguito, supportare l'analisi con ulteriori verifiche di carattere statistico.

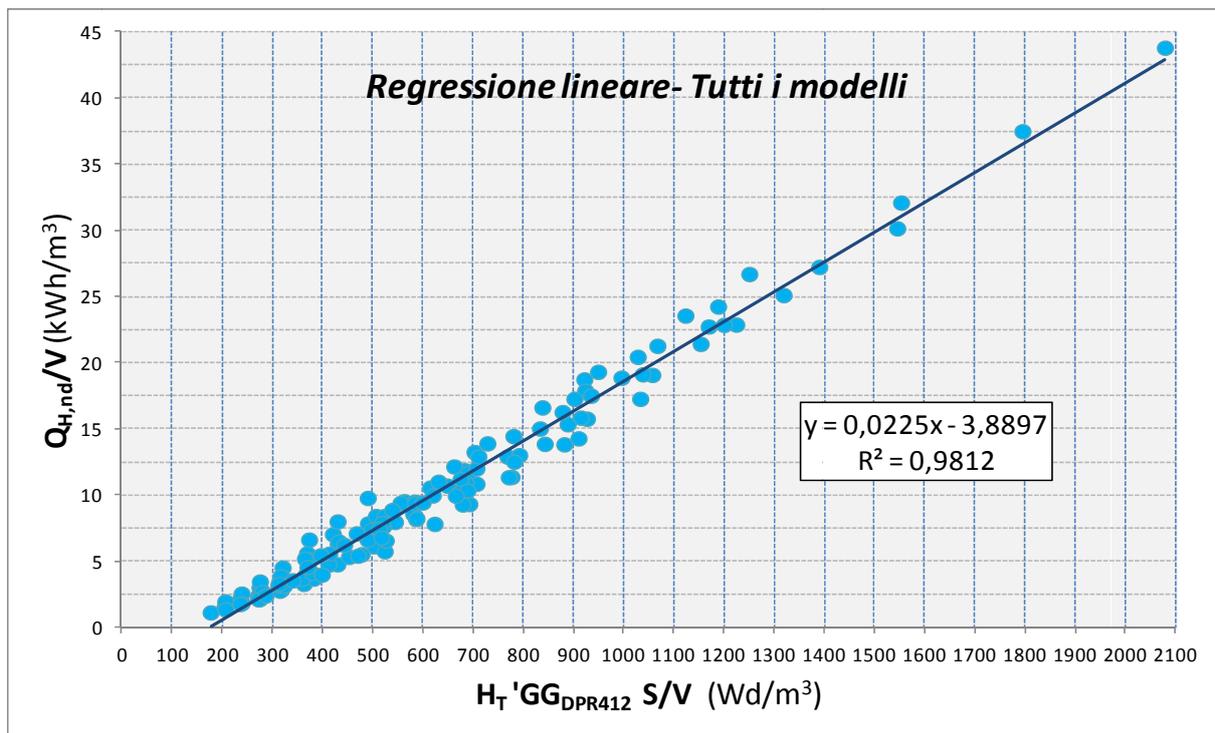


figura A1. Tutti i modelli - Regressione lineare

Un coefficiente di determinazione pari a 0,98 equivale a dire che la devianza di Y (variabile dipendente) è spiegata al **98% dal modello lineare adottato**, e al 2% dalla componente degli errori (valori residui) distribuita casualmente. L'elevato valore del coefficiente R^2 è segno di buon adattamento del modello lineare, ma come già detto, sono richieste ulteriori verifiche per acquisire sicurezza sulla validità del modello.

Analisi dei residui

Il buon adattamento del modello evidenziato mediante il calcolo del coefficiente di determinazione lineare R^2 non è di per se sufficiente a garantire un'applicazione del modello di tipo inferenziale. A tal fine è necessario infatti verificare ulteriormente le assunzioni alla base del modello di regressione adottato e le proprietà degli stimatori.

In particolare sarà necessario verificare per quanto riguarda i valori residui che essi abbiano:

1. distribuzione normale, centrata su un valor medio zero;

2. omoschedasticità, cioè omogeneità della varianza;
3. indipendenza (assenza di correlazioni o "trend" evidenti)

La verifica della normalità dei valori residui è stata effettuata, in primis, graficamente costruendo il *normality plot*, e successivamente applicando il test di Saphiro-Wilk (S-W).

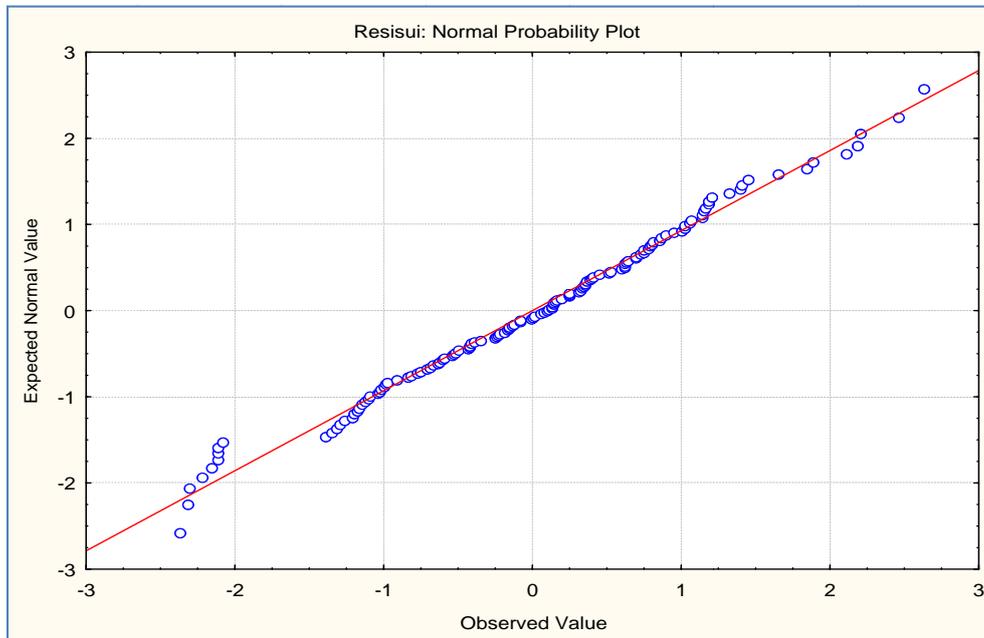


figura A2. Tutti i modelli - Normality Plot

Il *normality plot* mostra l'andamento dei valori residui rispetto a quello dei valori teorici attesi secondo una distribuzione gaussiana. Il buon allineamento dei valori lungo la diagonale, seppur con lievi scostamenti, mostra una buona rispondenza all'ipotesi di normalità. A conferma di quanto evidenziato viene riportato, nel grafico a istogramma seguente il risultato del test S-W.

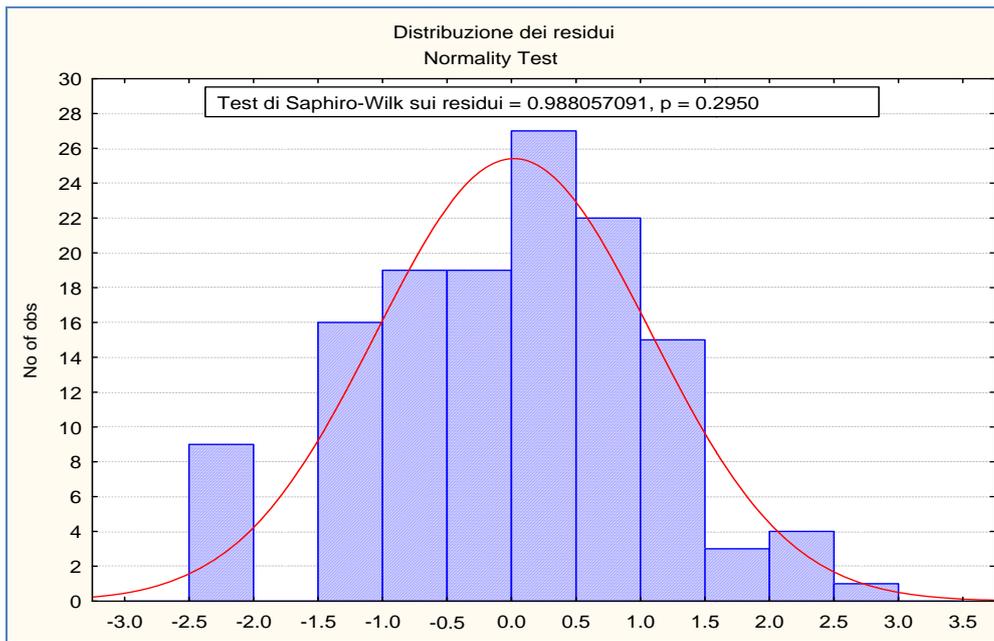


figura A3. Tutti i modelli - Test di normalità dei residui

Il test di Saphiro-Wilk che conduce ad un P-value di 0,295, conferma quanto evidenziato dal *normality plot*, e consente, al livello di significatività di 0,05, di accettare l'ipotesi di normalità della distribuzione esaminata.

L'analisi della dispersione verticale dei residui riportata in Fig. A4, approssimativamente costante, e la distribuzione casuale (centrata intorno al valor medio $\mu=0$) al crescere dei valori teorici stimati con il modello, consente invece di verificare l'omoschedasticità (cioè l'omogeneità delle varianze), nonché l'indipendenza dei residui, senza ricorrere ad ulteriori verifiche analitiche (test di Durbin-Watson).

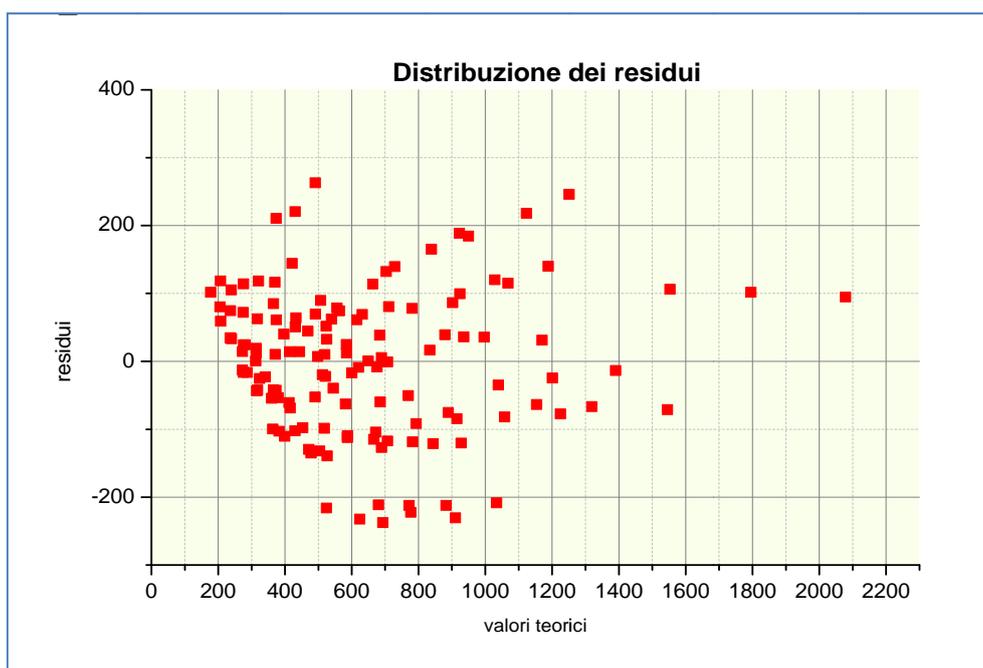


figura A4. Tutti i modelli - Distribuzione dei residui

Riepilogo statistiche della regressione e tabella dei valori residui

<i>Statistica della regressione</i>	
R²	0,981
R² corretto	0,981
Errore standard	1,064
Osservazioni	135

Tabella A1. Tutti i modelli - Riepilogo statistiche della regressione

L'errore standard (deviazione standard dei residui) della stima è una misura della variabilità degli scostamenti dei valori osservati da quelli previsti, e rappresenta anch'esso, un indice di bontà di adattamento della regressione. Tuttavia è preferito più spesso R^2 in quanto indipendente dalle unità di misura delle variabili in esame.

Test di ipotesi sui parametri del modello lineare

Dopo aver avuto conferma delle assunzioni di normalità e omoschedasticità dei valori residui, vengono di seguito riportati i risultati di due test d'ipotesi, effettuati per verificare la significatività dei parametri della regressione stimati.

Test F di Fisher sulla varianza di Regressione (ANOVA)

Il Test F consente di valutare la significatività del parametro a , coefficiente angolare della retta di regressione, esaminando il rapporto tra varianza spiegata dalla regressione e la varianza residua.

La varianza della regressione è data dal rapporto tra la *Devianza spiegata* e i corrispondenti gradi di libertà (gdl=1)

La varianza residua invece è data dal rapporto tra la *Devianza residua* e i corrispondenti gradi di libertà (gdl=n-2=133)

L'ipotesi H_0 è che il coefficiente angolare sia nullo, il che implicherebbe la non significatività del modello lineare. L'alternativa H_1 è ovviamente che il parametro a sia diverso da zero.

In sintesi:

$$H_0: a = 0 \text{ (assenza di linearità)}$$

$$H_1: a \neq 0 \text{ (dipendenza lineare)}$$

	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>
Regressione	1	7846,43	7846,43	6935,97	1,2508E-116
Residuo	133	150,46	1,13		
Totale	134	7996,89			

Tabella A2. Tutti i modelli - Test F di Fisher

Il valore elevato della statistica F ed il corrispondente valore esiguo del P-value (probabilità associata al rifiuto di H_0) riportati in tabella, consentono di respingere l'ipotesi 0 ed accettare quindi la dipendenza lineare

Test T di Student sui parametri del modello

In modo analogo è possibile valutare la significatività dei parametri del modello lineare adottato, (a, b) anche utilizzando il test T di Student, che prende in esame sia il coefficiente angolare che l'intercetta della retta di regressione

Anche in tal caso le ipotesi sono :

$$H_0: a = 0 \text{ (assenza di linearità)}$$

$$H_1: a \neq 0 \text{ (dipendenza lineare)}$$

	Coefficienti	Errore standard	Stat T	P-value
Intercetta b	-3,890	0,194	-20,066	4,63692E-42
Coeff. a	0,022	0,000	83,282	1,2508E-116

Tabella A3. Tutti i modelli - Test T di Student

I valori estremamente esigui del P-value, sostanzialmente quasi nulli, consentono di respingere l'ipotesi H_0 e confermano quindi la significatività dei coefficienti a e b della retta di regressione.

L'analisi dei residui ed i test d'ipotesi effettuati confermano il buon adattamento del modello adottato e la significatività dei parametri di regressione. Ciò, come detto in precedenza, consente di utilizzare la relazione lineare come strumento di stima e previsione del fabbisogno energetico di un edificio, nonché di valutarne le variazioni percentuali in funzione delle variabili utilizzate nel modello, $GG, H'_T, S/V$.

Si riporta di seguito la tabella riepilogativa dei valori della variabile Y osservata, quella prevista, e dei valori residui

Riepilogo									
<i>n</i>	<i>Y osservata</i> <i>Q_{nd}</i>	<i>Y prevista</i> <i>(ax+b)</i>	<i>Residui</i>	<i>Residui</i> <i>standard</i>	<i>n</i>	<i>Y osservata</i> <i>Q_{nd}</i>	<i>Y prevista</i> <i>(ax+b)</i>	<i>Residui</i>	<i>Residui</i> <i>standard</i>
1	7.024	5.580	1.443	1.362	47	5.177	4.327	0.850	0.802
2	9.768	7.138	2.630	2.482	48	3.917	4.336	-0.420	-0.396
3	7.847	7.151	0.696	0.657	49	4.759	5.447	-0.687	-0.649
4	9.517	8.773	0.744	0.702	50	5.512	6.864	-1.351	-1.275
5	10.702	10.695	0.006	0.006	51	6.119	7.438	-1.319	-1.245
6	11.859	11.475	0.384	0.363	52	7.958	8.355	-0.397	-0.375
7	13.891	12.496	1.395	1.317	53	11.654	11.598	0.056	0.052
8	18.724	16.835	1.888	1.782	54	9.312	11.687	-2.375	-2.242
9	15.750	16.955	-1.204	-1.137	55	12.894	13.398	-0.505	-0.476
10	20.429	19.228	1.201	1.134	56	15.337	16.090	-0.753	-0.711
11	24.228	22.827	1.401	1.322	57	17.496	17.135	0.361	0.340
12	26.686	24.224	2.462	2.324	58	14.270	16.576	-2.306	-2.176
13	22.863	23.638	-0.776	-0.732	59	17.256	19.340	-2.084	-1.967
14	27.223	27.356	-0.133	-0.126	60	30.135	30.847	-0.712	-0.672
15	43.783	42.835	0.948	0.895	61	2.382	2.237	0.145	0.137
16	5.586	4.420	1.165	1.100	62	3.872	3.245	0.626	0.591
17	7.992	5.787	2.205	2.081	63	2.833	3.253	-0.420	-0.397
18	6.306	5.798	0.508	0.479	64	4.079	4.506	-0.427	-0.403
19	8.403	7.506	0.897	0.846	65	4.757	5.780	-1.023	-0.965
20	9.485	9.236	0.249	0.235	66	5.319	6.297	-0.978	-0.923
21	10.550	9.937	0.613	0.579	67	6.607	7.132	-0.525	-0.496

22	12.148	11.009	1.138	1.074	68	9.962	10.051	-0.089	-0.084
23	16.608	14.955	1.653	1.560	69	7.807	10.132	-2.324	-2.193
24	13.853	15.064	-1.211	-1.143	70	10.923	11.521	-0.598	-0.564
25	17.874	16.876	0.998	0.942	71	13.004	13.921	-0.918	-0.866
26	21.260	20.110	1.151	1.086	72	15.017	14.852	0.164	0.155
27	23.546	21.364	2.181	2.059	73	11.356	13.579	-2.223	-2.098
28	19.064	19.881	-0.817	-0.771	74	13.818	15.938	-2.120	-2.001
29	22.847	23.092	-0.245	-0.231	75	25.093	25.760	-0.668	-0.630
30	37.474	36.457	1.017	0.960	76	1.767	1.420	0.347	0.327
31	4.509	3.326	1.183	1.116	77	3.014	2.294	0.720	0.680
32	6.619	4.513	2.106	1.987	78	2.137	2.301	-0.164	-0.154
33	5.135	4.523	0.612	0.578	79	2.762	3.197	-0.434	-0.410
34	6.476	5.836	0.640	0.604	80	3.276	4.272	-0.996	-0.940
35	7.385	7.312	0.073	0.069	81	3.678	4.709	-1.030	-0.972
36	8.235	7.911	0.324	0.306	82	4.768	5.375	-0.607	-0.573
37	9.393	8.608	0.785	0.741	83	7.606	7.829	-0.223	-0.210
38	13.241	11.918	1.323	1.249	84	5.737	7.897	-2.160	-2.038
39	10.836	12.009	-1.172	-1.106	85	8.552	9.179	-0.627	-0.592
40	14.441	13.661	0.781	0.737	86	10.173	11.214	-1.041	-0.983
41	17.258	16.394	0.865	0.816	87	11.996	12.004	-0.007	-0.007
42	19.298	17.454	1.844	1.740	88	9.277	11.390	-2.114	-1.995
43	15.834	16.678	-0.844	-0.797	89	11.333	13.454	-2.121	-2.002
44	19.107	19.456	-0.349	-0.330	90	21.410	22.046	-0.636	-0.600
45	32.083	31.021	1.062	1.003	91	2.183	1.435	0.748	0.706
46	3.358	3.166	0.192	0.181	92	3.453	2.311	1.142	1.078
<i>n</i>	<i>Y osservata</i> <i>Q_{nd}</i>	<i>Y prevista</i> <i>(ax+b)</i>	<i>Residui</i>	<i>Residui</i> <i>standard</i>	<i>n</i>	<i>Y osservata</i> <i>Q_{nd}</i>	<i>Y prevista</i> <i>(ax+b)</i>	<i>Residui</i>	<i>Residui</i> <i>standard</i>
93	2.564	2.318	0.246	0.232	115	7.880	7.780	0.101	0.095
94	3.143	3.138	0.005	0.005	116	9.427	9.597	-0.170	-0.161
95	3.660	4.204	-0.545	-0.514	117	10.992	10.302	0.691	0.652
96	4.105	4.637	-0.533	-0.503	118	8.180	9.302	-1.122	-1.059
97	5.555	5.413	0.143	0.135	119	9.935	11.083	-1.149	-1.084
98	8.393	7.876	0.517	0.488	120	18.857	18.501	0.356	0.336
99	6.551	7.944	-1.392	-1.314	121	1.120	0.103	1.017	0.960
100	9.376	9.251	0.125	0.118	122	1.945	0.759	1.186	1.119
101	11.214	11.297	-0.084	-0.079	123	1.356	0.764	0.592	0.558
102	12.898	12.091	0.807	0.761	124	1.775	1.431	0.344	0.325
103	10.336	11.603	-1.267	-1.195	125	2.110	2.239	-0.128	-0.121
104	12.510	13.695	-1.185	-1.118	126	2.403	2.566	-0.163	-0.154
105	22.719	22.406	0.313	0.295	127	3.289	3.164	0.125	0.118
106	1.532	0.729	0.803	0.758	128	5.434	5.032	0.402	0.379
107	2.542	1.489	1.053	0.994	129	3.980	5.083	-1.104	-1.041
108	1.829	1.495	0.334	0.315	130	6.222	6.080	0.142	0.134
109	2.672	2.427	0.245	0.231	131	7.437	7.632	-0.195	-0.184
110	3.133	3.386	-0.252	-0.238	132	8.857	8.235	0.622	0.587
111	3.546	3.775	-0.229	-0.216	133	6.761	7.747	-0.987	-0.931
112	4.543	4.440	0.104	0.098	134	8.225	9.319	-1.094	-1.032
113	7.091	6.645	0.445	0.420	135	16.254	15.862	0.392	0.370
114	5.410	6.706	-1.296	-1.223					

Tabella A4. Tutti i modelli - tabella riepilogativa