

Politecnico di Milano
Scuola di Ingegneria Edile-Architettura
Corso di Studio in Ingegneria dei Sistemi Edilizi



ANALISI E PROGETTO DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI SCOLASTICI

Relatore: Prof. Ing. Enrico De Angelis

Correlatore: Ing. Giorgio Pansa

Autore: Andrea Preziosa

Matricola: 799676

Anno accademico: 2013-2014

Sommario

Il presente studio s'inserisce nell'ambito della valutazione energetica degli edifici scolastici. In particolare l'obiettivo è la definizione delle migliori configurazioni d'involucro e impiantistiche per la riduzione dei consumi di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione di un'aula scolastica e miglioramento del comfort termico. L'analisi prevede il confronto dei risultati ottenuti dai metodi stazionari suggeriti dalle norme con quelli derivanti dai metodi dinamici proposti dai software.

La prima fase consiste nell'analisi del parco edilizio scolastico. Nonostante si tratti di una tematica di grande attualità sia a livello nazionale sia internazionale, che ha visto la recente pubblicazione di alcune ricerche, non è così immediato tracciare un quadro esaustivo dei consumi energetici di questi edifici. Questo è dovuto al fatto che le informazioni provengono da studi frammentati o da ricerche promosse a livello locale con obiettivi diversi tra loro. L'analisi si è concentrata sugli edifici scolastici presenti in Lombardia, in particolare a quelli della provincia di Milano.

La seconda fase del lavoro prevede lo studio delle normative esistenti per il calcolo di due aspetti che spesso vengono trascurati nelle analisi energetiche. Si tratta del calcolo del fabbisogno energetico per illuminare gli ambienti e della temperatura interna nei locali in estate in assenza di climatizzazione. In particolare in questa fase è stata svolta anche una ricerca dei software in grado di calcolare questi output. Tra i tanti si è deciso di utilizzare Comfen, programma che consente il calcolo dei fabbisogni e della temperatura interna dei locali. Per capire quanto i risultati delle normative si scostano dai valori ricavati dal software, si sono eseguiti degli esempi comparativi.

L'ultima fase invece prevede la modellazione di un'aula scolastica per mezzo del software Comfen. Per ottimizzare i consumi energetici e il comfort interno sono stati fatti variare una serie di parametri in termini di componenti d'involucro e impianti, arrivando così a coprire un elevato numero di casistiche. Si arriva quindi a definire quali possano essere le migliori strategie da applicare agli edifici scolastici per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche.

Abstract

This study intends to examine the energetic evaluation of school buildings. In particular the major objective is to define the best layout of building envelope and plant system of a classroom in order to reduce the heating, cooling and lighting energy needs, with an improve in energy comfort. The study compares the results obtained from static methods indicated by norm with data from dynamic methods proposed by software.

The first step consists in the examination of the school building complex. Despite the topic is really up to date in the national and international investigations, with recent publication of new studies, unfortunately it's still quite difficult to obtain a complete evaluation of scholastic buildings energy needs. This is because the data derived from fragment studies and local investigations without a common objective. Our analysis focused on the scholastic buildings located in Lombardy region, in particular ones situated in the province of Milan.

During the second step we analyzed the existing regulations on calculation of two aspects that are too often overlooked during the energy analyses: the evaluation of the energy need to light the location up and the calculation of the internal temperature during summer in rooms without air conditioning. In particular in this step we searched for some software which could calculate these output data and we finally decided to use Comfen, a program that allows calculating the energy needs and the internal temperature of the rooms. We also achieved some comparative examples in order to understand how much the results obtained with the software move away from data obtained with existing regulations.

In the last step we used the software Comfen as modelling tool of a classroom. In order to optimize the energy needs and the indoor comfort we changed some parameters of installations and building envelope elements, so that we obtained a high number of case studies. We finally defined the best strategies to apply to the scholastic buildings to optimize their energy performances.

1 Indice

Sommario	I
Abstract	II
1 Indice	III
1.1 Indice delle tabelle	VII
1.2 Indice delle immagini	IX
1.3 Indice dei grafici	IX
2 Introduzione	1
3 Il contesto legislativo	4
4 Il patrimonio scolastico	5
4.1 Banca dati Audit GIS	5
4.1.1 Il campione analizzato	8
4.2 Gli Audit energetici del CEER	12
5 Il fabbisogno energetico per l'illuminazione.	16
5.1 Calcolo del LENI (UNI EN 15193)	19
5.1.1 Il fattore di dipendenza dalla luce diurna F_D	20
5.1.1.1 Individuazione dell'area del compito visivo che beneficia di luce naturale A_D	21
5.1.1.2 Valutazione del fattore di luce diurna D_c	21
5.1.1.3 Valutazione del fattore di incidenza di luce diurna D	24
5.1.1.4 Valutazione del grado di penetrazione della luce diurna	25
5.1.1.5 Valutazione del fattore di disponibilità di luce diurna F_{DS}	25
5.1.1.6 Calcolo del fattore dipendente dal dispositivo di controllo F_{DC}	26
5.1.1.7 Metodo mensile	27

5.1.2	Calcolo del fattore dipendente dall'occupazione F_o	27
5.1.3	Calcolo del fattore di illuminamento costante F_c	29
5.1.4	Valori di riferimento e fattori di progettazione illuminotecnica	29
5.1.5	Valori predefiniti per il tempo operativo annuale $t_o = t_D + t_N$	30
5.2	Confronto tra UNI EN 15193 e ISO 10916	31
5.3	Comfen 5	32
5.4	DIALux 4.12	33
5.5	Confronto tra i risultati delle normative e del software Comfen	34
6	La temperatura interna estiva degli ambienti	40
6.1	UNI 10375: Metodo di calcolo della temperatura interna estiva	42
6.1.1	Calcolo della temperatura interna	42
6.1.1.1	Carico termico dell'ambiente	42
6.1.1.2	Determinazione dei parametri di trasmissione H_T, Y_T	48
6.1.2	Determinazione della temperatura media radiante dell'involucro	49
6.1.3	Determinazione della temperatura operante interna	49
6.2	UNI EN ISO 13792: differenze con la UNI 10375	50
6.3	Confronto tra i risultati della UNI 10375 e del software Comfen	51
7	I modelli analizzati nelle simulazioni	55
7.1	Considerazioni sui parametri scelti	56
7.1.1	Geometria aula	57
7.1.2	Esposizione	57
7.1.3	Percentuale finestrata	59
7.1.4	Materiale del telaio	61
7.1.5	Vetrazione	61
7.1.6	Schermature	61
7.1.7	Aggetti	63
7.1.8	Trasmittanza della parete	65

7.1.9	Potenza elettrica installata	65
7.1.10	Controllo dell'illuminazione	65
7.1.11	Ventilazione	66
8	Risultati delle simulazioni	67
8.1	Step 1: analisi dei fabbisogni	67
8.1.1	Considerazioni sul fabbisogno per riscaldamento	67
8.1.1.1	Schermature	71
8.1.1.2	Aggetti	71
8.1.1.3	Caratteristiche serramenti	72
8.1.1.4	Illuminazione	73
8.1.2	Considerazioni sul fabbisogno per raffrescamento	76
8.1.2.1	Schermature	78
8.1.2.2	Aggetti	79
8.1.2.3	Caratteristiche serramenti	82
8.1.2.4	Illuminazione	82
8.1.3	Considerazioni sul fabbisogno per illuminazione	83
8.1.3.1	Geometria locale	85
8.1.3.2	Orientamento	87
8.1.3.3	Schermature	87
8.1.3.4	Aggetti	88
8.1.3.5	Caratteristiche serramenti	92
8.1.3.6	Il fabbisogno di illuminazione: confronto tra il metodo di calcolo dinamico e stazionario	94
8.2	Step 2: definizione del comfort termico	96
9	L'incidenza dei parametri variabili sui fabbisogni	104
9.1	Geometria del locale	105

9.2	Esposizione	107
9.3	Caratteristiche dei serramenti	108
9.4	Le schermature	111
9.5	Aggetti	112
9.6	Trasmittanza dell'involucro opaco	114
9.7	Impianto di illuminazione	115
10	Conclusioni	117
11	Bibliografia	120
12	Appendice	123
12.1	Validazione del foglio di calcolo della Temperatura estiva	123
12.2	Preparazione dei modelli	125
12.2.1	Livelli	128
12.3	Gli aggetti: variazione di radiazione solare incidente	129
12.4	Grafici dell'andamento della temperatura operante interna	133
12.5	Risultati delle simulazioni	145

1.1 Indice delle tabelle

Tabella 4-1: banca dati Audit GIS: informazioni generali sul database	6
Tabella 4-2: numero edifici banca dati Audit GIS (elaborazione a cura dell'autore)	7
Tabella 4-3: tipologia di scuola (elaborazione a cura dell'autore)	8
Tabella 4-4: consumi per riscaldamento (kWh/anno)	9
Tabella 4-5: consumi Elettrici (kWh/anno)	10
Tabella 4-6: consumi specifici degli edifici scolastici (elaborazione a cura dell'autore)	11
Tabella 4-7: numero edifici per classe energetica (elaborazione a cura dell'autore)	13
Tabella 4-8: trasmittanze medie involucro ($W/(m^2K)$) (elaborazione a cura dell'autore)	13
Tabella 4-9: motivazioni certificazione energetica (elaborazione a cura dell'autore)	14
Tabella 5-1: penetrazione luce diurna	25
Tabella 5-2: fattore di disponibilità di luce diurna	26
Tabella 5-3: fattore di redistribuzione mensile	27
Tabella 5-4: valori di FA	29
Tabella 5-5: valori di FOC	29
Tabella 5-6: classe dei criteri di progettazione dell'illuminazione (come da norma)	30
Tabella 5-7: tempo operativo annuale (come da norma)	30
Tabella 5-8: compilazione schedule illuminazione	35
Tabella 5-9: risultati confronto locale 1 senza controllo illuminazione	36
Tabella 5-10: risultati confronto locale 1 con controllo illuminazione continuo	36
Tabella 5-11: risultati confronto locale 1 con controllo illuminazione continuo/off	37
Tabella 5-12: risultati confronto locale 2 senza controllo illuminazione	38
Tabella 5-13: risultati confronto locale 2 con controllo illuminazione continuo	38
Tabella 5-14: risultati confronto locale 2 con controllo illuminazione continuo/off	38
Tabella 6-1: valori di ricambi ora da normativa	53
Tabella 7-1: parametri fissi modello	55
Tabella 7-2: parametri variabili modello	56
Tabella 7-3: risultati confronto esposizioni	58
Tabella 7-4: calcolo della percentuale finestrata. Verifica RA	59

Tabella 7-5: configurazione dei serramenti	60
Tabella 7-6: caratteristiche vetrazione	61
Tabella 7-7: caratteristiche schermature	61
Tabella 8-1: incremento(nel caso di ventilazione naturale rispetto al caso di VMC) dei fabbisogni per riscaldamento locale 5x5	70
Tabella 8-2: incremento (nel caso di ventilazione naturale rispetto al caso di VMC) dei fabbisogni per riscaldamento locale 7x7	70
Tabella 8-3: incremento (nel caso di ventilazione naturale rispetto al caso di VMC) dei fabbisogni per riscaldamento locale 9x5	70
Tabella 8-4: percentuali di risparmio fabbisogno raffrescamento, locale 5x5	80
Tabella 8-5: percentuali di risparmio fabbisogno raffrescamento, locale 7x7	81
Tabella 8-6: percentuali di risparmio fabbisogno raffrescamento, locale 9x5	81
Tabella 8-7: riassunto risparmi dipendenti dalla geometria del locale	86
Tabella 8-8: confronto risultati Comfen con risultati normativa, Sud	94
Tabella 8-9: confronto risultati Comfen con risultati normativa, Ovest	94
Tabella 8-10: influenza dell'aggetto orizzontale sui risultati della ISO 10916, Sud	95
Tabella 8-11: influenza dell'aggetto orizzontale sui risultati della ISO 10916, Ovest	95
Tabella 8-12: ore di discomfort degli esempi sopra riportati, Categoria 3	101
Tabella 8-13: ore di discomfort degli esempi sopra riportati, Categoria 2	101
Tabella 12-1: confronto tra temperature operanti	124
Tabella 12-2: Riassunto dei livelli e dei parametri dipendenti	127

1.2 Indice delle immagini

Immagine 5-1: angolo da ostruzioni lineari	22
Immagine 5-2: angolo da aggetti orizzontali	23
Immagine 5-3: angolo da aggetti verticali	23
Immagine 5-4: locale di confronto 1	34
Immagine 5-5: locale di confronto 2	37
Immagine 6-1: percentuali di apertura a seconda della tipologia di serramento	52
Immagine 7-1: nessun oggetto	64
Immagine 7-2: oggetto orizzontale, verticale e combinato	64
Immagine 12-1: geometria locale	123

1.3 Indice dei grafici

Grafico 4-1: percentuale influenza dei consumi (elaborazione a cura dell'autore)	11
Grafico 4-2: numero edifici per classe energetica (elaborazione a cura dell'autore)	13
Grafico 4-3: epoche di costruzione edifici scolastici (elaborazione a cura dell'autore)	14
Grafico 6-1: confronto andamento temperatura operante interna	53
Grafico 7-1: risultati confronto esposizioni senza controllo	58
Grafico 7-2: risultati confronto esposizioni con controllo illuminazione continuo	59
Grafico 7-3: ore di funzionamento sistemi schermanti, Sud	62
Grafico 7-4: ore di funzionamento sistemi schermanti, Ovest	63
Grafico 8-1: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 5x5 (KWh/m2 anno)	68
Grafico 8-2: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 7x7 (KWh/m2 anno)	68
Grafico 8-3: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 9x5 (KWh/m2 anno)	69
Grafico 8-4: influenza delle schermature sul fabbisogno per riscaldamento.	72
Grafico 8-5: influenza delle schermature sul fabbisogno per riscaldamento.	72
Grafico 8-6: influenza delle caratteristiche dei serramenti (KWh/m2 anno)	73
Grafico 8-7: influenza della potenza elettrica installata (KWh/m2 anno)	74
Grafico 8-8: influenza della tipologia di controllo (KWh/m2 anno)	74
Grafico 8-9: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 5x5 (KWh/m2 anno)	77

Grafico 8-10: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 7x7 (KWh/m2 anno)	77
Grafico 8-11: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 9x5 (KWh/m2 anno)	78
Grafico 8-12: influenza dei sistemi schermanti sul fabbisogno per raffrescamento	79
Grafico 8-13: incidenza dei sistemi schermanti sul fabbisogno per il raffrescamento in base al tipo di aggetto Af 30% (KWh/m2 anno)	79
Grafico 8-14: incidenza dei sistemi schermanti sul fabbisogno per il raffrescamento in base al tipo di aggetto Af 30% (KWh/m2 anno)	80
Grafico 8-15: fabbisogno per raffrescamento a seconda dell' aggetto (KWh/m2 anno)	81
Grafico 8-16: influenza del controllo sul fabbisogno per raffrescamento	82
Grafico 8-17: fabbisogni illuminazione per Provincia (KWh/m2 anno)	84
Grafico 8-18: confronto sistemi di controllo illuminazione (KWh/m2 anno)	85
Grafico 8-19: influenza della geometria del locale (KWh/m2 anno)	86
Grafico 8-20: confronto fabbisogno illuminazione tra diverse esposizioni (KWh/m2 anno)	87
Grafico 8-21: incidenza della schermatura sul fabbisogno per illuminazione	88
Grafico 8-22: influenza degli aggetti, locale 5x5 (KWh/m2 anno)	89
Grafico 8-23: influenza degli aggetti, locale 7x7(KWh/m2 anno)	90
Grafico 8-24: influenza degli aggetti, locale 9x5 (KWh/m2 anno)	91
Grafico 8-25: variazione del fabbisogno di illuminazione in base al tipo di	93
Grafico 8-26: variazione del fabbisogno di illuminazione in base al tipo di telaio	93
Grafico 8-27: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 30%, no Aggetti	99
Grafico 8-28: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 50%, no Aggetti	99
Grafico 8-29: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 30%, no Aggetti	100
Grafico 8-30: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 30%, no Aggetti	100
Grafico 9-1: influenza geometria locale sui fabbisogni, con controllo illuminazione	105
Grafico 9-2: influenza area finestrata sui fabbisogni, controllo illuminazione	106

Grafico 9-3: influenza dell'esposizione sui fabbisogni	107
Grafico 9-4: influenza del materiale del telaio sui fabbisogni	108
Grafico 9-5: influenza della tipologia di vetratura sui fabbisogni	109
Grafico 9-6: influenza delle caratteristiche dei serramenti sui fabbisogni	110
Grafico 9-7: influenza delle schermature sui fabbisogni	111
Grafico 9-8: influenza degli oggetti sui fabbisogni, Sud	112
Grafico 9-9: influenza degli oggetti sui fabbisogni, Ovest	112
Grafico 9-10: influenza dell'involucro opaco sui fabbisogni	114
Grafico 9-11: influenza della potenza elettrica installata sui fabbisogni	115
Grafico 9-12: influenza del sistema di controllo dell'illuminazione sui fabbisogni	116
Grafico 12-1: confronto temperature operanti interne	124
Grafico 12-2: diagramma ad albero dei livelli delle simulazioni	128
Grafico 12-3: variazione della radiazione solare per tipologia di oggetto, Fin 1, Sud	129
Grafico 12-4: variazione della radiazione solare per tipologia di oggetto, Fin 2, Sud	130
Grafico 12-5: variazione della radiazione solare per tipologia di oggetto, Fin 3, Sud	130
Grafico 12-6: variazione della radiazione solare per tipologia di oggetto, Fin1, Ovest	131
Grafico 12-7: variazione della radiazione solare per tipologia di oggetto, Fin 2, Ovest	131
Grafico 12-8: variazione della radiazione solare per tipologia di oggetto, Fin 3, Ovest	132
Grafico 12-9: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, no AGG	133
Grafico 12-10: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, no AGG	133
Grafico 12-11: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O	134
Grafico 12-12: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O	134
Grafico 12-13: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG V	135
Grafico 12-14: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG V	135
Grafico 12-15: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O+V	136
Grafico 12-16: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O+V	136
Grafico 12-17: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 50%, NO AGG	137
Grafico 12-18: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 50%, NO AGG	137
Grafico 12-19: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Ovest 50%, NO AGG	138
Grafico 12-20: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Ovest 50%, NO AGG	138

Grafico 12-21: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, no AGG	139
Grafico 12-22: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, no AGG	139
Grafico 12-23: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O	140
Grafico 12-24: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O	140
Grafico 12-25: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG V	141
Grafico 12-26: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG V	141
Grafico 12-27: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O+V	142
Grafico 12-28: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O+V	142
Grafico 12-29: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 50%, NO AGG	143
Grafico 12-30: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 50%, NO AGG	143
Grafico 12-31: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Ovest 50%, NO AGG	144
Grafico 12-32: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Ovest 50%, NO AGG	144

2 Introduzione

Nel marzo 2012 la Commissione Industria Ricerca ed Energia dell'Europarlamento ha approvato una proposta di emendamento della direttiva sull'efficienza energetica che prevede l'introduzione di target vincolanti in materia di aumento dell'efficienza energetica per l'Unione e per gli Stati Membri.

La proposta s'inserisce nell'ambito delle azioni previste dal pacchetto "clima energia" che rappresenta una strategia integrata in materia di energia e cambiamenti climatici, volta a indirizzare l'Europa verso un futuro sostenibile, sviluppando un'economia a basse emissioni di CO₂ e improntata allo sfruttamento delle fonti rinnovabili e all'efficienza energetica.

Gli obiettivi di tale politica sono sinteticamente espressi dallo slogan 20-20-20 che prevede il raggiungimento; a livello comunitario, all'anno 2020, dei seguenti risultati:

- la riduzione del 20% delle emissioni di gas a effetto serra rilevate nel 2005;
- la riduzione del 20% dei consumi di energia primaria rispetto, ai consumi previsti nello scenario tendenziale al 2020;
- il consumo finale lordo sia soddisfatto per il 20% da fonti rinnovabili.

Al momento, tuttavia, l'Unione europea si è impegnata formalmente solo a ridurre le emissioni di CO₂ e ad aumentare il contributo delle rinnovabili nel mix energetico e la recente scelta del Parlamento è finalizzata proprio a completare il quadro. Dietro questa proposta c'è l'idea forte che l'efficienza energetica possa essere un elemento favorevole per l'economia europea, con la riduzione della dipendenza dalle importazioni, con le creazioni di nuovi posti di lavoro, con la liberazione di risorse finanziarie e con la riduzione delle emissioni di gas serra.

Tema centrale della proposta di Direttiva sull'efficienza energetica sono gli edifici europei, responsabili del 40% del consumo energetico comunitario e del 36% delle emissioni di CO₂, in particolare gli immobili pubblici, i quali dovrebbero subire ristrutturazioni per generare significativi risparmi energetici.

Il tema della riqualificazione energetica degli edifici scolastici è oggetto negli ultimi anni di molti studi, al fine di determinare le migliori strategie di intervento su un patrimonio che offre ampi margini di miglioramento.

Un esempio di questi studi è stato condotto da Umberto Desideri e Stefania Proietti. (Desideri, Proietti 2002). Nel loro lavoro si sono interessati all'analisi energetica di un edificio scolastico in centro Italia. Lo scopo dell'analisi è il calcolo dei consumi termici ed elettrici dell'edificio al fine di determinare i migliori interventi da apportare a tutto il patrimonio scolastico. Lo studio mostra come sia possibile arrivare a conseguire un risparmio dei consumi termici attorno al 38% ed elettrici attorno al 46%. In particolare dal punto di vista termico, gli interventi proposti considerano l'installazione di nuovi serramenti con vetri doppi, di valvole termostatiche e di generatori in cascata. Dal punto di vista elettrico si propone una sostituzione del contratto energetico al fine di ottimizzarlo rispetto alle esigenze dell'utenza.

Un altro interessante lavoro, sviluppato da S. P. Corgnati, E. Fabrizio, F. Ariaudo e L. Rollino (Corgnati, Fabrizio et al. 2011), propone la definizione d'indici di benchmark di consumo per gli edifici di uso scolastico. Il lavoro prevede una prima parte di monitoraggio dei consumi di 103 edifici scolastici della Provincia di Torino e una seconda parte di simulazione dinamica di varie configurazioni di edifici scolastici. In particolare vengono considerati sia aspetti termici che d'illuminazione.

Anche nel resto del mondo questo tema è di grande attualità come lo testimonia la grande quantità di articoli che trattano questa tematica: ne sono da esempio lo studio effettuato da Hani Hussain Sait (Sait 2013), che definisce il fabbisogno energetico di una scuola in Arabia del Sud e suggerisce delle politiche per ridurlo, lo studio di Kim Tae-Woo, Lee Kang-Guk e Hong Won-Hwa (Kim, Lee et al. 2012), riguardo a consumi energetici in scuole della Corea Del Sud, oppure il lavoro svolto da M.C. Katafygiotou e D.K. Serghides (Katafygiotou, Serghides 2014), che propone un metodo per la classificazione energetica delle scuole di Cipro e uno studio approfondito su una di esse, con annesse soluzioni migliorative.

Da tutti questi studi si può chiaramente capire che c'è uno spreco di energia molto elevato dovuto sia all'inadeguatezza e alla vetusta età degli edifici sia a una politica poco risparmiosa di enti e occupanti che gestiscono e usufruiscono di questi spazi.

In quest'ambito, il Governo italiano con il Decreto legge del 9 febbraio 2012, n5, all'articolo 53, ha previsto l'avvio alla modernizzazione del patrimonio immobiliare scolastico e alla riduzione dei consumi e miglioramento dell'efficienza degli usi finali di energia e alla promozione della produzione di fonti rinnovabili.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è l'analisi del potenziale di riduzione dei consumi energetici degli edifici scolastici italiani.

Il primo punto è definire lo scenario di riferimento degli attuali consumi energetici del patrimonio edilizio delle scuole italiane. Questo lavoro non risulta per niente facile a causa della mancanza di dati di moltissime scuole.

Il secondo passaggio consiste nel valutare il potenziale di riduzione dei consumi energetici degli edifici scolastici italiani studiando come modello tre diverse configurazioni di aula scolastica ed evidenziando quindi una serie di interventi in grado di generare risparmi energetici.

Questo risparmio sarà valutato tenendo in considerazione tre diversi ambiti energetici:

- Riscaldamento
- Raffrescamento
- Illuminazione

Data la bassa percentuale di edifici con impianto di raffrescamento, si è proceduto col verificare se nelle aule sia garantito il comfort termico, attraverso il calcolo della temperatura operante interna dei locali.

3 Il contesto legislativo

A livello europeo, la direttiva di riferimento per le tematiche in analisi è la Direttiva 2012/27/UE sull'Efficienza Energetica.

Essa stabilisce una serie di misure comuni per l'efficienza energetica nell'Unione Europea al fine di garantire il raggiungimento dell'obiettivo principale di un risparmio dei consumi di energia primaria del 20 % entro il 2020 e di gettare le basi per ulteriori miglioramenti oltre tale data.

La Direttiva prevede che gli Stati membri dovranno:

- fissare obiettivi nazionali indicativi di efficienza energetica;
- prevedere una strategia a lungo termine per mobilitare investimenti nella ristrutturazione degli edifici residenziali e commerciali, sia pubblici che privati;
- adottare misure per promuovere "la disponibilità, per tutti i clienti finali, di audit energetici di elevata qualità, efficaci in rapporto ai costi";
- garantire che le imprese di grandi dimensioni siano soggette a un audit energetico svolto in maniera indipendente ed efficiente da esperti qualificati e/o accreditati.

In particolare per l'edilizia c'è la necessità di trovare formule sempre più energeticamente efficienti per costruire, ristrutturare, gestire i nostri edifici, siano esse le nostre scuole, palestre, ospedali, uffici o qualsiasi altro luogo dove viviamo e lavoriamo.

Per realizzare o riqualificare un edificio non basta prevedere tecnologie di ultima generazione ad alta efficienza o prodotti ad elevato risparmio energetico, ma serve dotarlo di un sistema intelligente in grado di gestirli e effettuare sinergie efficaci tra i sistemi di Riscaldamento, Condizionamento, Ventilazione e Illuminazione.

In Italia la Direttiva Europea è stata recepita con il Decreto Legislativo 4/07/2014 n° 102.

In particolare nel Decreto, per incentivare le misure di risparmio ed efficienza energetica, vengono stanziati 800 milioni di euro, di cui quasi la metà sono destinati alla riqualificazione degli edifici pubblici.

4 Il patrimonio scolastico

Sul territorio italiano sono presenti circa 51.000 edifici ad esclusivo o prevalente uso scolastico (PAEE 2104).

La performance energetica degli edifici è l'elemento chiave per ottenere gli obiettivi europei climatici ed energetici degli edifici, che prescrivono una riduzione del 20% dell'utilizzo di energia primaria e una riduzione del 20% dei gas serra entro il 2020.

È impossibile raggiungere questi risultati senza un'efficiente riqualificazione energetica degli edifici esistenti.

Gli edifici scolastici costituiscono una particolare categoria di edifici. In tali edifici, infatti, oltre ai costi relativi al riscaldamento e al raffrescamento, rivestono particolare importanza anche i costi legati all'illuminazione.

Per la caratterizzazione dei consumi energetici del settore dell'istruzione pubblica ci si è avvalsi di due distinti database, uno fornito da Fondazione Cariplo e un altro dal CEER.

4.1 Banca dati Audit GIS

La Fondazione Cariplo è un soggetto privato che opera per la promozione di progetti di utilità sociale non-profit, pubblici e privati nel settore della sostenibilità ambientale, dell'Arte e Cultura, della Ricerca Scientifica, e dei Servizi alla Persona.

La Fondazione interviene prevalentemente in Lombardia e nelle province di Novara e del Verbano-Cusio-Ossola, nonché partecipa ad iniziative di carattere internazionale, soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Fra i progetti sviluppati, la Fondazione Cariplo, nel periodo 2006-2008, ha promosso un Bando con l'obiettivo di favorire la diffusione degli Audit energetici negli edifici dei comuni piccoli e medi e di avviare, all'interno delle amministrazioni comunali, un processo di formazione di competenze relative alla gestione energetica degli edifici.

Il bando ha coinvolto in tre anni 650 Comuni al di sotto dei 30.000 abitanti delle province lombarde e di Novara e Verbania, ovvero oltre un terzo dei Comuni piccoli e medi del territorio.

Al termine delle attività, gli audit realizzati sono stati oltre 4000, mentre le diagnosi dettagliate, comprensive di analisi degli interventi di efficienza energetica hanno superato le 1500 unità.

Tabella 4-1: banca dati Audit GIS: informazioni generali sul database

	N comuni	% N comuni	N edifici	% N° edifici	superficie lorda (m ²)	volume lordo (m ³)
Piemonte	61	9.6%	265	7.1%	246'637	1'084'365
Novara	35	5.5%	184	4.9%	169'703	751'456
Verbano-Cusio-Ossola	26	4.1%	81	2.2%	76'934	332'909
Lombardia	576	90.4%	3'477	92.9%	4'345'418	19'783'296
Bergamo	75	11.8%	391	10.4%	454'067	2'342'700
Brescia	90	14.1%	568	15.2%	658'549	3'169'749
Como	38	6.0%	204	5.5%	186'475	814'153
Cremona	31	4.9%	142	3.8%	123'677	640'781
Lecco	30	4.7%	169	4.5%	198'045	800'965
Lodi	49	7.7%	194	5.2%	165'818	690'296
Mantova	39	6.1%	255	6.8%	249'106	1'257'942
Milano	103	16.2%	898	24.0%	1'516'224	6'408'173
Pavia	35	5.5%	99	2.6%	114'348	575'747
Sondrio	28	4.4%	178	4.8%	216'755	891'123
Varese	58	9.1%	379	10.1%	462'354	2'191'668
Totale	637	100%	3'742	100%	4'592'055	20'867'661

Il database fornito contiene informazioni relative agli audit energetici effettuati su 3742 edifici, di cui 1649 sono edifici scolastici distribuiti tra tutte le province lombarde e le province piemontesi di Novara e Verbania-Cusio-Ossola. Per ogni edificio è identificato un inquadramento territoriale con Comune, Provincia e Regione di appartenenza e poi sono fornite, Suddivise per destinazione d'uso (scuole materne, elementari, medie, superiori,

polifunzionali e composte), le caratteristiche dimensionali (superficie e volume), il numero di occupanti, la tipologia costruttiva dell'edificio, l'età di costruzione ed eventuale anno di ristrutturazione, la tipologia di impianto termico installato e la fonte di alimentazione, le prestazioni energetiche (consumi termici ed elettrici, interventi di efficienza energetica eventualmente proposti con i relativi risparmi potenziali di energia primaria), il costo dell'investimento e il costo evitato.

Nella tabella seguente si riporta il numero di edifici per ogni destinazione d'uso:

Tabella 4-2: numero edifici banca dati Audit GIS (elaborazione a cura dell'autore)

	Altro	Centro ricreativo	Municipi o e uffici	Palestra e impianto sportivo	Piscina	Residenza sanitaria	Scuole e asili
Piemonte	41	16	65	29	1	9	104
Novara	31	10	40	24	1	7	71
Verbano-Cusio-Ossola	10	6	25	5	0	2	33
Lombardia	478	236	666	471	11	70	1545
Varese	53	31	84	44	0	7	160
Como	45	16	39	26	0	2	76
Sondrio	37	9	38	20	3	4	67
Milano	114	55	137	111	5	22	454
Bergamo	55	29	72	62	0	5	168
Brescia	56	61	121	70	1	9	250
Pavia	11	5	24	14	0	6	39
Cremona	20	3	33	21	0	2	63
Mantova	44	9	41	37	2	2	120
Lecco	29	13	30	26	0	7	64
Lodi	14	5	47	40	0	4	84
Totale	519	252	731	500	12	79	1649
Totale %	14%	7%	20%	13%	0%	2%	44%

4.1.1 Il campione analizzato

Gli edifici ad uso scolastico corrispondono al 44% dell'intero campione di edifici e sono 1649.

Di questi si è analizzata la tipologia di scuola, in modo da avere una visione più dettagliata e specifica del campione oggetto di studio.

Si è ottenuto che il 40% degli edifici ospita scuole elementari, il 24% scuole materne, il 19% scuole medie e il resto scuole superiori, asili nidi oppure scuole composte, ossia con la presenza nello stesso edificio di più funzioni.

Tabella 4-3: tipologia di scuola (elaborazione a cura dell'autore)

Tipologia	N°	%
Asilo nido	99	6%
Scuola materna	388	24%
Scuola elementare	652	40%
Scuola media	309	19%
Scuola superiore	29	2%
Scuola composta	88	5%
Altro	84	5%

Della maggior parte di questi edifici è stata effettuata una valutazione energetica e si sono determinati i consumi di energia per il riscaldamento e di energia elettrica. Si tratta di statistiche relative ai principali parametri rilevati durante le diagnosi energetiche.

Questi consumi sono quindi stati sommati per provincia e per destinazione d'uso, ottenendo i risultati riportati nelle Tabella 4-4 e nella Tabella 4-5.

Come si può notare, gli edifici scolastici consumano ben il 63% dell'energia totale consumata dagli edifici pubblici per il riscaldamento e il 48% dell'energia elettrica. Questo dato è significativo in quanto evidenzia la potenzialità di risparmio energetico conseguibile dagli edifici scolastici.

Altri dati utili da ricavare dalla banca dati della Fondazione Cariplo, riguarda i consumi medi per unità di superficie, valori che saranno poi confrontati con i risultati delle simulazioni oggetto di questo lavoro. Questi valori sono riassunti nella Tabella 4-6.

Tabella 4-4: consumi per riscaldamento (kWh/anno)

	Altro	Centro ricreativo	Municipio e uffici	Palestra e impianto sportivo	Piscina	Residenza sanitaria	Scuole e asili
PIEMONTE	1'679'660	705'859	5'732'620	3'781'612	237'753	783'127	17'574'706
NOVARA	1'148'342	599'045	4'451'890	3'467'035	237'753	433'294	12'986'456
VERBANO-CUSIO-OSSOLA	531'318	106'814	1'280'730	314'577		349'833	4'588'250
LOMBARDIA	48'973'178	15'600'747	93'435'130	73'780'834	9'280'123	18'467'640	452'202'810
VARESE	4'163'962	2'054'360	11'438'551	8'170'787		409'292	50'456'647
COMO	2'468'359	917'837	3'788'385	3'885'672		30'007	16'904'221
SONDRIO	2'738'872	474'287	3'430'181	2'931'800	2'487'708	1'084'626	17'988'954
MILANO	18'710'685	5'800'827	32'000'463	21'449'753	4'048'692	7'999'960	198'400'250
BERGAMO	6'894'084	2'219'365	8'893'869	10'115'154		495'705	40'759'332
BRESCIA	6'373'320	2'440'597	10'801'485	6'787'244	847'877	1'712'514	46'105'502
PAVIA	347'154	281'419	2'309'024	1'643'639		4'161'561	8'752'604
CREMONA	1'568'375	27'195	2'974'270	2'328'467		57'019	10'907'184
MANTOVA	2'222'806	308'087	6'005'554	8'194'853	1'895'846	230'314	24'827'722
LECCO	3'100'001	718'893	3'750'410	3'626'464		2'093'579	13'410'721
LODI	385'560	357'880	8'042'938	4'647'001		193'063	23'689'673
Totale	50'652'838	16'306'606	99'167'750	77'562'446	9'517'876	19'250'767	469'777'516
Totale %	7%	2%	13%	10%	1%	3%	63%

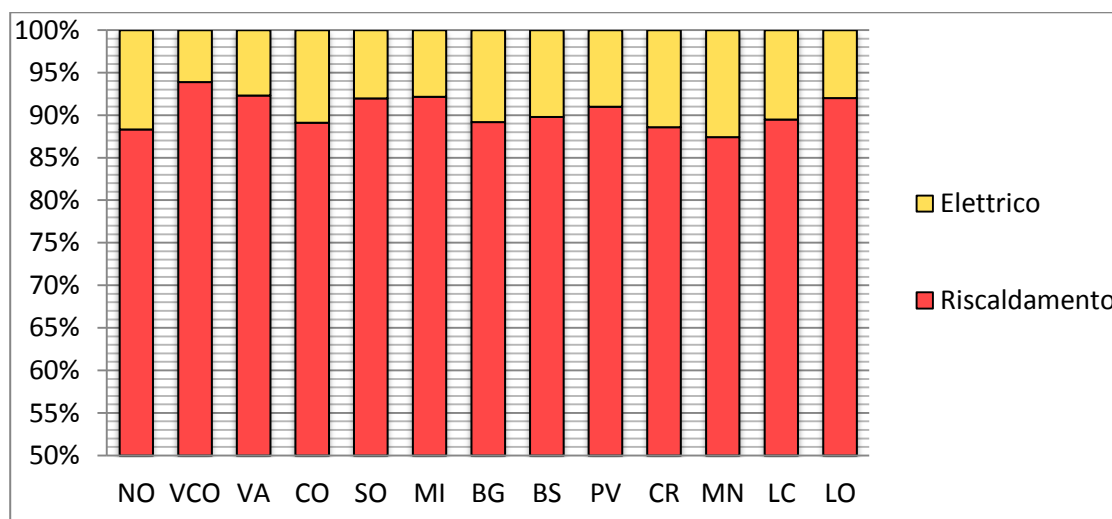
Tabella 4-5: consumi Elettrici (kWh/anno)

	Altro	Centro ricreativo	Municipio e uffici	Palestra e impianto sportivo	Piscina	Residenza sanitaria	Scuole e asili
PIEMONTE	156'677	136'767	1'120'326	466'135	29'864	389'691	2'013'101
NOVARA	137'632	136'767	981'361	448'720	29'864	325'027	1'715'247
VERBANO-CUSIO-OSSOLA	19'045		138'965	17'415		64'664	297'854
LOMBARDIA	8'288'862	2'873'781	20'745'915	12'713'449	1'276'358	3'316'504	45'398'971
VARESE	665'227	280'771	1'924'666	883'554		29'462	4'195'579
COMO	372'969	63'696	750'796	530'980		5'469	2'047'044
SONDRIO	418'317	80'190	809'880	435'005	504'388	26'174	1'567'169
MILANO	3'040'160	966'660	6'696'030	3'591'257	179'127	1'634'471	18'002'559
BERGAMO	1'757'384	681'766	2'606'597	2'323'499		85'552	4'926'558
BRESCIA	832'266	449'829	2'948'813	1'496'830	290'308	481'635	5'238'080
PAVIA	75'360	23'715	539'373	258'562		559'633	863'860
CREMONA	225'309	6'581	678'352	234'221		4'250	1'361'603
MANTOVA	607'900	170'121	1'780'891	1'708'444	302'535	42'176	3'569'495
LECCO	212'882	93'165	654'139	627'978		411'990	1'572'394
LODI	81'088	57'287	1'356'378	623'119		35'692	2'054'630
Totale	8'445'539	3'010'548	21'866'241	13'179'584	1'306'222	3'706'195	47'412'072
Totale %	9%	3%	22%	13%	1%	4%	48%

Tabella 4-6: consumi specifici degli edifici scolastici (elaborazione a cura dell'autore)

	consumi riscaldamento				consumi elettrico			
	kWh/anno	% TOT	kWh/m ² anno	% TOT	kWh/anno	% TOT	kWh/m ² anno	% TOT
Piemonte	17574706	90%	185.40	92%	2013101	10%	16.63	8%
Novara	12986456	88%	142.18	88%	1715247	12%	18.78	12%
VCO	4588250	94%	154.37	94%	297854	6%	10.02	6%
Lombardia	452202810	91%	145.17	89%	45398971	9%	18.65	11%
Varese	50456647	92%	176.00	92%	4195579	8%	14.64	8%
Como	16904221	89%	168.99	89%	2047044	11%	20.60	11%
Sondrio	17988954	92%	157.56	92%	1567169	8%	13.73	8%
Milano	175341903	92%	243.74	92%	14928376	8%	20.74	8%
Bergamo	40759332	89%	167.96	89%	4926558	11%	20.30	11%
Brescia	46105502	90%	145.67	90%	5238080	10%	16.55	10%
Pavia	8752604	91%	182.32	91%	863860	9%	17.99	9%
Cremona	10907184	89%	138.30	89%	1361603	11%	17.80	11%
Mantova	24827722	87%	164.73	87%	3569495	13%	23.68	13%
Lecco	13410721	90%	132.10	90%	1572394	10%	15.49	10%
Lodi	23689673	92%	236.06	92%	2054630	8%	20.47	8%

Grafico 4-1: percentuale influenza dei consumi (elaborazione a cura dell'autore)



Dal grafico sopra riportato si può notare come l'energia elettrica influisca sul consumo totale dell'edificio per valori compresi tra il 7 e l'11%.

4.2 Gli Audit energetici del CEER

Un'altra banca dati utile per comprendere la situazione degli edifici scolastici è messa a disposizione dal CEER ossia il Catasto Energetico Edifici Regionale. Questo database, al 29/10/2014, conta 2175 edifici scolastici distribuiti sul territorio lombardo.

Dai dati Istat è possibile determinare il numero totale degli edifici a destinazione scolastica presenti in Lombardia che risulta essere pari a 7775.

Il database dal CEER rappresenta quindi il 28% del campione totale.

Tra i dati utili forniti dal database per ogni edificio troviamo:

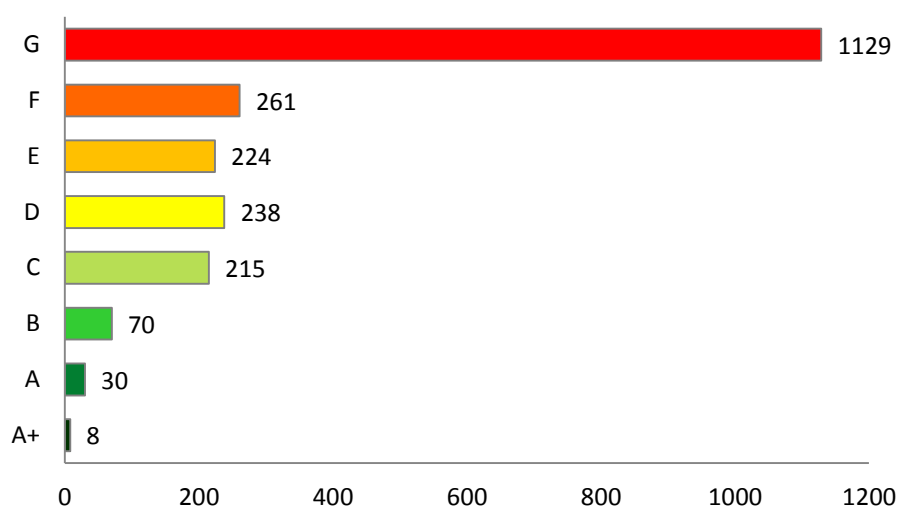
- Superficie lorda mantenuta a temperatura controllata o climatizzata dell'edificio oggetto di certificazione
- Superficie netta calpestabile mantenuta a temperatura controllata o climatizzata dell'edificio oggetto di certificazione
- Volume lordo mantenuto a temperatura controllata o climatizzato dell'edificio oggetto di certificazione
- Volume netto mantenuto a temperatura controllata o climatizzato dell'edificio oggetto di certificazione
- Valore medio della trasmittanza delle strutture verticali dell'edificio
- Valore medio della trasmittanza della copertura dell'edificio
- Valore medio della trasmittanza del basamento dell'edificio
- Valore medio della trasmittanza dei serramenti dell'edificio
- Classe energetica dell'edificio
- EPH Fabbisogno annuo di energia primaria per il riscaldamento o la climatizzazione invernale dell'edificio
- ETH Fabbisogno annuo di energia termica per il riscaldamento o la climatizzazione invernale dell'edificio
- ETC Fabbisogno annuo di energia termica per il raffrescamento o la climatizzazione estiva dell'edificio
- Efficienza globale media annuale dell'impianto termico per il servizio di riscaldamento o climatizzazione invernale

Dall'analisi dei dati si nota che oltre il 50% degli edifici scolastici fa parte della classe energetica dell'edificio G, e che solo il 4% fa parte delle classi A o B. Questi ultimi sono edifici che hanno subito degli interventi di recente.

Tabella 4-7: numero edifici per classe energetica (elaborazione a cura dell'autore)

Classe energetica	Numero	%
A+	8	0%
A	30	1%
B	70	3%
C	215	10%
D	238	11%
E	224	10%
F	261	12%
G	1129	52%

Grafico 4-2: numero edifici per classe energetica (elaborazione a cura dell'autore)



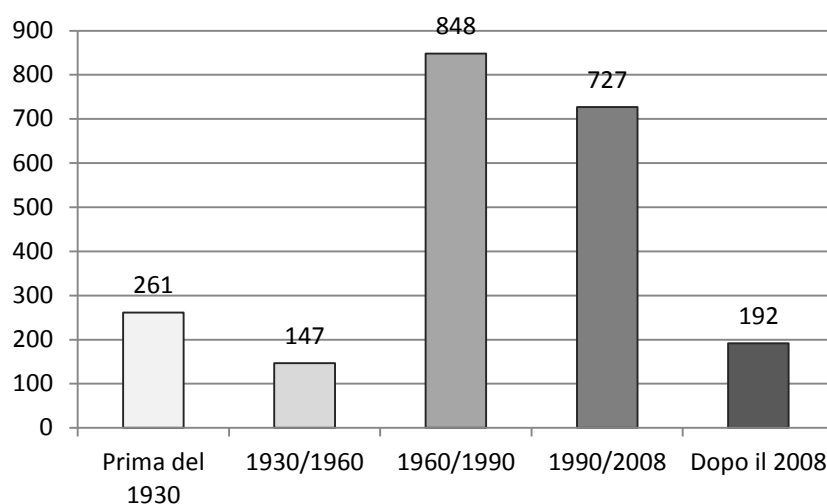
Altri parametri utili che si possono estrapolare dal database riguardano le trasmittanze degli elementi d'involucro. In particolare si ottengono i valori riportati in tabella:

Tabella 4-8: trasmittanze medie involucro ($W/(m^2K)$) (elaborazione a cura dell'autore)

Chiusura verticale	1.06
Copertura	1.02
Basamento	1.11
Serramento	3.39

Per avere un'idea più specifica del campione in esame sono state anche analizzate le epoche di costruzione dei vari edifici riportate nel grafico seguente. Si può notare che la maggior parte degli edifici è stata costruita tra il 1960 e il 2008.

Grafico 4-3: epoche di costruzione edifici scolastici (elaborazione a cura dell'autore)



Un'ulteriore analisi riguarda le motivazioni per cui sono state realizzate le certificazioni energetiche.

Tabella 4-9: motivazioni certificazione energetica (elaborazione a cura dell'autore)

Ace volontario	502
Nuova costruzione	190
Ristrutturazione edilizia sopra il 25%	85
Demolizione e ricostruzione in ristrutturazione	8
Ampliamento volumetrico sopra il 20%	42
Contratto servizio energia o servizio energia plus	218
Trasferimento a titolo oneroso	186
Contratto di locazione	261
Incentivi fiscali	131
Nuova installazione d'impianto termico	28
Sostituzione di generatore sopra i 100 kW	99
Ristrutturazione d'impianto termico	52
Altro	373

In particolare la Tabella 4-9 evidenzia che un elevato numero di certificazioni sono state eseguite volontariamente dagli enti, mentre di minor entità sono le quelle realizzate a seguito di ristrutturazioni dell'edificio oppure modifiche agli impianti.

Dalla precedente analisi si evince anche che solo l'8% degli edifici presenti nel database è di nuova costruzione e che, tra quelli di vecchia costruzione, solo il 16% ha subito interventi migliorativi sia in termini edili che impiantistici.

Per quel che riguarda invece gli aspetti energetici, si ottiene un fabbisogno di energia primaria media per il riscaldamento di 243,68 kWh/(m² annuo) e un fabbisogno di energia termica per il riscaldamento di 154,79 kWh/(m² annuo). Ricavando così un rendimento medio dell'impianto di riscaldamento pari a 0,79.

5 Il fabbisogno energetico per l'illuminazione

All'interno degli edifici scolastici, il fabbisogno energetico necessario per illuminare gli ambienti può raggiungere valori significativamente elevati e merita quindi uno studio approfondito.

Questo tema è stato introdotto per la prima volta nella Direttiva Europea 2002/91 in cui viene evidenziata la necessità di ridurre i consumi energetici per illuminare.

In particolare nel recepimento della Direttiva in Italia con il D.M. 26/06/2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica" viene definito l'indice di prestazione energetica globale EP_{gl} che esprime per unità di superficie utile o volume lordo l'energia primaria complessivamente impiegata per assolvere le esigenze di riscaldamento, di refrigerazione, di produzione di acqua calda e di illuminazione artificiale.

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

Mentre i termini legati alla climatizzazione e alla produzione di acqua calda sanitaria sono stati trattati nel corso degli anni in varie normative, il termine legato all'illuminazione è stato praticamente ignorato.

Finalmente con la pubblicazione della **UNI EN 15193:2008** si è arrivati ad una procedura per determinare il LENI (*Light Energy Numeric Indicator*) ossia un indice che esprime il fabbisogno energetico per la sola illuminazione artificiale per unità di superficie utile su base annua. Tale indice quindi rappresenta un misuratore della prestazione dell'impianto d'illuminazione.

Tuttavia il LENI non equivale all' EP_{ill} in quanto il primo esprime l'energia elettrica assorbita per unità di superficie utile, il secondo quantifica l'energia primaria per unità di volume lordo: bisognerebbe dunque effettuare una conversione da energia elettrica a primaria e da unità di superficie a volumetrica; questa seconda operazione potrebbe risultare concettualmente poco corretta o poco significativa: se infatti ha senso riferirsi al volume dell'edificio per definire la prestazione di un impianto di climatizzazione (in quanto

effettivamente si considera un volume riscaldato/raffrescato), nella progettazione illuminotecnica si opera sostanzialmente su una superficie (individuata dal compito visivo). Risulta dunque più appropriato comparare le prestazioni di un impianto di illuminazione sulla base dell'articolazione planimetrica degli ambienti, così come previsto dal LENI; sarebbe invece opportuno ridefinire le caratteristiche dimensionali dell'EP_{iii}.

In Lombardia il calcolo del fabbisogno per illuminazione, introdotto all'interno del Decreto Regionale 5796 dell'11/06/2009, segue la stessa metodologia di calcolo definita dalla UNI EN 15193.

Un ulteriore passo avanti nello studio di questo tema è avvenuto grazie alla **ISO 10916:2014**. Tale norma prevede anch'essa lo studio dell'energia finale necessaria per l'illuminazione, ma introduce delle modifiche al procedimento di calcolo.

Una stima accurata delle prestazioni energetiche e quindi dell'efficacia di un sistema di gestione dell'illuminazione dipende da diversi fattori, connessi sia alle caratteristiche dell'edificio per il quale viene progettato sia alle caratteristiche del sistema previsto (criteri di controllo adottati, componenti del sistema, etc.).

In particolare entrano in gioco:

- la disponibilità di luce naturale esterna all'ambiente, che dipende da:
 - latitudine e longitudine del luogo,
 - giorno del mese e ora del giorno,
 - condizioni di cielo (coperto, sereno, intermedio, etc.)
- la quantità di luce naturale presente in ambiente, che dipende da:
 - disponibilità di luce naturale esterna,
 - presenza di ostruzioni esterne,
 - orientamento dell'ambiente (nel caso si consideri la presenza di radiazione solare diretta)
 - presenza di sistemi di schermature,
 - conformazione dell'ambiente e disposizione delle postazioni di lavoro,
- le caratteristiche dell'utenza, intese come:
 - profilo di occupazione,

- modalità di interazione tra l'utenza e i componenti schermanti,
- modalità di interazione tra l'utenza e l'impianto di illuminazione,
- le caratteristiche e le prestazioni dell'impianto di illuminazione (tipologia di apparecchi,
- distribuzione della luce in ambiente, etc.)
- la tipologia e l'architettura del sistema di controllo (controllo in base all'occupazione, alla
- presenza di luce naturale, alla volontà dell'utente, a scenografie predefinite, etc., tipologia di sensori adottati, raggruppamento dei terminali, etc.).

Di seguito si riporta prima la procedura di calcolo del LENI secondo la UNI EN 15193:2008 e, successivamente, si evidenziano le migliorie apportate dalla più recente ISO 10916:2014.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati anche numerosi software che calcolano il fabbisogno energetico per l'illuminazione.

Nel presente studio ne sono stati analizzati vari tra cui:

- Dialux 4.12: è un software gratuito che prevede calcolo statico previsto dalla UNI 15193;
- ReLuxPro 2.0.3.: è un software a pagamento che accoppiato a ReluxEnergy, prevede il calcolo statico previsto dalla UNI 15193;
- COMFEN 5 beta: è un software gratuito che prevede il calcolo del fabbisogno di energia elettrica per illuminare i locali in regime dinamico;
- Daysim 3.1b: è un software gratuito che prevede il calcolo del fabbisogno di energia elettrica per illuminare i locali in regime dinamico;

In particolare si è scelto di utilizzare DIALux per il calcolo statico, per il fatto che risulta essere gratuito, e Comfen per il caso dinamico, in quanto si adatta meglio agli obiettivi prefissati per questo studio.

Importante per lo svolgimento del presente lavoro sarà quindi il confronto tra i risultati ottenuti dalle normative con i valori di output dai software.

5.1 Calcolo del LENI (UNI EN 15193)

In sintesi, le formule per la valutazione del LENI sono le seguenti:

$$LENI = W/A \text{ [kWh}/(m^2 \cdot \text{anno})] \quad (1)$$

con:

W = energia elettrica assorbita dall'impianto di illuminazione su base annua [kWh/anno]

A = superficie utile della zona considerata [m²]

$$W = W_L + W_P \quad (2)$$

con:

W_L energia consumata a lampade accese

W_P energia parassita

in particolare:

$$W_L = \Sigma\{(P_n \cdot F_C) \cdot [(t_D \cdot F_O \cdot F_D) + (t_{ND} \cdot F_O)]\}/1000 \text{ [kWh/anno]} \quad (3)$$

$$W_P = \Sigma\{P_{pc} \cdot [t - (t_D + t_{ND})] + P_{em} \cdot t_{em}\}/1000 \text{ [kWh/anno]} \quad (4)$$

Con:

P _n	potenza complessiva degli apparecchi illuminanti in una data zona o ambiente [W]
t _D	numero di ore di funzionamento dell'impianto in cui è disponibile la luce naturale [h]
t _N	numero di ore di funzionamento dell'impianto in cui non è disponibile la luce naturale [h]
F _C	fattore di illuminamento costante
F _O	fattore di dipendenza dall'occupazione
F _D	fattore di dipendenza dalla luce diurna
P _{pc}	potenza parassita assorbita dai sistemi di controllo delle sorgenti luminose quando sono spente [W]
P _{em}	potenza parassita necessaria alla ricarica delle batterie del sistema di illuminazione di emergenza [W]
t	ore presenti in un anno (24 · 365 = 8760) [h]
t - (t _D +t _{ND})	numero di ore in cui l'impianto non è funzionante e dunque è attivo il solo sistema di controllo per la modalità "stand by" [h]
t _{em}	numero di ore in cui le batterie del sistema di illuminazione di emergenza vengono ricaricate [h]

5.1.1 Il fattore di dipendenza dalla luce diurna F_D

Quando negli ambienti non sono presenti fonti di luce naturale oppure non è possibile spegnere/accendere l'impianto in funzione della disponibilità di luce diurna o della presenza di occupanti, gli apparecchi illuminanti resteranno sempre accesi durante le ore di funzionamento t_D+t_{ND} dell'edificio: in questo caso $F_O = F_D = 1$.

Il risparmio energetico ottenibile applicando il fattore riduttivo F_D dipende sia dalle caratteristiche intrinseche del locale in esame sia dall'impianto di illuminazione artificiale; difatti F_D è a sua volta funzione di due parametri: il fattore di disponibilità di luce diurna F_{DS} che quantifica la disponibilità di luce naturale in ambiente, e il fattore legato al sistema di controllo F_{DC} che esprime l'azione di eventuali dispositivi in grado di regolare il flusso luminoso degli apparecchi in funzione della luminosità rilevata in ambiente e dell'illuminamento richiesto. Vedremo in seguito, attraverso un esempio applicativo, che nella valutazione del LENI è determinante anche la suddivisione degli apparecchi illuminanti in gruppi di accensione: solo se questi saranno progettati in funzione di aree del locale con diversa disponibilità di luce diurna (generalmente in file parallele alla finestra), sarà possibile applicare il fattore riduttivo F_D ed ottenere quindi un risparmio di energia.

Ai fini della valutazione della prestazione energetica dell'impianto di illuminazione, è innanzitutto necessario discretizzare l'edificio in esame in singoli ambienti (o zone) caratterizzati dalla stessa destinazione d'uso e da un unico sistema di controllo: per ciascuno di essi si effettua il calcolo del LENI e la verifica che esso sia contenuto entro i valori limite prescritti dalla norma; ciò sarà possibile definendo per ciascuna zona i parametri che compaiono nelle equazioni 3) e 4) ovvero le potenze installate, le ore di funzionamento dell'impianto ed i fattori riduttivi F .

In particolare, per la valutazione di F_D , in ogni ambiente bisogna individuare la daylight area A_D ovvero la superficie del compito visivo che beneficia di luce naturale: la sua localizzazione ed estensione dipendono dalla tipologia di componente trasparente che consente il passaggio di luce naturale attraverso l'involucro edilizio; in particolare si distingue tra finestre (localizzate su pareti verticali) e lucernai (su soffitto). Nello studio qui riportato ci si riferisce alla presenza delle sole finestre, ipotesi plausibile all'interno delle aule scolastiche.

5.1.1.1 Individuazione dell'area del compito visivo che beneficia di luce naturale A_D

Ad ogni apertura o insieme di aperture adiacenti corrisponde un'area illuminata A_D , individuata sulla superficie alla quota del piano di lavoro posta pari a:

$$A_D = a_D \cdot b_D [m^2] \quad (5)$$

in cui a_D e b_D sono rispettivamente la profondità e la larghezza dell'area illuminata.

La profondità dell'area illuminata è valutata in funzione della massima profondità a_{Dmax} :

$$a_{Dmax} = 2,5 \cdot (h_{Li} - h_{Ta}) [m] \quad (6)$$

in cui h_{Li} ed h_{Ta} sono rispettivamente l'altezza dal suolo della piattabanda superiore e la quota del piano di lavoro.

a_D viene posto pari ad a_{Dmax} , a meno che la profondità reale dell'ambiente a_R non risulti minore del valore a_{Dmax} calcolato: in tale caso si pone allora $a_D = a_R$. Si pone inoltre $a_D = a_R$ anche quando la profondità dell'ambiente risulta minore di $1,25 a_{Dmax}$.

Per quanto riguarda invece la larghezza dell'area illuminata, questa in presenza di finestre distribuite uniformemente e ravvicinate corrisponde alla larghezza interna della facciata che si sta considerando, trascurando anche la eventuale presenza di tramezzature interne.

Se invece le finestre sono collocate solo in particolari zone della facciata, la larghezza dell'area illuminata corrisponde alla larghezza della finestra L_{fin} con l'aggiunta, da entrambi i lati, di una larghezza pari ad un quarto della profondità dell'area illuminata

$$b_D = L_{fin} + a_{Dmax} / 2 \quad (7)$$

5.1.1.2 Valutazione del fattore di luce diurna D_c

Il fattore D_c stima la predisposizione del locale a ricevere luce diurna in base allo squarcio sulla facciata e alla presenza di ostacoli esterni, quindi non considera il componente finestrato e la presenza di schermi solari. Il valore cui si fa riferimento è quello medio calcolato su una linea appartenente al piano di lavoro, parallela al piano della finestra e che taglia a metà l'area illuminata.

$$D_c = (4,13 + 20,0 \cdot I_T - 1,36 \cdot I_{De}) \cdot I_o \quad [\%] \quad (8)$$

con:

- I_T : indice di trasparenza, dato dal rapporto:

$$I_T = A_G/A_D \quad (9)$$

con:

A_G : area lorda dell'apertura nella facciata (squarcio senza la presenza dell'infisso);
 A_D : area del piano di lavoro orizzontale che beneficia di luce diurna

- I_{De} : indice di profondità, dato dal rapporto:

$$I_{De} = a_D/(H_L - H_{td}) \quad (10)$$

- I_o : indice di ostruzione, che tiene conto della riduzione della luce incidente dovuta a ostacoli (edifici, alberi, montagne).

Le ostruzioni possono essere costituite da edifici circostanti o da ostacoli naturali, dalla presenza di aggetti orizzontali o verticali, oppure dalla presenza di atrii o cortili o ancora da facciate doppie vetrate:

$$I_o = I_{O,OB} \cdot I_{O,OV} \cdot I_{O,VF} \cdot I_{O,CA} \cdot I_{O,GDF} \quad (11)$$

- $I_{O,OB}$ tiene conto della presenza di ostruzioni lineari (ad. edifici contrapposti) e dipende dall'angolo di ostruzione $\gamma_{O,OB}$ formato dall'asse orizzontale, passante per il baricentro della superficie finestrata e perpendicolare ad essa e dalla congiungente il baricentro della finestra con la sommità dell'ostacolo.

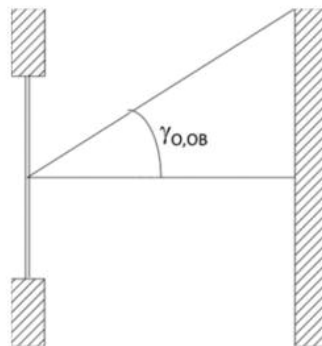


Immagine 5-1: angolo da ostruzioni lineari

$$I_{0,OB} = \cos(1,5 \cdot \gamma_{0,OB})$$

$$\text{se } \gamma_{0,OB} < 60^\circ$$

$$I_{0,OB} = 0$$

$$\text{se } \gamma_{0,OB} \geq 60^\circ$$

- $I_{0,OV}$ considera la presenza di aggetti orizzontali e dipende dall'angolo di ostruzione $\gamma_{0,OV}$

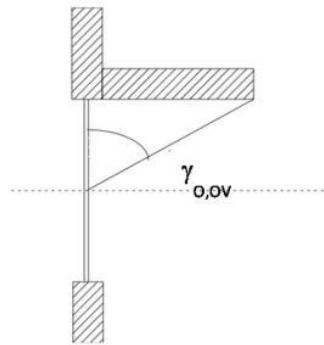


Immagine 5-2: angolo da aggetti orizzontali

$$I_{0,OV} = \cos(1,33 \cdot \gamma_{0,OV})$$

$$\text{se } \gamma_{0,OV} < 67,5^\circ$$

$$I_{0,OV} = 0$$

$$\text{se } \gamma_{0,OV} \geq 67,5^\circ$$

- $I_{0,VF}$ tiene conto della presenza di aggetti verticali

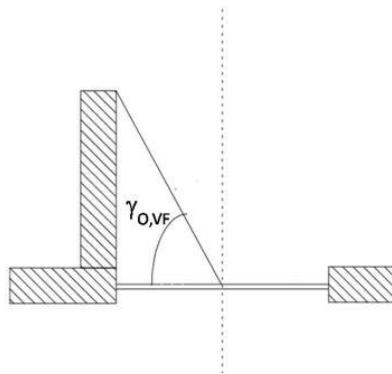


Immagine 5-3: angolo da aggetti verticali

$$I_{0,VF} = 1 - \gamma_{0,VF}/300^\circ$$

- $I_{0,CA}$ rappresenta l'ostruzione dovuta alla presenza di cortili o atri. I cortili si intendono scoperti, mentre gli atri sono dotati di chiusura trasparente. E

necessario calcolare l'indice di cavità del cortile $w_{i,d}$, ossia il rapporto tra il semiperimetro e il doppio dell'area dello stesso, moltiplicato per l'altezza h_{At} dal livello di pavimento del locale considerato alla sommità del cortile:

$$w_{i,d} = h_{At} \cdot (l_{At} + w_{At}) / (2 \cdot l_{At} \cdot w_{At})$$

si ha quindi:

$$I_{O,CA} = 1 - 0,85 w_{i,d} \quad \text{nel caso di cortili}$$

$$I_{O,CA} = t_{AT} \cdot k_{AT,1} \cdot k_{AT,2} \cdot k_{AT,3} \cdot (1 - 0,85 w_{i,d}) \quad \text{nel caso di atri}$$

con:

- t_{AT} fattore di trasmissione della vetrata dell'atrio per radiazione incidente in direzione normale;
- $k_{AT,1}$ fattore che tiene conto della presenza del telaio;
- $k_{AT,2}$ fattore che tiene conto dell'inSudiciamento del vetro;
- $k_{AT,3}$ fattore di correzione che tiene conto della direzione di incidenza della luce diversa dalla normale (in genere posto pari a 0,85).

- $I_{O,GDF}$ considera la presenza di facciate doppie trasparenti:

$$I_{O,GDF} = t_{GDFb} \cdot k_{GDF,1} \cdot k_{GDF,2} \cdot k_{GDF,3}$$

Con:

- t_{GDF} fattore di trasmissione della vetrata doppia;
- $k_{GDF,1}$ fattore che tiene conto della presenza del telaio della seconda facciata vetrata;
- $k_{GDF,2}$ fattore che tiene conto dell'inSudiciamento sulla seconda facciata vetrata;
- $k_{GDF,3}$ fattore di correzione che tiene conto della direzione di incidenza della luce diversa dalla normale (in genere posto pari a 0,85).

5.1.1.3 Valutazione del fattore di incidenza di luce diurna D

Una volta calcolato D_c tramite la 9), è possibile valutare il fattore D che tiene conto della presenza del componente finestrato:

$$D = D_c \cdot \tau_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (12)$$

con:

- τ_{D65} fattore di trasmissione diretta emisferica del sistema vetrato (valori tipici: 0,90 per singolo vetro trasparente, 0.82 per doppi vetri, 0.75 per tripli vetri)
- k_1 fattore che tiene conto della presenza del telaio (valore tipico pari a 0,7);
- k_2 fattore che tiene conto dell'inSudiciamento del vetro (tipicamente 0,8; pari ad 1 nel caso di vetri autopulenti);
- k_3 fattore di correzione che tiene conto della direzione di incidenza non normale della luce (in genere pari a 0,85).

5.1.1.4 Valutazione del grado di penetrazione della luce diurna

Il grado di penetrazione della luce naturale nella zona illuminata può essere nulla, debole, media e forte ed essere valutato tanto in funzione di D_c che di D , così come riportato in Tabella 5-1 (tenere conto di D comporta una maggiore accuratezza).

Tabella 5-1: penetrazione luce diurna

Classificazione		Penetrazione della luce diurna (accesso della zona alla luce diurna)
D_c	D	
$D_c \geq 6\%$	$D \geq 3\%$	Forte
$6\% > D_c \geq 4\%$	$3\% > D \geq 2\%$	Media
$4\% > D_c \geq 2\%$	$2\% > D \geq 1\%$	Debole
$D_c < 2\%$	$D < 1\%$	Nessuna

È opportuno notare che la penetrazione della luce diurna non si ricava da un'equazione, bensì assume valori puntuali, che non è possibile interpolare, in funzione di intervalli di valore assunti da D o D_c : ciò implica ovviamente un notevole margine di approssimazione nella effettiva valutazione della penetrazione di luce naturale in ambiente.

5.1.1.5 Valutazione del fattore di disponibilità di luce diurna F_{DS}

Il fattore F_{DS} è funzione del grado di penetrazione della luce naturale, della latitudine del luogo γ_{sito} , e dall'illuminamento medio mantenuto in ambiente E_m ; in particolare:

$$F_{DS} = a + b \cdot \gamma_{sito} \tag{13}$$

I coefficienti a e b dipendono dal grado di penetrazione della luce naturale e dall'illuminamento medio mantenuto, così come riportato in Tabella.

F_{DS} decresce al crescere della latitudine ed al livello di illuminamento medio mantenuto, mentre cresce all'aumentare del livello di penetrazione della luce naturale. Si osservi che i coefficienti angolari b sono molto prossimi tra loro, per cui le rette hanno pendenze simili.

L'equazione (13) è valida se il valore della latitudine ricade nell'intervallo da 38° a 60° nord; quindi, ad esempio, non comprende le zone più meridionali della Sicilia che si trovano a latitudini minori di 38° : per tali aree può essere plausibile e cautelativo assumere i dati corrispondenti a $\gamma_{\text{sito}} = 38^\circ$.

Tabella 5-2: fattore di disponibilità di luce diurna

Illuminamento mantenuto [lux]	Penetrazione della luce diurna	a	b
300	Debole	1,242 5	-0,011 7
	Media	1,309 7	-0,010 6
	Forte	1,290 4	-0,008 8
500	Debole	0,943 2	-0,009 4
	Media	1,242 5	-0,011 7
	Forte	1,322 0	-0,011 0
750	Debole	0,669 2	-0,006 7
	Media	1,005 4	-0,009 8
	Forte	1,281 2	-0,012 1

5.1.1.6 Calcolo del fattore dipendente dal dispositivo di controllo F_{DC}

Una volta calcolati F_{DS} ed F_{DC} per ciascuna area esposta, si ricava F_D :

$$F_D = 1 - (F_{DS} \cdot F_{DC}) \quad (14)$$

F_D assume valori tanto più bassi (dunque riduttivi dei consumi calcolati) quanto più i due fattori F_{DS} ed F_{DC} sono elevati.

Se invece del calcolo su base annua si effettua una valutazione mensile (dunque più accurata), occorre modificare i dati ottenuti per tenere conto della diversa durata del giorno e della notte al variare dei mesi, in funzione della latitudine del luogo.

5.1.1.7 Metodo mensile

I valori mensili del fattore di dipendenza della luce diurna di $F_{D,n}$ possono essere ricavati dalla seguente equazione:

$$F_{D,n} = 1 - (F_{DS,n} \cdot F_{DC,n} \cdot C_{DS,n}) \quad (15)$$

in cui $C_{DS,n}$ è un fattore di ridistribuzione mensile indicato nella tabelle che segue.

Tabella 5-3: fattore di ridistribuzione mensile

Stazione climatologica/località		Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Watford, GB 52°N	Debole	0,38	0,68	1,02	1,36	1,56	1,62	1,53	1,39	1,13	0,77	0,28	0,28
	Media	0,47	0,80	1,05	1,30	1,46	1,42	1,40	1,35	1,16	0,89	0,35	0,35
	Forte	0,61	0,88	1,07	1,24	1,30	1,28	1,28	1,28	1,16	0,97	0,47	0,47
Francoforte, DE 50°N	Debole	0,43	0,65	0,94	1,33	1,46	1,58	1,55	1,41	1,08	0,76	0,46	0,34
	Media	0,50	0,73	1,01	1,28	1,38	1,44	1,43	1,35	1,11	0,83	0,53	0,40
	Forte	0,62	0,84	1,07	1,21	1,27	1,28	1,28	1,25	1,12	0,91	0,64	0,51
Atene, GR 38°N	Debole	0,65	0,87	1,08	1,22	1,25	1,17	1,24	1,20	1,04	0,93	0,75	0,60
	Media	0,74	0,91	1,05	1,13	1,17	1,15	1,19	1,14	1,05	0,95	0,81	0,69
	Forte	0,83	0,97	1,05	1,09	1,10	1,10	1,10	1,08	1,05	0,97	0,87	0,78
Bratislava, SK 48°N	Debole	0,45	0,79	1,02	1,34	1,41	1,51	1,40	1,37	1,05	0,83	0,48	0,35
	Media	0,54	0,88	1,05	1,25	1,32	1,37	1,32	1,29	1,08	0,91	0,57	0,43
	Forte	0,65	0,94	1,06	1,18	1,23	1,24	1,23	1,21	1,08	0,95	0,67	0,54
Lione, FR 46°N	Debole	0,49	0,74	1,09	1,26	1,35	1,41	1,38	1,31	1,09	0,87	0,56	0,42
	Media	0,59	0,84	1,11	1,21	1,25	1,27	1,26	1,25	1,11	0,94	0,66	0,51
	Forte	0,70	0,92	1,10	1,14	1,17	1,16	1,17	1,17	1,10	0,98	0,76	0,63
Gavle, S 61°N	Debole	0,21	0,55	1,04	1,45	1,62	1,73	1,68	1,55	1,10	0,65	0,27	0,12
	Media	0,25	0,65	1,12	1,42	1,53	1,57	1,56	1,51	1,16	0,75	0,33	0,15
	Forte	0,32	0,77	1,17	1,35	1,44	1,44	1,45	1,42	1,19	0,84	0,42	0,19

5.1.2 Calcolo del fattore dipendente dall'occupazione F_0

Il fattore di occupazione F_0 correla l'utilizzo della potenza di illuminazione installata totale al periodo di occupazione del locale o della zona.

Questo risulta essere uguale ad 1 nei seguenti casi:

- Se l'illuminazione è attivata "centralmente", ovvero in più di un locale contemporaneamente (per esempio un singolo sistema automatico oppure con un temporizzatore o interruttore manuale per un intero edificio, o per un intero piano, o per tutti i corridoi ecc.). Questo si applica per qualsiasi tipo di "spegnimento" (automatico o manuale, centrale o per locale ecc.).

- Se l'area illuminata da un gruppo di apparecchi di illuminazione che sono attivati assieme (manualmente o automaticamente), è maggiore di 30 m².

Risulta al contrario minore di uno nei seguenti casi:

- nelle sale riunioni (qualsiasi sia l'area coperta da 1 interruttore e/o da un 1 rilevatore), quando non sono attivate "centralmente", ovvero assieme ad apparecchi di illuminazione in altre sale;
- in altre sale, se l'area illuminata da un apparecchio di illuminazione o da un gruppo di apparecchi di illuminazione che sono attivati assieme (manualmente o automaticamente), non è maggiore di 30 m² e se gli apparecchi di illuminazione sono tutti nello stesso locale. Inoltre, nel caso dei sistemi con rilevamento automatico di presenza e/o assenza l'area coperta dal rilevatore dovrebbe corrispondere strettamente all'area illuminata dagli apparecchi di illuminazione controllati da quel rilevatore.

In questi casi, F_O dovrebbe essere determinato come segue:

$$F_O = 1 - [(1 - F_{OC}) \times F_A / 0,2] \quad \text{Quando } 0,0 \leq F_A < 0,2 \quad (16)$$

$$F_O = F_{OC} + 0,2 - F_A \quad \text{Quando } 0,2 \leq F_A \leq 0,9 \quad (17)$$

$$F_O = [7 - (10 \times F_{OC})] \times (F_A - 1) \quad \text{Quando } 0,9 \leq F_A \leq 1,0 \quad (18)$$

Dove:

F_A è la proporzione del tempo nel quale lo spazio non è occupato.

F_{OC} è fissato in funzione del sistema di controllo dell'illuminazione

Di seguito si riportano valori tabellati di F_A e di F_{OC}

Tabella 5-4: valori di F_A

Calcolo complessivo per l'edificio		Calcolo locale per locale		
Tipo di edificio	F_A	Tipo di edificio	Tipo di locale	F_A
Edifici a scopo scolastico	0,2	Edifici scolastici	Aula	0,25
			Locale per attività di gruppo	0,3
			Corridoio (regolato)	0,6
			Locale comune junior	0,5
			Locale di lettura	0,4
			Locale personale	0,4
			Palestra	0,3
			Mensa	0,2
			Locale comune personale insegnante	0,4
			Locale fotocopie/magazzino	0,4
			Cucina	0,2
			Biblioteca	0,4

Tabella 5-5: valori di F_{OC}

Sistemi senza rilevamento automatico di presenza o assenza	F_{OC}
Accensione e spegnimento manuale	1,00
Accensione e spegnimento manuale + ulteriore segnale di spegnimento generale automatico	0,95
Sistemi con rilevamento automatico di presenza o assenza	F_{OC}
Accensione automatica/regolazione automatica	0,95
Accensione e spegnimento automatico	0,90
Accensione manuale, regolazione e spegnimento automatico	0,90
Accensione manuale e spegnimento automatico	0,80

5.1.3 Calcolo del fattore di illuminamento costante F_c

Il fattore di illuminamento costante è il rapporto tra la potenza di ingresso media in un momento indicato e la potenza di ingresso installata iniziale dell'apparecchio di illuminazione. Normalmente il momento è considerato come il periodo di un ciclo di manutenzione completo.

Pertanto:

$$F_c = (1 + MF)/2 \quad (19)$$

MF è il fattore di manutenzione dello schema (fattore ricavabile attraverso la IEC 97).

5.1.4 Valori di riferimento e fattori di progettazione illuminotecnica

La norma fornisce anche una serie di valori limite del LENI per diversa destinazione d'uso, diversa classe di qualità, e diverse strategie di automazione presenti nel locale.

Le classi di qualità vengono definite in base ai requisiti ottenuti all'interno del locale, come si può vedere nella tabella seguente:

Tabella 5-6: classe dei criteri di progettazione dell'illuminazione (come da norma)

	Classe dei criteri di progettazione dell'illuminazione		
	*	**	***
Illuminamento mantenuto sui compiti visivi orizzontali ($E_{m \text{ orizzontale}}$)	☑	☑	☑
Controllo appropriato dell'abbagliamento molesto (UGR)	☑	☑	☑
Prevenzione di sfarfallamento ed effetti stroboscopici	✓	✓	✓
Controllo appropriato di riflessioni velanti e abbagliamento riflesso		✓	✓
Resa migliorata del colore		☑	☑
Prevenzione delle ombre dure o delle luci troppo diffuse per fornire un buon modellato		✓	✓
Corretta distribuzione della luminanza nel locale ($E_{\text{verticale}}$)		✓	✓
Attenzione speciale alla comunicazione visiva con adeguato illuminamento dei volti ($E_{\text{cilindrica}}$)			✓
Attenzione speciale alle questioni legate alla salute (Nota)			✓
☑: In conformità ai valori richiesti dai prospetti 5.3 nella EN 12464-1:2002 ✓: In conformità ai requisiti descritti dalla EN 12464-1 Nota Le questioni legate alla salute possono anche richiedere illuminamenti molto superiori e quindi valori W/m^2 maggiori Il massimo carico di densità di potenza (PN) collegato alla classe di progettazione dell'illuminazione è indicato nel prospetto dei valori di riferimento F.1			

5.1.5 Valori predefiniti per il tempo operativo annuale $t_o = t_D + t_N$

La norma fornisce dei valori di riferimento del tempo operativo annuale e dei relativi tempo di utilizzo nelle ore diurne e notturne attraverso la tabella seguente

Tabella 5-7: tempo operativo annuale (come da norma)

Tipi di edificio	Orario operativo annuale predefinito		
	t_D	t_N	t_o
Uffici	2 250	250	2 500
Edifici scolastici	1 800	200	2 000
Ospedali	3 000	2 000	5 000
Hotel	3 000	2 000	5 000
Ristoranti	1 250	1 250	2 500
Impianti sportivi	2 000	2 000	4 000
Servizi per la vendita all'ingrosso e al dettaglio	3 000	2 000	5 000
Impianti di produzione	2 500	1 500	4 000
Nota Se necessario si possono sostituire valori nazionali			

5.2 Confronto tra UNI EN 15193 e ISO 10916

Le due norme prevedono un procedimento di calcolo praticamente analogo, ma rientrano fattori e parametri diversi, che vanno ad incidere in modo significativo sul risultato finale.

Di seguito si riportano le differenze riscontrate:

- Nel calcolo dell'energia totale stimata la norma UNI considera la somma tra il consumo energetico utilizzato per l'illuminazione ed il consumo di energia parassita dell'apparecchio d'illuminazione; la norma ISO invece considera una potenza al metro quadro. È difficile capire se si tiene conto della potenza parassita o meno.
- Nel calcolo del fattore di disponibilità di luce diurna F_{DS} la norma ISO considera sia il coefficiente di esposizione luminosa H_{dir}/H_{glob} , sia l'orientamento della parete esposta verso l'esterno.

Quindi i parametri che rientrano in gioco per determinare questo fattore sono:

- la latitudine γ
- Il clima, attraverso il rapporto H_{dir}/H_{glob}
- l'illuminamento medio mantenuto \bar{E}_m
- l'orientamento della facciata

Nella norma UNI invece rientrano solo la latitudine e l'illuminamento medio, che vengono utilizzati nella formula (13) assieme ai valori a e b tabellati.

La norma ISO quindi risulta più precisa e in grado di dare risultati più pertinenti alla reale situazione che si affronta

- Valori predefiniti per il tempo operativo annuale $t_o = t_D + t_N$

La norma UNI propone 1800 h di utilizzo giornaliero e 200 h di utilizzo notturno

La norma ISO propone 1400 h giornaliere e 0 notturne. Viene inoltre suggerito un metodo di calcolo per la determinazione delle ore effettive in caso di particolari destinazioni d'uso o particolari tempi di utilizzo.

Impostando tale calcolo, se non si tengono in considerazione le vacanze ma solo i weekend (5/7 giorni lavorativi) si ottengono 1825 ore giornaliere e 0 notturne. Andando invece a forzare il calcolo inserendo i 200 giorni canonici scolastici si ottengono circa 1400 ore giornaliere.

In realtà in una scuola è presente del personale anche al di fuori delle ore di lezione e quindi considerare 1400 ore risulta un po' basso. Di contro, seguendo il metodo proposto dalla norma UNI (1800 ore giornaliere e 200 notturne), si arriva ad una sovrastima del fabbisogno energetico per l'illuminazione.

5.3 Comfen 5

Tra le svariate funzionalità del software COMFEN c'è anche lo studio della parte di illuminazione e delle ricadute in termini energetici.

Per quel che riguarda l'illuminazione naturale il software è in grado di condurre un'analisi sia dei livelli di illuminamento medio all'interno del locale, sia dei discomfort visivi causati dall'abbagliamento. Il software COMFEN si appoggia a due software di simulazione per il calcolo del daylight ossia Energy Plus e Radiance.

È possibile effettuare simulazioni calcolate sull'intero anno oppure calcolate in un giorno e in un'ora prestabiliti. L'analisi dell'abbagliamento invece può essere condotta sia in regime di cielo coperto che di cielo sereno.

Dal punto di vista della luce artificiale invece, il software richiede come dato di input la densità di potenza elettrica installata nel locale, ovvero lo stesso dato richiesto dalla norma ISO 10916.

Per determinare ore e giorni di funzionamento degli apparecchi di illuminazione, il software fa riferimento a 6 schedule predeterminate, caratterizzanti diverse destinazioni d'uso:

- Ufficio
- Hotel
- Scuola
- Residenziale
- Negozio

Queste schedule sono preimpostate ma è comunque possibile andare a modificare i valori per adattarli alla propria situazione.

A questo punto, per calcolare il fabbisogno annuo di energia elettrica per l'illuminazione è necessario definire il sistema di controllo della luce.

Il software presenta 4 diverse tipologie:

- *None*: nessun controllo dell'illuminazione basato sulla disponibilità di luce diurna
- *Continuous*: controllo continuo della disponibilità di luce diurna; ne consegue una continua dimmerazione degli apparecchi
- *Continuous/Off*: controllo continuo della disponibilità di luce diurna; ne consegue uno spegnimento degli apparecchi quando si raggiunge un'illuminazione sufficiente
- *Stepped*: controllo e regolazione a step; man mano che si raggiungono dei livelli di illuminamento prestabiliti si modula la potenza degli apparecchi

5.4 DIALux 4.12

DIALux è un software per la progettazione illuminotecnica sia di locali che di spazi aperti.

Dalla versione 4.9 offre anche la possibilità di eseguire la valutazione energetica ai sensi della norma UNI EN 15193

Le proprietà del progetto e del locale (geometria, costruzioni adiacenti, posizione geografica ed esposizioni) vengono riconosciute dal software DIALux in automatico, analizzate e applicate per la valutazione energetica. Lo stesso vale per le finestre ed i lucernari. In particolare vengono calcolate in automatico le aree esposte alla luce diurna e quelle che non lo sono. La potenza allacciata delle lampade in opera viene desunta direttamente sulla base degli apparecchi inseriti nel progetto.

Al fine del calcolo è necessaria la scelta di una serie di parametri in funzione della destinazione d'uso, della tipologia di controllo, dell'occupazione suggeriti dal programma secondo la suddetta norma, tra cui:

- ore di esercizio di notte e giorni;
- fattore di esercizio parziale in funzione dell'illuminamento regolato;
- fattore di assenza e di efficienza del rilevamento presenza;
- scelta del sistema di controllo dell'illuminazione artificiale in funzione di quella naturale;
- valore di illuminamento medio desiderato sul piano di lavoro;

5.5 Confronto tra i risultati delle normative e del software Comfen

Al fine di verificare le differenze tra le due norme e i programmi di calcolo si sono modellati due casi base.

Il primo locale presenta le seguenti caratteristiche:

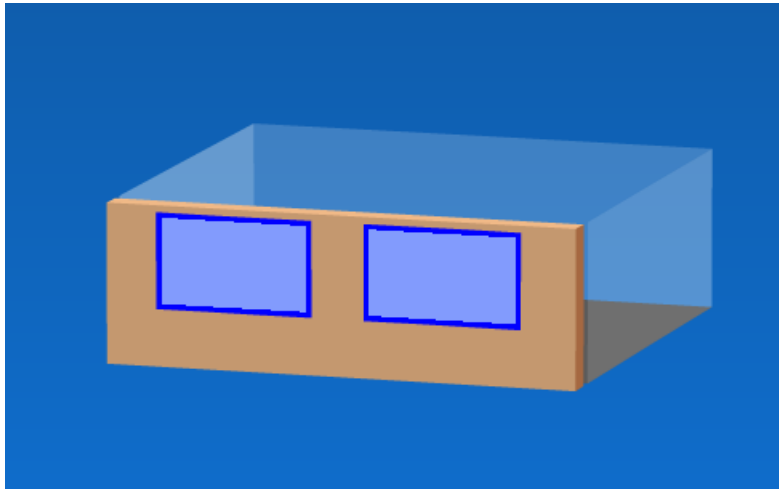


Immagine 5-4: locale di confronto 1

- Località: Milano

Al fine di avere un confronto il più giusto possibile si sono considerati i medesimi dati climatici. Dal file climatico di Energy Plus, utilizzato come input dal software Comfen, si sono quindi estrapolati i valori di H_{dir}/H_{glob} necessari per il procedimento proposto dalla ISO 10916;

- Destinazione d'uso: aula scolastica
- Larghezza locale: 9,0 metri;
- Profondità locale: 8,0 metri;
- Altezza locale: 3,0 metri;
- Esposizione parete finestrata: variabile;
- Dimensioni serramenti: 3,0 x 1,8 metri;
- Numero di serramenti: 2;
- Distanza tra serramenti: 2,0 metri;
- Tipo di vetratura: singola;

- Ostruzioni: nessuna;
- Apparecchi installati: 10 plafoniere 2x58W corrispondenti a 16,11 W/m² di potenza elettrica installata per unità di superficie;
- Illuminamento medio mantenuto: 300 lux;
- Controllo sistema di illuminazione: manuale/nessuno;
- Tipologia di accensione e spegnimento: manuale;
- Occupazione: si sono inizialmente mantenuti i valori proposti relativamente da ciascuna norma e dal software ossia:
 - UNI EN 15193: 1800 ore giornaliere e 200 ore notturne;
 - ISO 10916: 1400 ore giornaliere;
 - COMFEN: per determinare le ore di accensione degli apparecchi luminosi si è compilata la schedule per la destinazione d'uso scuole come segue:

Tabella 5-8: compilazione schedule illuminazione

Through: 6/30, !- Field 1	Through: 12/22, !- Field 23
For: Weekdays SummerDesignDay, !- Field 2	For: Weekdays SummerDesignDay,!- Field 24
Until: 08:00, !- Field 3	Until: 08:00, !- Field 25
0.0000, !- Field 4	0.0000, !- Field 26
Until: 15:00, !- Field 5	Until: 15:00, !- Field 27
1.0, !- Field 6	1.0, !- Field 28
Until: 24:00, !- Field 7	Until: 24:00, !- Field 29
0.0000, !- Field 8	0.0000, !- Field 30
For: AllOtherDays, !- Field 9	For: AllOtherDays, !- Field 31
Until: 24:00, !- Field 10	Until: 24:00, !- Field 32
0.0000, !- Field 11	0.0000, !- Field 33
Through: 9/1, !- Field 12	Through: 12/31, !- Field 34
For: Weekdays SummerDesignDay,!- Field 13	For: Weekdays SummerDesignDay,!- Field 35
Until: 08:00, !- Field 14	Until: 08:00, !- Field 36
0.0000, !- Field 15	0.0000, !- Field 37
Until: 15:00, !- Field 16	Until: 15:00, !- Field 38
0.0, !- Field 17	0.0, !- Field 38
Until: 24:00, !- Field 18	Until: 24:00, !- Field 40
0.0000, !- Field 19	0.0000, !- Field 41
For: AllOtherDays, !- Field 20	For: AllOtherDays, !- Field 42
Until: 24:00, !- Field 21	Until: 24:00, !- Field 43
0.0000, !- Field 22	0.0000; !- Field 44

Per la compilazione della schedule sopra riportata, si sono tenute in considerazione le chiusure degli edifici scolastici in estate nel mese di luglio e agosto e in inverno per le vacanze di Natale e Capodanno.

Si ottengono quindi 1428 ore di funzionamento, equivalenti a 7 ore per 204 giorni.

Come già evidenziato la norma UNI EN 15193 non considera le esposizioni, che sono invece considerate all'interno sia della norma ISO che del software Comfen.

Si procede quindi a determinare il fabbisogno elettrico per l'illuminazione considerando l'esposizione della parete finestrata nelle quattro direzioni principali.

Il primo caso considera una tipologia di controllo dell'illuminazione manuale per la norma UNI e la ISO. Non è invece presente nessun controllo per il software Comfen.

Tabella 5-9: risultati confronto locale 1 senza controllo illuminazione

	UNI EN 15193	ISO 10916	DIALux	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
Nord	24.75	18.69	24.75	23.01
Sud	24.75	18.24	24.75	23.01
Ovest	24.75	18.42	24.75	23.01
Est	24.75	18.42	24.75	23.01

Un passo successivo è quindi quello di provare a cambiare il sistema di controllo dell'illuminazione. Si opta quindi per un sistema di controllo dell'illuminazione continuo.

Tabella 5-10: risultati confronto locale 1 con controllo illuminazione continuo

	UNI EN 15193	ISO 10916	DIALux	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
Nord	14.01	15.55	14.01	13.80
Sud	14.01	14.71	14.01	13.20
Ovest	14.01	15.04	14.01	13.60
Est	14.01	15.04	14.01	13.36

Risultati diversi invece si ottengono nel caso si decida di installare un sistema di controllo del tipo Continuous/off. Questo tipo di regolazione, infatti, non è considerato all'interno del metodo proposto dalla norma UNI EN 15193. Al contrario, applicando la metodologia della norma ISO 10916, si ottengono valori ben diversi rispetto al software.

Tabella 5-11: risultati confronto locale 1 con controllo illuminazione continuo/off

	UNI EN 15193	ISO 10916	DIALux	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
Nord	-	14.86	-	3.0
Sud	-	13.93	-	1.4
Ovest	-	14.30	-	2.4
Est	-	14.30	-	1.8

Per verificare che la tendenza dei risultati sia mantenuta, si procede ad analizzare un altro esempio, aventi le seguenti caratteristiche:

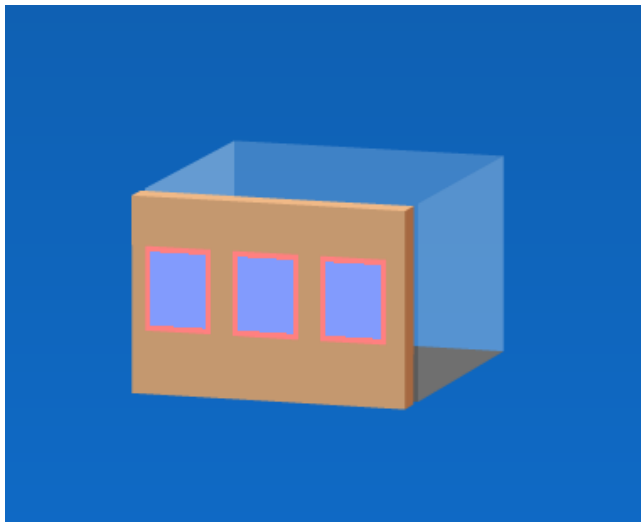


Immagine 5-5: locale di confronto 2

- Località: Milano;
- Destinazione d'uso: aula scolastica;
- Larghezza locale: 5,0 metri;
- Profondità locale: 5,0 metri;
- Altezza locale: 3,5 metri;
- Esposizione parete finestrata: variabile;
- Dimensioni serramenti: 1,2 x 1,5 metri;
- Numero di serramenti: 3;
- Distanza tra serramenti: 0,4 metri;

- Tipo di vetratura: singola;
- Ostruzioni: nessuna;
- Apparecchi installati: 20 W/m² di potenza elettrica installata per unità di superficie;
- Illuminamento medio mantenuto: 300 lux;
- Controllo sistema di illuminazione: manuale/nessuno;
- Tipologia di accensione e spegnimento: manuale;

Senza controllo illuminazione/controllo manuale:

Tabella 5-12: risultati confronto locale 2 senza controllo illuminazione

	UNI EN 15193	ISO 10916	DIALux	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
Nord	30,49	21,65	30,49	28,56
Sud	30,49	20,85	30,49	28,56
Ovest	30,49	21,17	30,49	28,56
Est	30,49	21,17	30,49	28,56

Con controllo dell'illuminazione continuo:

Tabella 5-13: risultati confronto locale 2 con controllo illuminazione continuo

	UNI EN 15193	ISO 10916	DIALux	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
Nord	17,15	16,19	17,15	16,66
Sud	17,15	14,72	17,15	16,19
Ovest	17,15	15,30	17,15	16,50
Est	17,15	15,30	17,15	16,29

Con controllo dell'illuminazione continuo/off:

Tabella 5-14: risultati confronto locale 2 con controllo illuminazione continuo/off

	UNI EN 15193	ISO 10916	DIALux	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
Nord	-	15,89	-	2,83
Sud	-	14,42	-	1,88
Ovest	-	15,03	-	2,47
Est	-	15,03	-	1,85

Dall'analisi dei risultati dei due esempi si possono fare le seguenti considerazioni:

- I risultati ottenuti dal software DIALux sono identici a quelli calcolati secondo la UNI 15193;
- I risultati del software Comfen in generale si avvicinano di più alla UNI 15193 piuttosto che alla ISO 10916;
- Nell'ipotesi di controllo manuale o nessuna controllo: il software si avvicina molto alla norma UNI, mentre la norma ISO presenta valori molto differenti. Questa differenza sta nel fatto che mentre il software considera gli apparecchi sempre accesi per le 1400 ore, la ISO prevede un possibile spegnimento manuale da parte degli utenti qualora ci un illuminamento sufficiente;
- Nell'ipotesi di controllo continuo: la differenza tra il software e la ISO è molto più ridotta e varia tra il 3 e il 9%;
- Nell'ipotesi di controllo continuous/off: la UNI non prevede questa tipologia; dalla ISO e Comfen si ottengono risultati completamente diversi. Molto probabilmente con lo stesso nome, considerano però tipologie diverse, che rendono impossibile il confronto.

Controllando gli output del programma e le considerazioni sulla norma ci si accorge che mentre il software dimmera la potenza degli apparecchi al variare dell'illuminamento fino poi a spegnerli quando si raggiunge l'illuminamento desiderato, la norma considera attivati gli apparecchi luminosi a pieno regime fino al raggiungimento della soglia impostata. Appare dunque sensato che la differenza risulti essere così significativa.

6 La temperatura interna estiva degli ambienti

L'obiettivo principale della Direttiva Europea 2012/27/UE è di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici.

In questo contesto si inseriscono una serie di normative recepite da UNI che si dimostrano essere un valido strumento a supporto dei progettisti che vogliono misurarsi sul percorso della riduzione dei consumi. Risulta importante innanzitutto studiare e progettare edifici con un valido comportamento passivo.

Una soluzione progettuale definita "passiva" contribuisce al risparmio energetico puntando sulla riduzione dei consumi di fonti primarie ottimizzando viceversa gli apporti gratuiti, naturalmente mantenendo un buon comfort interno degli ambienti. Per fare questo occorre valutare attentamente l'influenza e la correlazione di fattori quali forma, massa, trasmittanza termica dei componenti, percentuali di superfici vetrate e non.

Per valutare gli effetti di suddetti parametri si ricorre ad indicatori di prestazione rappresentativi del comfort interno quali, ad esempio, la temperatura dell'aria interna. I parametri che influenzano il comportamento dell'edificio, tuttavia, non sono legati esclusivamente alle sue caratteristiche fisiche o morfologiche, ma sono importanti per ovvi motivi anche i fattori climatici che determinano i carichi termici ai quali il sistema è sottoposto ed i potenziali apporti gratuiti.

In particolare è stata considerata ed analizzata la norma **UNI 10375:2011** per il calcolo della temperatura interna estiva di un ambiente non climatizzato.

Questo tipo di valutazione risulta particolarmente importante qualora si fosse alla ricerca delle migliori prestazioni termiche di un edificio passivo. L'assenza di qualsiasi impianto di climatizzazione conduce a risultati dipendenti esclusivamente dalla struttura edilizia. In questo modo è possibile collegare le prestazioni dell'edificio direttamente alle scelte progettuali e tecnologico-costruttive non più indipendenti dal contesto climatico in cui il sistema viene inserito.

I valori che si ottengono alla fine della procedura sono tre:

- temperatura oraria dell'aria interna;
- temperatura superficiale media oraria delle superfici interne degli elementi di involucro dell'ambiente in esame;
- temperatura operante interna oraria, definita come media aritmetica delle due temperature precedenti. Il parametro della temperatura operante (in seguito Top) è stato scelto quale migliore indicatore della situazione termica all'interno del locale considerato.

Questa norma costituisce un efficace strumento di valutazione in grado di valorizzare ed esplicitare i benefici di una progettazione accorta, rivolta a limitare sprechi e sovraconsumi energetici oltre che a favorire l'ottenimento di un più alto livello di confort interno.

Un'altra norma che tratta lo stesso tema è la **UNI EN ISO 13792:2012**, posteriore di circa 5 mesi rispetto la UNI 10375:2011.

La norma specifica i dati di input dei metodi di calcolo semplificati per determinare i valori giornalieri massimi, medi e minimi della temperatura operante di un locale in assenza di un impianto di climatizzazione.

I metodi di calcolo semplificati descritti sono due:

- metodo basato sulla rete di resistenze e capacità termiche (RC Three-nodes model)
- metodo delle ammettenze (Admittance procedure)

Questo secondo metodo è lo stesso descritto dalla UNI 10375 anche se con qualche differenza..

Un altro strumento utile a determinare la temperatura estiva in un locale privo di climatizzazione è il software Comfen che, contrariamente alle normative, propone un metodo di calcolo dinamico. Interessante sarà anche quindi verificare le differenze di risultati tra il metodo dinamico e statico e capire se i due metodi siano fra loro confrontabili. Di seguito viene proposto il calcolo della temperatura in un locale utilizzando sia il metodo delle ammettenze, proposto dalle normative (evidenziandone le differenze rilevate), sia il software Comfen.

6.1 UNI 10375: Metodo di calcolo della temperatura interna estiva

6.1.1 Calcolo della temperatura interna

La temperatura dell'aria interna di un ambiente, ad una determinata ora t , in assenza di impianto di climatizzazione è data dalla formula:

$$\theta_{ai,t} = \frac{\Phi_{T,0,t} + (Y_T - H_T) \times \theta_{ai,m}}{Y_T + c \times \dot{m}_t} \quad (1)$$

mentre la temperatura media giornaliera dell'aria interna è data da:

$$\theta_{ai,m} = \frac{\sum_{t=1}^{24} \frac{\Phi_{T,0,t}}{Y_T + c \times \dot{m}_t}}{24 - (Y_T - H_T) \sum_{t=1}^{24} \frac{1}{Y_T + c \times \dot{m}_t}} \quad (2)$$

Dove:

- $\Phi_{T,0,t}$ è il carico termico dell'ambiente all'ora t
- Y_T è l'ammettenza globale della struttura [W/K]
- H_T è il coefficiente di trasmissione termico globale della struttura edilizia [W/K]
- c è la capacità massica dell'aria esterna pari a 1005 J/(Kg K)
- \dot{m}_t è la portata di massa d'aria di ventilazione

6.1.1.1 Carico termico dell'ambiente

Il carico termico dell'ambiente all'ora t è dato da

$$\Phi_{T,0,t} = f_c \times \Phi_{co,0,t} + f_r \times \Phi_{r,t} + \Phi_{v,0,t} + \Phi_{i,c,t} + \Phi_{sv,t} \quad (3)$$

Dove:

- $\Phi_{co,0,t}$ è il flusso termico trasmesso attraverso gli elementi d'involucro esterni, all'ora t
- $\Phi_{r,t}$ è il flusso termico dovuto alla radiazione solare entrante direttamente attraverso le superfici finestrate e alla parte radiativa degli apporti interni all'ora t ;
- f_c è un fattore di correzione;
- f_r è un fattore di correzione;
- $\Phi_{v,0,t}$ è il contributo al carico termico dovuto al flusso termico di ventilazione, all'ora t
- $\Phi_{i,c,t}$ è il contributo convettivo al carico termico dovuto agli apporti interni all'ora t ;

$\Phi_{sv,t}$ è il contributo al carico termico relativo al fattore di trasmissione dell'energia solare per ventilazione delle superfici vetrate g_v .

Flusso termico di trasmissione attraverso gli elementi d'involucro esterni

Il flusso termico di trasmissione attraverso gli elementi d'involucro esterni, ad ogni ora t è dato da:

$$\Phi_{co,0,t} = \sum_{j=1}^p (\Phi_{op,0,t})_j + \sum_{j=1}^w (\Phi_{w,0,t})_j \quad (4)$$

dove:

p è il numero di elementi esterni opachi;

w è il numero di elementi esterni finestrati;

$\Phi_{op,0,t}$ è il flusso termico dovuto alla trasmissione termica attraverso gli elementi opachi, all'ora t

$\Phi_{w,0,t}$ è il flusso termico dovuto alla trasmissione termica attraverso le superfici finestate, all'ora t

Il flusso termico dovuto alla trasmissione termica attraverso ciascun elemento opaco dell'involucro è dato da:

$$\Phi_{op,0,t} = U^* A \times [(\theta_{e,t-|\Delta t_f|} - \theta_{e,m}) \times f + \theta_{e,m}] \quad (5)$$

dove:

U^* è la trasmittanza termica estiva dell'elemento d'involucro;

A è l'area interna dell'elemento d'involucro;

$\theta_{e,t-|\Delta t_f|}$ è la temperatura esterna relativa all'ora $(t - |\Delta t_f|)$;

Δt_f è il ritardo temporale dell'onda termica in ore; esso si calcola come:

$$\Delta t_f = \left[\frac{12}{\pi} \arg(Y_{12}) \right] \quad (6)$$

$\theta_{e,m}$ è la media giornaliera delle $\theta_{e,t}$;

f il fattore di decremento del flusso termico definito come rapporto tra il modulo della trasmittanza termica periodica e la trasmittanza U^*

$$f = \frac{|Y_{12}|}{U^*} \quad U^* = \frac{1}{\frac{1}{U} - 0,17 + R_{si} + R_{se}} \quad (7) (8)$$

Il flusso termico per trasmissione attraverso i componenti finestrati, ad ogni ora t , è dato da:

$$\Phi_{w,0,t} = A(U^* \times \theta_{e,t} + q_i \times I_t \times f_{s,t} + q_{er} \times U^* \times R_{se}) \quad (9)$$

dove:

- A è l'area della superficie interna del componente finestrato;
- U^* è la trasmittanza termica estiva del componente da calcolarsi mediante la (8);
- $\theta_{e,t}$ è la temperatura esterna, all'ora t ;
- q_i è il fattore di trasmissione secondaria dell'energia solare (UNI EN 410 e UNI EN 13363-1);
- I_t è l'irradianza solare incidente sull'elemento dell'involucro considerato desunta dalla UNI 10349, all'ora t ;
- $f_{s,t}$ è il fattore di ombreggiamento all'ora t ;
- $q_{er,t}$ è la densità di flusso termico radiativo scambiato, all'ora t , con la superficie esterna dalla volta celeste (vedere appendice F della UNI EN ISO 13791:2005).

La temperatura esterna richiesta dalle (5) alle (9) è data da:

- elementi d'involucro opachi disperdenti verso l'ambiente esterno:

$$\theta_{e,t} = \theta_{ae,t} + g \times I_t \times f_{s,t} / U^* + q_{er,t} \times R_{se} \quad (13)$$

dove:

- $\theta_{ae,t}$ è la temperatura dell'aria esterna all'ora t ,
- g è il fattore di trasmissione dell'energia solare,
- I_t è l'irradianza solare incidente sulla superficie esterna dell'elemento d'involucro considerato (UNI 10349), all'ora t ,
- R_{se} è la resistenza termica superficiale esterna,
- $q_{er,t}$ è la densità di flusso termico radiativo scambiato con la superficie esterna dalla volta celeste calcolabile con la (10)

- componenti finestrati affacciati all'ambiente esterno:

$$\theta_{e,t} = \theta_{ae,t} \quad (14)$$

- elementi d'involucro esterni affacciati su altri ambienti a temperatura fissata e diversa da quella dell'ambiente in esame:

$$\theta_{e,t} = \theta_{ad,t} \quad (15)$$

con $\theta_{ad,t}$ temperatura dell'aria dell'ambiente adiacente, all'ora t .

I coefficienti di correzione f_c ed f_r sono dati da:

$$\begin{aligned} f_c &= 1 - 0,194 \times U_m^* + 0,021 \times (U_m^*)^2 \\ f_r &= 1 - 0,320 \times U_m^* + 0,030 \times (U_m^*)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

dove:

U_m^* è la trasmittanza media estiva della struttura edilizia data da:

$$U_m^* = \frac{\sum_{j=1}^d U_j^* \times A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad (20)$$

dove:

d è il numero d'elementi d'involucro esterni;

n è il numero totale d'elementi d'involucro;

A_j è l'area del j-esimo elemento dell'involucro;

U*_j è la trasmittanza termica estiva del j-esimo elemento dell'involucro disperdente

Flusso termico radiativo

Il flusso termico ad ogni ora t, dovuto alla radiazione solare entrante direttamente attraverso le superfici finestrate e alla parte radiativa degli apporti interni si calcola come:

$$\Phi_{r,t} = F_{sm} [(\Phi_{er,t} - \Phi_{er,m}) + (\Phi_{i,r,t} - \Phi_{i,r,m})] + \Phi_{er,m} + \Phi_{i,r,m} \quad (21)$$

Dove:

F_{sm} è il fattore di superficie interno medio della struttura edilizia;

Φ_{er,t} è il flusso termico all'ora t dovuto alla radiazione solare entrante direttamente attraverso le finestre;

Φ_{er,m} è il flusso termico medio giornaliero dovuto alla radiazione solare entrante direttamente attraverso le finestre;

Φ_{i,r,t} è la parte radiativa all'ora t, degli apporti interni;

Φ_{i,r,m} è il valor medio giornaliero della parte radiativa degli apporti interni.

Il fattore di superficie medio della struttura edilizia F_{sm} è dato da:

$$F_{sm} = \left| \frac{\sum_{j=1}^n F_{s,j} A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \right| \quad (22)$$

Gli elementi da introdurre nelle sommatorie che compaiono nella (22) sono tutti quelli che racchiudono l'ambiente. Il valore del fattore di superficie F_s degli elementi finestrati è nullo; quello di ciascun elemento opaco si calcola nel modo seguente:

- elementi d'involucro esterni:

$$F_s = 1 + R_{s,i} \frac{Z_{11}}{Z_{12}}$$

– elementi d'involucro interni

$$F_s = 1 + R_{s,i} \left(\frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right)$$

dove:

$R_{s,i}$ è la resistenza superficiale interna; per la convenzione assunta pari a $0,125 \text{ (m}^2 \times \text{K)/W}$
 Z_{11}, Z_{12} sono componenti della matrice di trasferimento del calore secondo la UNI EN ISO 13786.

Il valore del flusso termico dovuto alla radiazione solare entrante, all'ora t , si calcola come:

$$\Phi_{er,t} = f_t \sum_{j=1}^W (A \times I_t \times \tau_{e,T} \times f_{s,t} \times f_{e,s})_j \quad (23)$$

Dove:

f_t è il fattore di telaio (assunto convenzionalmente pari a 0,9);
 w è il numero di componenti finestrati affacciati all'ambiente esterno;
 A è l'area di ciascun componente finestrato;
 I_t è l'irradianza solare totale incidente sulla superficie esterna di ciascun componente, all'ora t ;
 $\tau_{e,T}$ è il coefficiente di trasmissione solare globale di ciascun componente inclusa l'influenza di eventuali schermature interne ed esterne;
 $f_{s,t}$ è il fattore di ombreggiamento all'ora t ;
 f_{es} è il fattore di esposizione solare.

Il flusso termico medio giornaliero $\Phi_{er,m}$ è dato da:

$$\Phi_{er,m} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \Phi_{er,t} \quad (24)$$

Il valore del flusso termico dovuto alla parte radiativa degli apporti interni, all'ora t , si calcola come:

$$\Phi_{i,r,t} = \sum_{j=1}^r \Phi_{i,r,t,j}$$

Il valor medio giornaliero del flusso radiativo interno è dato da:

$$\Phi_{i,r,m} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \Phi_{i,r,t} \quad (25)$$

Carico termico di ventilazione

Il contributo al carico termico dovuto all'aria di ventilazione all'ora t , è dato da:

$$\Phi_{v,0,t} = c \times \dot{m}_t \times \theta_{man,t} \quad (26)$$

dove:

- c è la capacità termica massica dell'aria esterna;
- \dot{m}_t è la portata di massa d'aria di ventilazione, in kilogrammi al secondo (la densità dell'aria è assunta pari a 1,177 kg/m³);
- $\theta_{man,t}$ è la temperatura dell'aria di mandata all'ora t ; in assenza di impianto di ventilazione la temperatura di mandata coincide con la temperatura dell'aria esterna.

Carico termico dovuto al contributo convettivo delle sorgenti interne di energia

Il valore del carico termico dovuto agli apporti interni, all'ora t , si calcola come:

$$\Phi_{i,c,t} = \sum_{j=1}^q \Phi_{i,c,t,j} \quad (27)$$

dove:

- q è il numero di sorgenti interne convettive;
- $\Phi_{i,c,t,j}$ è il flusso termico convettivo all'ora t corrispondente alla generica sorgente j .

Carico termico dovuto alla trasmissione per ventilazione delle superfici finestrate

Il carico termico dovuto al fattore di trasmissione per ventilazione delle superfici finestrate g_v è dato da:

$$\Phi_{sv,t} = \sum_{j=1}^w (A \times g_v \times f_{s,t} \times I_t)_j$$

dove:

- w è il numero di componenti finestrati;
- A è l'area di ciascun componente;
- g_v è il fattore di trasmissione per ventilazione di ciascun componente;
- $f_{s,t}$ è il fattore di ombreggiamento, all'ora t , relativo a ciascun componente;
- I_t è l'irradianza solare totale all'ora t ;

6.1.1.2 Determinazione dei parametri di trasmissione H_T , Y_T

Il coefficiente di trasmissione termica globale H_T è dato da:

$$H_T = f_c \times \sum_1^d (U_j A_j) \quad (28)$$

dove:

d è il numero di elementi d'involucro disperdenti;

f_c è il coefficiente di correzione dato dalla (19).

L'ammittenza termica globale della struttura Y_T , in W/K, è data da:

$$Y_T = \left| \sum_{j=1}^n Y_{11,j} \times A_j \right| \quad (29)$$

dove:

n è il numero complessivo di elementi d'involucro;

$Y_{11,j}$ è l'ammittenza interna dell'elemento d'involucro j -esimo;

A_j è l'area del j -esimo elemento dell'involucro.

I valori delle ammettenze per gli elementi opachi si calcolano utilizzando la matrice di trasferimento termico ed in particolare per:

- elementi d'involucro esterni

$$Y_{11} = \frac{Z_{11}}{Z_{12}}$$

- elementi d'involucro interni

$$Y_{11} = \frac{1 - Z_{11}}{Z_{12}}$$

- per le finestre

$$Y_w = \frac{1}{1/U_w + 0,1}$$

6.1.2 Determinazione della temperatura media radiante dell'involucro

La temperatura media radiante degli elementi d'involucro è data da:

$$\theta_{mr,t} = \frac{\frac{\theta_{ai,t}}{R_{ci}} \times \sum_{j=1}^n A_j + c \times \dot{m}_t (\theta_{ai,t} - \theta_{man,t}) - \Phi_{i,c,t} - \Phi_{sv,t}}{\sum_{j=1}^n \frac{A_j}{R_{ci}}} \quad (30)$$

dove:

n è il numero complessivo di elementi d'involucro;

A_j è l'area del j -esimo elemento dell'involucro;

R_{ci} è la resistenza convettiva interna (assunta pari a $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$).

6.1.3 Determinazione della temperatura operante interna

La temperatura operante interna dell'ambiente, all'ora t , è data da:

$$\theta_{o,t} = \frac{\theta_{ai,t} + \theta_{mr,t}}{2} \quad (31)$$

6.2 UNI EN ISO 13792: differenze con la UNI 10375

Come precedentemente anticipato, nel Maggio 2012 è stata pubblicata un'altra norma riguardante in calcolo della temperatura estiva, la UNI EN ISO 13792.

Tra i due metodi di calcolo proposti nella suddetta norma, c'è il metodo delle ammettenze che è lo stesso proposto nella norma UNI 10375.

Nonostante questa uniformità di metodo, dall'esempio di calcolo proposto dalle normative sul medesimo edificio e con le medesime condizioni ambientali si ottengono valori di temperatura interna diversi.

Andando quindi a studiare approfonditamente la ISO 13792 si sono riscontrate le seguenti differenze con la UNI 10375:

- nelle caratteristiche dell'aria viene proposto un valore di capacità termica pari ai 1008 J/(kg K) a differenza dei 1005 J/(kg K)
- si considera la resistenza superficiale interna dei componenti pari a 0,22 m²K/W contro 0,125 m²K/W
- in tutte le formule dei carichi termici per ventilazione compare la trasmittanza termica U, mentre nella UNI 10375 compare la trasmittanza termica estiva U*
- nel calcolo del flusso termico per trasmissione attraverso i componenti finestrati è presente un segno diverso

$$\Phi_{w,t} = A \left(U \theta_{ae,t} + S_{f2} I_{sr} - \frac{U q_{lr}}{h_e} \right)$$

$$\Phi_{w,0,t} = A (U^* \times \theta_{e,t} + q_i \times l_t \times f_{s,t} + q_{er} \times U^* \times R_{se})$$

- nel calcolo della temperatura esterna dei componenti opachi è presente un segno diverso, come per il punto precedente

$$\theta_{e,t} = \theta_{ae,t} + \frac{I_{sr} S_f}{U} - \frac{q_{lr}}{h_e}$$

$$\theta_{e,t} = \theta_{ae,t} + g \times l_t \times f_{s,t} / U^* + q_{er,t} \times R_{ee}$$

6.3 Confronto tra i risultati della UNI 10375 e del software Comfen

Come precedentemente detto, anche il software Comfen permette di determinare la temperatura interna nei locali, in assenza di un impianto di climatizzazione.

A differenza della normativa, però, il software prevede un calcolo di tipo dinamico.

Di seguito si riporta il calcolo effettuato su un locale per determinare se le due tipologie di calcolo possano essere confrontate.

Per semplicità si tratta del locale avente la stessa geometria dell'esempio proposto dalla normativa, in cui però è stato eliminato lo schermo al serramento e sono state variate le stratigrafie dei componenti d'involucro.

L'involucro è costituito da una muratura a cassa vuota e un serramento a battente in alluminio senza taglio termico con vetro singolo da 6 mm. Per i carichi interni sono state considerate una potenza elettrica per l'illuminazione di 10 W/m^2 , un carico per le apparecchiature di 5 W/m^2 e un'occupazione di 8 persone.

Un parametro che è difficile da paragonare tra la norma e il software riguarda i ricambi per la ventilazione. A differenza del metodo statico in cui si inseriscono i valori di ricambi ora di giorno e di notte, il metodo dinamico del software modula questi valori in base alle condizioni ambiente.

In particolare nel valutare il comportamento della ventilazione naturale il software presenta una serie di input fissi ossia:

- l'apertura delle finestre è considerata completamente automatizzata e non è possibile inserire le modalità con cui gli occupanti si comportano;
- il raffrescamento è disabilitato in presenza di questo tipo di ventilazione;
- l'apertura delle finestre non considera l'eventuale presenza di schermature interne o esterne nel calcolo dei flussi d'aria;
- le temperature per garantire il comfort termico in estate sono le stesse ipotizzate; per la presenza di raffrescamento meccanico, ossia 26°C nelle ore di occupazione;
- il locale è situato a 10 metri di altezza dal terreno, ossia al quarto piano di un edificio a stecca con larghezza tre volte maggiore dell'altezza
- l'edificio è di dimensioni squadrate ed è localizzato in un'area suburbana;

In particolare la procedura di apertura delle finestre segue le seguenti prescrizioni:

- le finestre si aprono quando internamente si superano i 23°C
- una volta aperte la percentuale di apertura delle finestre viene regolata per evitare discomfort termici dovuti all'aria esterna fredda. In particolare si considera il ΔT tra interno ed esterno e si modula l'apertura come segue:
 - $\Delta T \leq 5$ °C apertura al 100%
 - $5 < \Delta T < 15$ apertura tra 100% e 30%
 - $\Delta T \geq 15$ °C apertura al 30%
- per prevenire discomfort l'apertura viene modulata affinché la velocità dell'aria non superi 1 m/s

Risulta quindi difficile capire quale sia il valore corretto da inserire nella norma.

Nell'appendice A della normativa sono suggeriti dei valori di ricambi ora in dipendenza del valore S_a , della presenza di serramenti su più lati e dell'apertura dei serramenti durante le ore giornaliere o notturne.

Il valore S_a rappresenta la percentuale di serramento apribile. È un parametro governabile dal software. In particolare le percentuali di apertura dipendono dalla tipologia di serramento installato e sono riportate nell'Immagine 6-1.

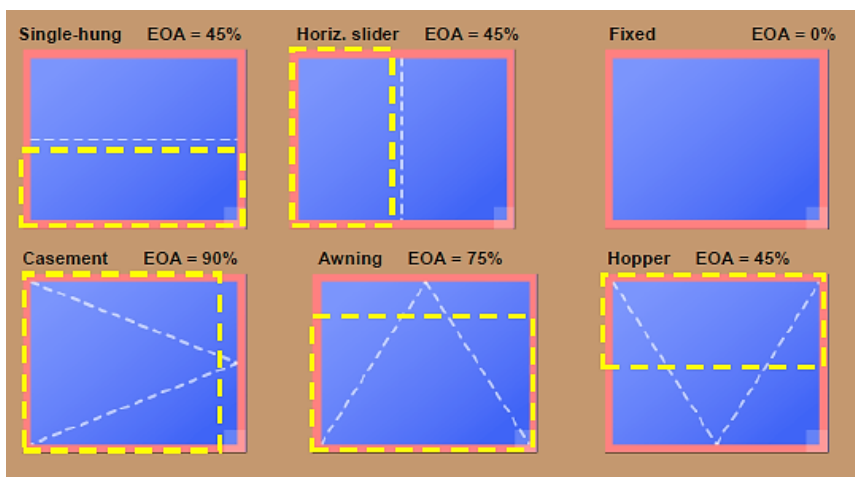


Immagine 6-1: percentuali di apertura a seconda della tipologia di serramento (immagine tratta dal Manuale di Comfen)

Nell'esempio è stata modellato un serramento apribile a battenti a cui corrisponde una percentuale di area del 90%.

I valori relativi ai ricambi d'aria di un locale con finestre su un lato, aperte di giorno e di notte, sono riportate nella Tabella 6-1. In particolare il valore di ricambi ora assunti equivale a 3.

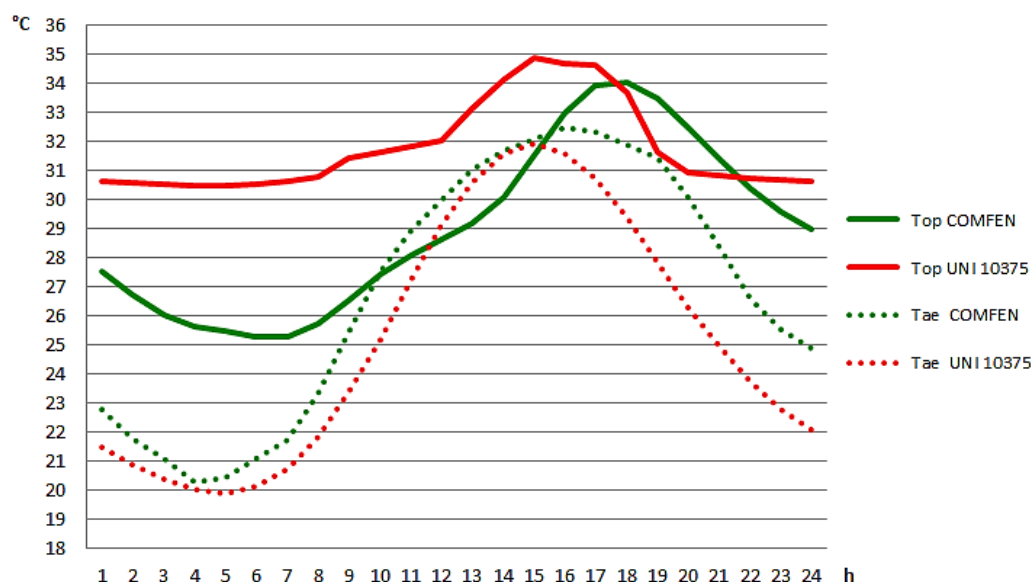
Tabella 6-1: valori di ricambi ora da normativa

finestra aperta giorno e notte			
Sa	0.1	0.5	0.9
N ricambi ora	0.5	1.5	3

Così facendo si ottiene dal software un valore massimo di temperatura operante interna pari a 34 °C mentre dal calcolo previsto dalla normativa pari a 34.9°C

Di seguito si riporta anche l'andamento giornaliero della temperatura nel giorno più caldo in relazione all'andamento della temperatura dell'aria esterna.

Grafico 6-1: confronto andamento temperatura operante interna



Benché il valore di temperatura massima è simile tra i risultati della normativa e del software, si può notare come l'andamento nel corso della giornata presenti grandi

differenze. Mentre coi risultati della norma la temperatura non si abbassa mai sotto i 30°C, con il software tra le 6 e le 7 di mattina si abbassa fino a poco più di 25°C. Inoltre si può notare come il picco delle temperature risulti traslato di 2 ore.

Altro elemento che rende questo confronto difficile riguarda la differenza di dati climatici. In particolare nel Grafico 6-1 si può notare i valori di temperatura dell'aria esterna nel giorno più caldo siano diversi. Discorso analogo vale per i valori di Irradianza che considerano due database climatici differenti.

Il confronto tra la normativa, che prevede un calcolo statico della temperatura interna dei locali, e il software che invece esegue un'analisi dinamica risulta dunque essere difficilmente applicabile.

7 I modelli analizzati nelle simulazioni

Al fine di valutare il fabbisogno energetico dell'edificio scolastico ci si è soffermati sull'analisi di un singolo locale, corrispondente ad un'aula scolastica.

Come strumento per il calcolo è stato scelto il software Comfen a causa delle sue potenzialità.

Nella Tabella 7-1 e nella Tabella 7-2 vengono riportati i parametri analizzati. Al fine di ridurre il numero di combinazioni da analizzare, si è scelto di considerare una serie di parametri fissi, nonché una serie di ipotesi iniziali, nel seguito specificate.

- Località: Milano;
- assenza di ostruzioni esterne dovuti ad altri edifici o a elementi esterni come alberi;
- parete con serramento come unico componente verso l'esterno (le altre superfici che compongono l'aula sono dunque considerate adiabatiche);
- serramenti apribili a battenti;
- occupazione dell'aula dalle 8:00 alle 15:00: l'eventuale personale presente dopo le 15:00 è considerato influente ai fini delle simulazioni.

Nella Tabella 7-1 vengono elencati i parametri mantenuti fissi nel corso delle simulazioni.

Tabella 7-1: parametri fissi modello

Parametro fisso	Valore	Unità di misura
Altezza interna locale	3,5	metri
Altezza parapetto	1,1	metri
Profondità imbotte serramenti	0,10	metri
Modularità elemento finestrato	1,2 x 1,5	metri
Profondità degli aggetti	0,80	metri
Spessore degli aggetti	0,10	metri
Carico termico apparecchiature installate	5	W/m ²
Occupazione aula	2	Alunni/m ²
Aria di rinnovo	0,006	m ³ /s a persona
Infiltrazioni notturne	0,15	Ricambi/ora

I parametri variabili invece considerano caratteristiche prettamente geometriche, prestazioni dell'involucro e caratteristiche relative agli impianti.

Tabella 7-2: parametri variabili modello

	Parametro variabile	simbolo	Valore esistente	UdM
1	Geometria aula (dimensioni in pianta)	G	5 x 5 7 x 7 9 x 5	metri
2	Esposizione	E	Sud Ovest	
3	Percentuale area finestrata	Af	30% 50%	
4	Materiale del telaio	Mt	Alluminio no TT Legno	
5	Vetrazione		Vetro singolo Vetro doppio	
6	Schermature		Tenda interna Veneziana interna Veneziana esterna	
7	Aggetti		Nessuno Aggetto orizzontale O Aggetti verticali V Combinazione O+V	
8	Trasmittanza parete	U	1,19 0,31	W/(m ² K)
9	Potenza elettrica installata	Pi	10 20	W/m ²
10	Controllo illuminazione	CI	Nessuno Continuous/off	
11	Ventilazione		Meccanica Naturale	

7.1 Considerazioni sui parametri scelti

La scelta dei parametri deriva da opportune considerazioni, nel seguito riportate .

7.1.1 Geometria aula

Per determinare le dimensioni dell'aula scolastica è stata effettuata innanzitutto una ricerca in merito alle dimensioni delle scuole (e delle aule) esistenti. In particolare si è scelto di simulare un'aula compatta di piccole dimensioni (5x5) che possa rispecchiare, ad esempio, le caratteristiche di un'aula di asilo, un'aula sempre compatta ma più grande (7x7) ed infine un'aula in cui la larghezza della facciata è più elevata della sua profondità (9x5).

È stato in seguito determinato il numero di alunni che possano occupare quella superficie secondo il D.M. 18 dicembre 1975 *“Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica”*.

Il D.M. prevede, fra gli altri standard, una superficie di 1,8 m² per allievo nelle scuole dell'infanzia, primaria e secondaria di primo grado e di 1,96 m² per allievo nelle scuole secondarie di secondo grado.

Andando a determinare quindi il numero di alunni che possano occupare le aule si ottengono 13 alunni per l'aula 5x5 metri, 25 per l'aula di 7x7 metri e 23 per l'aula di 9x5 metri. Questi valori di occupazione sono stati calcolati mantenendo 2 m² per alunno.

7.1.2 Esposizione

Per lo scopo proposto dallo studio come prima cosa si è deciso di non considerare l'esposizione Nord in quanto risulta poco significativa per capire la funzionalità degli elementi schermanti, degli aggetti e per la valutazione del fabbisogno per il cooling e della temperatura estiva interna del locale.

Si è inoltre scelto di considerare una sola esposizione tra l'Est e l'Ovest, in modo da ridurre il numero di simulazioni, eseguendo alcune simulazioni su casi particolari.

Il confronto è stato eseguito sul locale avente geometria 5x5 metri, con una potenza elettrica installata di 10 W/m² e con un serramento in alluminio con vetro singolo e con una tenda interna. Oltre a far variare l'esposizione, si è fatta variare l'aggetto esterno e la presenza o meno del controllo dell'illuminazione.

In particolare si sono ottenuti i seguenti risultati:

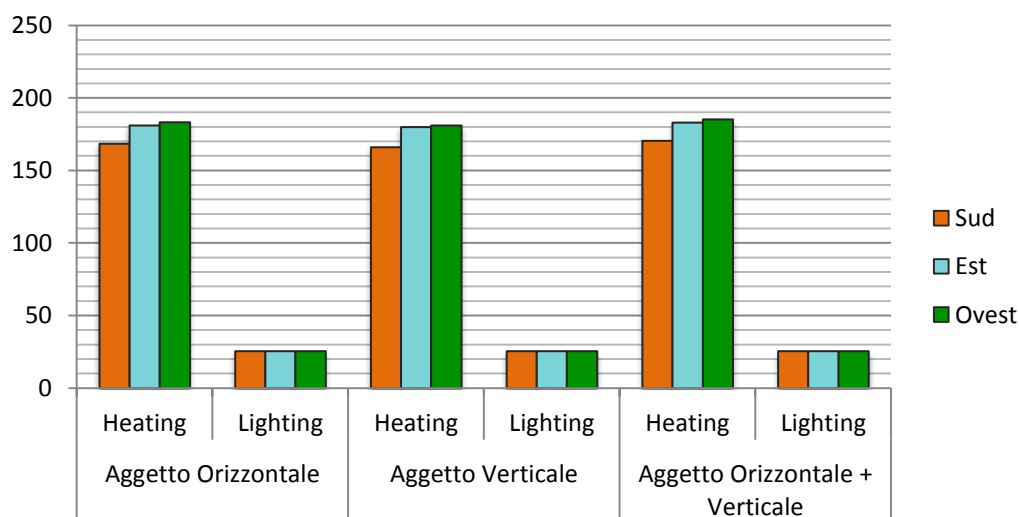
Tabella 7-3: risultati confronto esposizioni

Orientation	Aggetto	Senza controllo		Controllo Continuo	
		Heating (kWh/m ² -yr)	Lighting (kWh/m ² -yr)	Heating (kWh/m ² -yr)	Lighting (kWh/m ² -yr)
S	Orizzontale	168.4	25.5	174.8	12.5
E		181.0	25.5	188.2	12.4
W		183.3	25.5	189.9	12.8
S	Verticale	166.1	25.5	171.8	13.2
E		180.0	25.5	186.6	13.1
W		181.0	25.5	187.5	13.7
S	Orizzontale e verticale	170.5	25.5	176.8	12.8
E		183.1	25.5	189.9	13.2
W		185.3	25.5	191.4	13.8

I valori di heating e lighting riportati sono rispettivamente il fabbisogno annuo di energia termica per riscaldare e il fabbisogno annuo di energia elettrica per illuminare, non tengono conto quindi del vettore energetico.

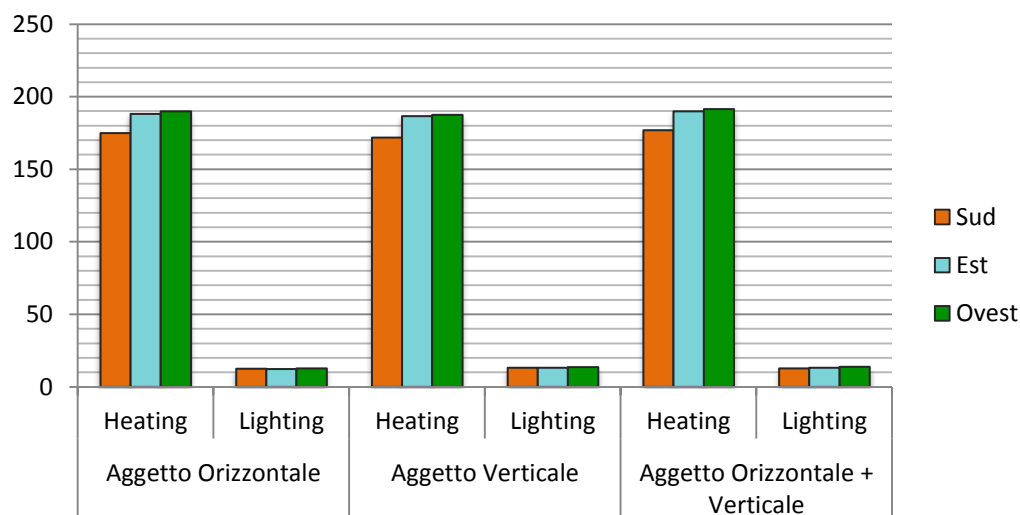
Vedendo i risultati dal punto di vista grafico:

Grafico 7-1: risultati confronto esposizioni senza controllo



Con il controllo dell'illuminazione continuo:

Grafico 7-2: risultati confronto esposizioni con controllo illuminazione continuo



Dai risultati sopra riportati si può osservare che tra l'esposizione Est e l'esposizione Ovest i valori cambiano in maniera poco significativa, per tutti i diversi scenari, con differenze tra l'1 e il 2 per cento, quindi la scelta di considerare solo un'esposizione, benché riduttiva, risulta ragionevole.

7.1.3 Percentuale finestrata

Per la definizione della percentuale finestrata (rispetto alla superficie di facciata) dell'aula tipo si è considerato il 30% e il 50%, valori ritenuti ragionevoli rispetto alle caratteristiche delle scuole esistenti. Come ulteriore verifica si è anche calcolato il rapporto aerante e si sono ottenuti i valori nella seguente tabella:

Tabella 7-4: calcolo della percentuale finestrata. Verifica RA

RAI		Dimensioni aula		
		5x5	7x7	9x5
% Af	30%	0,22	0,15	0,21
	50%	0,35	0,25	0,35

Come si può vedere dai risultati tutte le configurazioni sono maggiori del valore prescritto dalla normativa pari a $1/8 = 0,125$.

A questo punto si è studiato quali potessero essere le dimensioni dei serramenti.

Per lo scenario con il 30% di superficie finestrata si sono ipotizzati serramenti larghi 1,2 e alti 1,5 metri, a battente. Per lo scenario con il 50% di superficie finestrata invece, si sono ipotizzati serramenti larghi 1,2 e alti 2,2 metri, a battente. Questa differenza di modulo è stata dettata dalla necessità di ridurre il numero delle finestre nel secondo scenario, numero che altrimenti andava ad essere troppo elevato rispetto alle dimensioni della facciata. Ad esempio per la facciata larga 9 metri sarebbero state necessarie 9 finestre larghe 1,2 metri e alte 1,5.

Nel creare il layout delle finestre all'interno della facciata si è assunta l'ipotesi che le finestre non siano a nastro, ma siano distanziate l'una dall'altra, con distanze pari a 30 o 40 cm.

Tabella 7-5: configurazione dei serramenti

	Area finestrata 30%	Area finestrata 50%
Locale 5x5	<p>Diagram showing the configuration of windows for a 5x5 room with 30% windowed area. The facade width is 500 cm and height is 350 cm. Three windows are arranged horizontally, each 120 cm wide and 150 cm high. Spacing between windows is 40 cm, and from the edges is 30 cm.</p>	<p>Diagram showing the configuration of windows for a 5x5 room with 50% windowed area. The facade width is 500 cm and height is 350 cm. Three windows are arranged horizontally, each 120 cm wide and 220 cm high. Spacing between windows is 40 cm, and from the edges is 30 cm.</p>
Locale 7x7	<p>Diagram showing the configuration of windows for a 7x7 room with 30% windowed area. The facade width is 700 cm and height is 350 cm. Four windows are arranged horizontally, each 120 cm wide and 150 cm high. Spacing between windows is 40 cm, and from the edges is 50 cm.</p>	<p>Diagram showing the configuration of windows for a 7x7 room with 50% windowed area. The facade width is 700 cm and height is 350 cm. Seven windows are arranged horizontally, each 120 cm wide and 220 cm high. Spacing between windows is 30 cm, and from the edges is 20 cm.</p>
Locale 9x5	<p>Diagram showing the configuration of windows for a 9x5 room with 30% windowed area. The facade width is 900 cm and height is 350 cm. Five windows are arranged horizontally, each 120 cm wide and 150 cm high. Spacing between windows is 40 cm, and from the edges is 70 cm.</p>	<p>Diagram showing the configuration of windows for a 9x5 room with 50% windowed area. The facade width is 900 cm and height is 350 cm. Nine windows are arranged horizontally, each 120 cm wide and 220 cm high. Spacing between windows is 30 cm, and from the edges is 15 cm.</p>

7.1.4 Materiale del telaio

Tenendo in considerazione la condizione delle scuole attuali si sono scelti due possibili materiali per il telaio dei serramenti, ovvero l'alluminio senza taglio termico con trasmittanza pari a $5,68 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e il legno con trasmittanza pari a $2,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

La scelta del materiale del telaio fa dipendere anche le larghezze dello stesso, quindi per il telaio in alluminio senza taglio termico si considera una larghezza di 57,2 mm, mentre per quello in legno di 68.9 mm.

7.1.5 Vetrazione

Per quel che riguarda la vetrazione si sono considerate due tipologie riportate nella tabella seguente.

Tabella 7-6: caratteristiche vetrazione

	Nome vetro	Spessore [mm]	U [W/(m ² K)]	τ _v	Solar heat gain
Vetro singolo	clear	6	5,816	0,884	0,818
Vetro doppio	clear-air-clear	6-12-6	2.689	0,786	0,704

7.1.6 Schermature

Dal punto di vista delle schermature sono state previste 3 tipologie di schermature, le cui caratteristiche vengono riportate nella tabella seguente:

Tabella 7-7: caratteristiche schermature

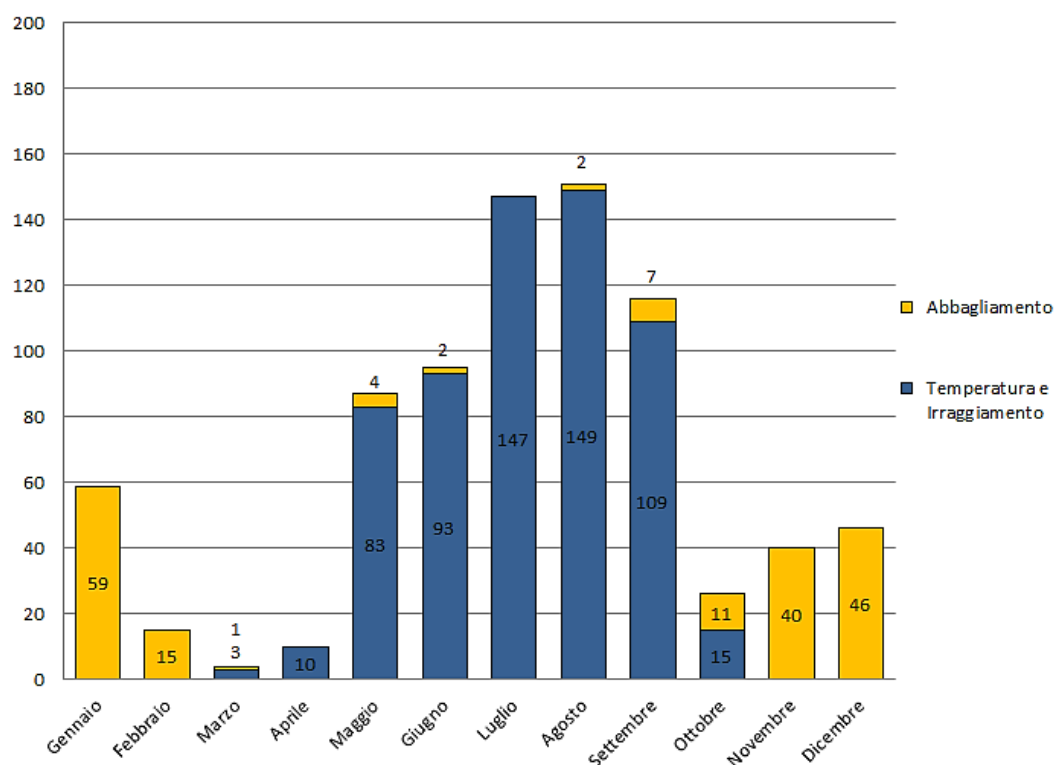
	Posizione	Caratteristiche	Funzionamento
Tenda [ID 5]	interno	Colore medio	Attiva se la radiazione solare è superiore a $300 \text{ W}/\text{m}^2$ e se la temperatura esterna raggiunge i 20°C
Veneziana [ID 14]	interno	Angolo 45°	
Veneziana [ID 11]	esterno	Angolo 45°	
Veneziana [ID 11]	esterno	Angolo 45°	

Come evidenziato nella tabella precedente, l'attivazione dei sistemi schermanti avviene con la contemporanea presenza di radiazione sull'elemento finestrato di $300 \text{ W}/\text{m}^2$ e una temperatura esterna maggiore o uguale ai 20°C , in modo da ottimizzarne il funzionamento durante il periodo estivo.

Il software però tiene in considerazione anche l'indice di abbagliamento; in particolare quando sul piano di lavoro si raggiunge un valore di illuminamento provocato da fonti luminose estese (DGI) pari a 22, in automatico avviene l'attivazione della schermatura. Questa caratteristica rispecchia le reali abitudini degli utenti delle aule scolastiche che in presenza di una radiazione solare fastidiosa, interagiscono con il sistema schermante.

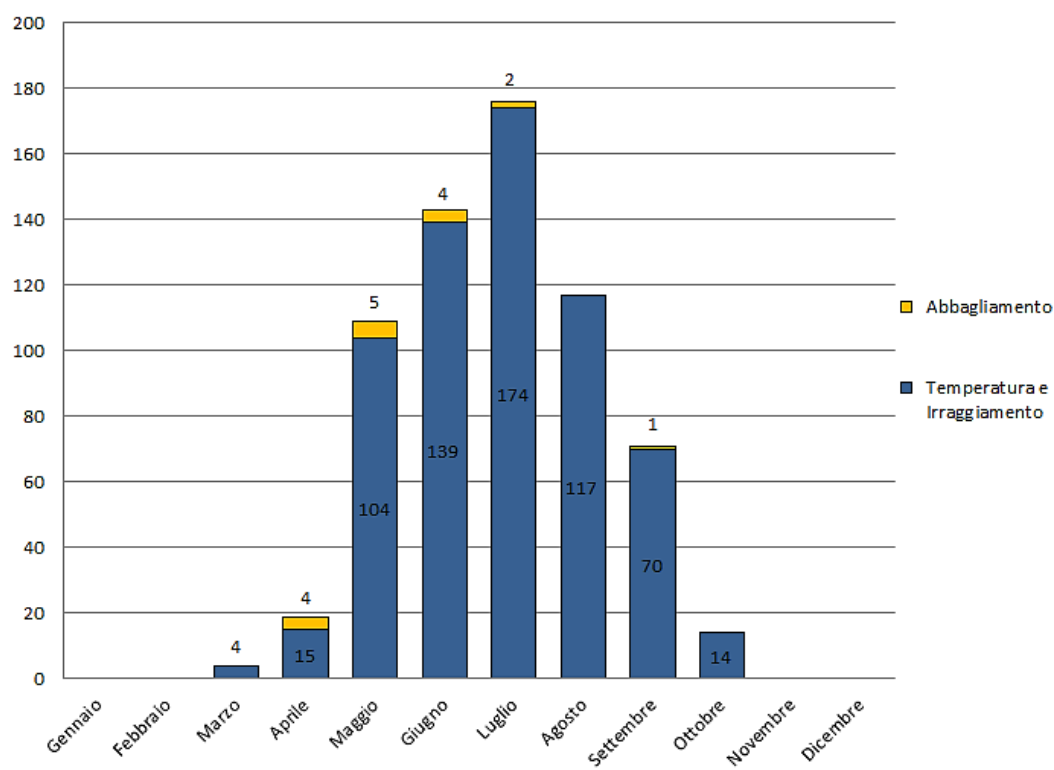
Per valutare in quante ore sono in funzione le schermature e per quale motivo si attivano, è stato simulato, a titolo di esempio, un locale con esposizione prima Sud e poi Ovest. Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

Grafico 7-3: ore di funzionamento sistemi schermanti, Sud



Per l'esposizione Sud si può notare come anche in inverno i sistemi schermanti funzionino a causa dell'elevato abbagliamento presente nel punto di riferimento. In generale in tutto l'anno sono 737 le ore di attivazione delle schermature di cui 609, pari all'83%, sono dovute alla contemporanea presenza di elevati valori di radiazione solare incidente sul serramento e di temperatura esterna.

Grafico 7-4: ore di funzionamento sistemi schermanti, Ovest



Per l'esposizione Ovest si può notare che il funzionamento avviene principalmente per il raggiungimento dei valori di radiazione solare incidente sul serramento e di temperatura esterna. In particolare si può notare che in inverno non avviene mai l'attivazione dei sistemi schermanti.

7.1.7 Aggetti

Per la valutazione degli apporti solari nel locale, sono stati considerati gli aggetti. Gli aggetti si dividono in due grandi categorie:

- aggetti orizzontali: utili a mascherare la radiazione solare nelle ore centrali estive a Sud
- aggetti verticali: utili a mascherare la radiazione solare nelle ore terminali estive ad Est e Ovest

Si sono quindi considerati tre diversi scenari: oggetto orizzontale, oggetto verticale oppure combinazione di entrambi gli oggetti precedenti.

Lo scenario con l'oggetto verticale è stato prefigurato considerando la presenza di tale oggetto sia a destra che a sinistra del locale, mentre non sono stati considerati i possibili scenari con la presenza di tale elemento su un solo lato del locale.

Come precedentemente elencato, la profondità degli schermi è stata presa costante e pari a 80 cm mentre lo spessore è stato assunto pari a 10 cm.

Nelle figure seguenti si può vedere l'applicazione dei tre diversi oggetti a una delle possibili configurazioni dell'aula.

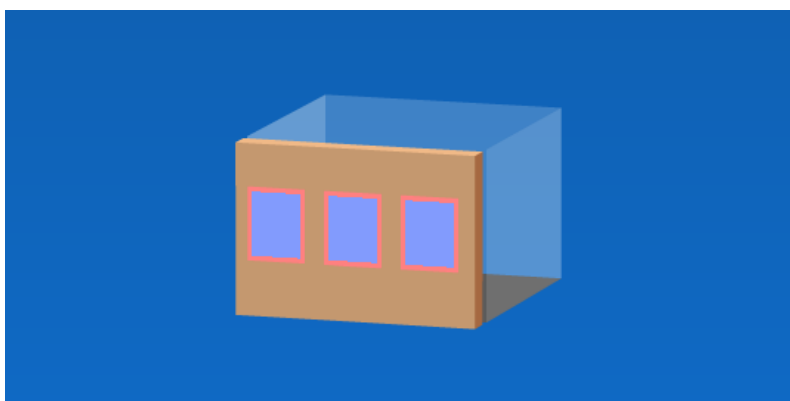


Immagine 7-1: nessun oggetto

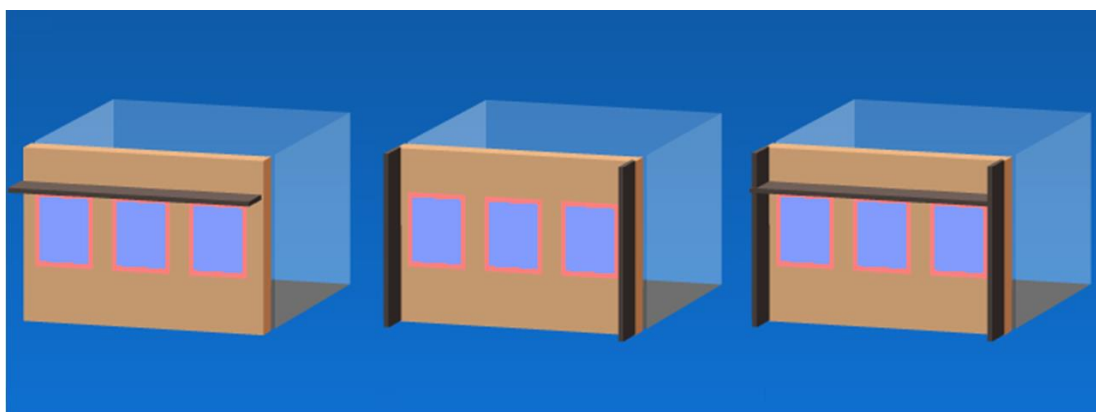


Immagine 7-2: oggetto orizzontale, verticale e combinato

7.1.8 Trasmittanza della parete

Per poter eseguire analisi termiche del locale è necessario definire la trasmittanza termica della chiusura verticale. In particolare si sono individuati due scenari diversi:

- Chiusura verticale con trasmittanza pari a $1,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
Con questa trasmittanza è stata considerata una muratura a cassa vuota con intercapedine d'aria di 3 cm;
- Chiusura verticale con trasmittanza pari a $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
Con questa trasmittanza è stata considerata una muratura a cassa vuota con strato di isolamento esterno in EPS di 8 cm.

7.1.9 Potenza elettrica installata

Al fine di determinare gli apporti interni dovuti agli apparecchi d'illuminazione è stato necessario definire la potenza installata nel locale.

A seguito di ricerche riguardanti calcoli illuminotecnici eseguiti su singoli locali si sono scelte due valori di potenza elettrica installata:

- $10 \text{ W}/\text{m}^2$, ovvero un valore che comporta un livello d'illuminamento medio mantenuto non ottimale, ma che è riscontrabile negli edifici scolastici esistenti;
- $20 \text{ W}/\text{m}^2$, ovvero il valore che il CEER considera nella procedura per le analisi energetiche; con questo valore si raggiungono valori di illuminamento medio mantenuto elevati.

7.1.10 Controllo dell'illuminazione

Come precedentemente descritto nell'analisi del software COMFEN, è necessario definire quale sia il controllo dell'illuminazione basato sulla quantità di luce diurna. Per le simulazioni di calcolo si è ipotizzato che all'interno delle aule degli edifici scolastici esistenti siano solo due le possibili configurazioni di controllo, ossia:

- *None*: nessun controllo dell'illuminazione basato sulla disponibilità di luce diurna: gli apparecchi rimangono sempre accesi durante le ore di occupazione;
- *Continuous/Off*: controllo continuo della disponibilità di luce diurna; ne consegue uno spegnimento degli apparecchi quando si raggiunge un'illuminazione sufficiente.

Il valore di illuminamento da mantenere è stato definito pari a 500 lux. Questo valore risulta medio fra quelli imposti dalla UNI 12464-1 per le diverse tipologia di aula scolastica.

7.1.11 Ventilazione

La ventilazione negli edifici scolastici esistenti è per la maggior parte di tipo naturale.

Dallo studio della banca dati del CEER si può ricavare che l'85% degli edifici scolastici facenti parte del campione non ha ventilazione meccanica.

Al fine di ottenere informazioni circa la quantità di energia necessaria per raffrescare gli edifici, si è tenuto conto anche della presenza della ventilazione meccanica.

In particolare è stata considerata la presenza di un recuperatore di calore di temperatura.

8 Risultati delle simulazioni

La valutazione dei risultati è stata suddivisa in due principali momenti:

- Come primo step ci si è interessati ai valori riguardanti i fabbisogni per riscaldamento, climatizzazione e illuminazione.

Per poter determinare il fabbisogno di raffrescamento, come precedentemente evidenziato, si sono dovuti simulare i vari locali con la presenza della ventilazione meccanica che, nella seconda tranches di simulazioni, lascerà invece il posto alla ventilazione naturale.

- Il secondo step consiste invece nella valutazione dell'indice di comfort termico descritto dalla temperatura operante interna dei locali.

8.1 Step 1: analisi dei fabbisogni

8.1.1 Considerazioni sul fabbisogno per riscaldamento

I risultati ottenuti in merito al fabbisogno per riscaldamento in generale presentano valori più bassi rispetto se confrontati con quelli messi a disposizione dalle due banche dati precedentemente studiate.

In particolare il locale simulato è localizzato a Milano. Come già visto nel Capitolo 4, dall'analisi delle due banche dati prese come riferimento, si ottengono valori di fabbisogno per riscaldamento pressoché analoghi tra di loro, che si attestano sui 245 KWh/(m² annuo).

Nei grafici seguenti vengono riassunti gli intervalli di variazione del fabbisogno per riscaldamento nelle diverse configurazioni di locale studiate, considerando sia l'esposizione sia la trasmittanza della chiusura verticale

Grafico 8-1: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 5x5 (KWh/m² anno)

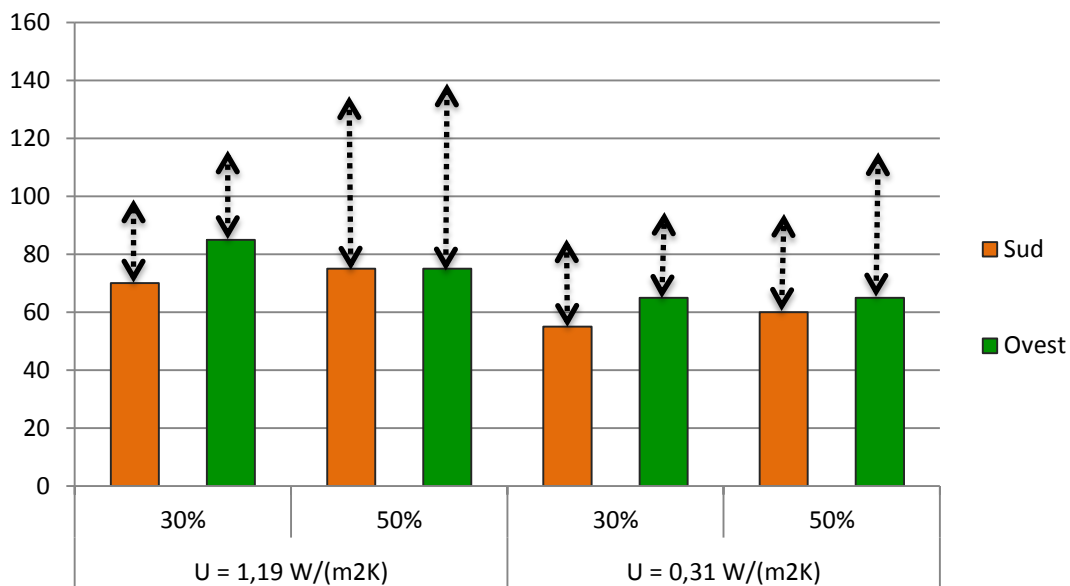


Grafico 8-2: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 7x7 (KWh/m² anno)

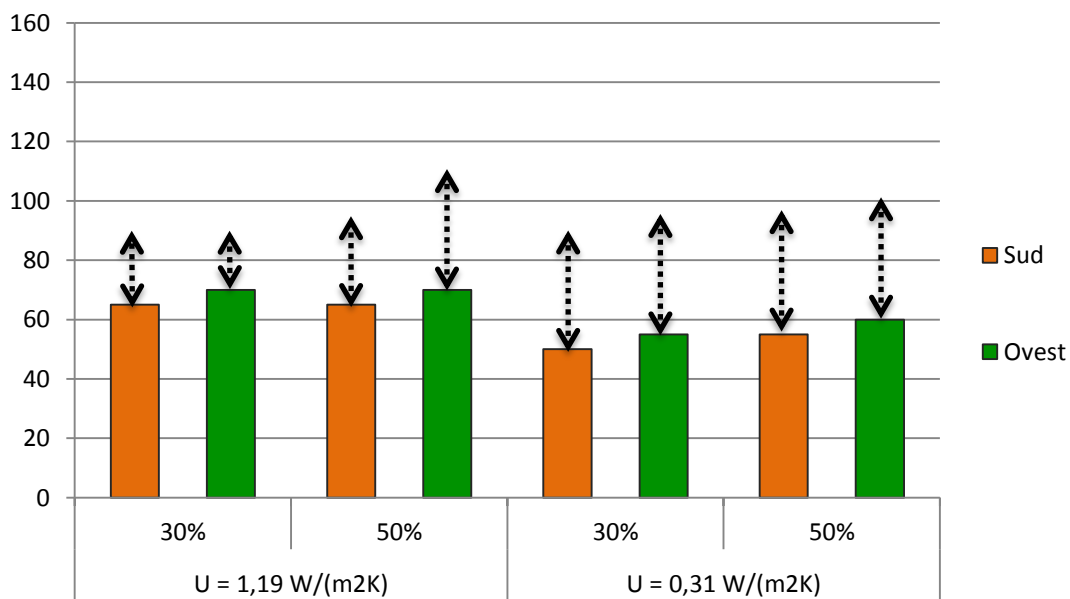
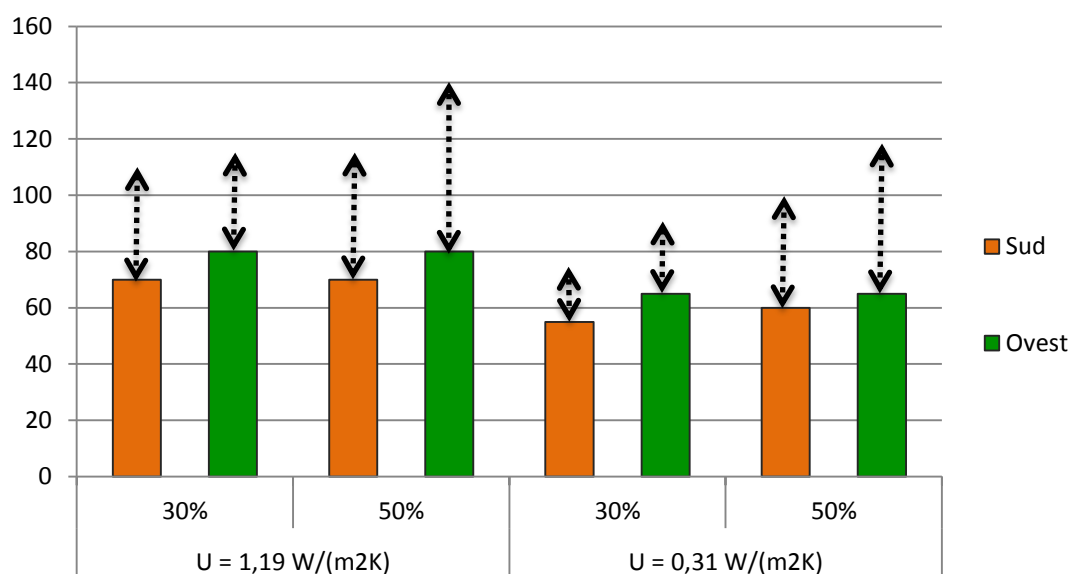


Grafico 8-3: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 9x5 (KWh/m² anno)

I valori ottenuti risultano molto inferiori se paragonati agli indici ricavati dalle due banche dati, ma bisogna fare una serie di considerazioni sul confronto tra le simulazioni e i casi reali.

In primo luogo i modelli simulati presentano una sola faccia esposta verso l'esterno; questa caratteristica determina ovviamente un'importante riduzione dei disperdimenti.

Non si tengono in considerazione infatti i disperdimenti attraverso altri componenti quali ad esempio la copertura, il basamento oppure altre le altre chiusure verticali. Altro aspetto che le simulazioni non considerano sono i ponti termici, anch'essi di particolare importanza sul conteggio finale dei disperdimenti.

In secondo luogo i risultati sopra descritti fanno riferimento a consumi per il riscaldamento in un locale in cui è presente la ventilazione meccanica. Come si evidenzia dai dati forniti dal CEER, l'85% degli edifici scolastici presenti nel campione non presenta questa tipologia di impianto, ma usufruisce della ventilazione naturale attraverso i serramenti per garantire i necessari ricambi ora all'interno dei locali.

Per determinare le differenze tra le due diverse tipologie di trattamento dell'aria, gli stessi modelli sono stati simulati in presenza di ventilazione naturale e si sono ottenuti valori di fabbisogno per il riscaldamento decisamente più elevati. In particolare nelle seguenti

tabelle vengono riassunti questi incrementi. Si ottengono variazioni comprese tra il 15 e il 20% per gli scenari con il 30% di area finestrata e fino al 35% nei casi con il 50%.

Tabella 8-1: incremento (nel caso di ventilazione naturale rispetto al caso di VMC) dei fabbisogni per riscaldamento locale 5x5

	Area finestrata 30%	Area finestrata 50%
U = 1,19 W/(m²K)		
Sud	+20%	+30%
Ovest	+15%	+30%
U = 0,31 W/(m²K)		
Sud	+15%	+35%
Ovest	+20%	+35%

Tabella 8-2: incremento (nel caso di ventilazione naturale rispetto al caso di VMC) dei fabbisogni per riscaldamento locale 7x7

	Area finestrata 30%	Area finestrata 50%
U = 1,19 W/(m²K)		
Sud	+15%	+20%
Ovest	+10%	+15%
U = 0,31 W/(m²K)		
Sud	+15%	+35%
Ovest	+15%	+30%

Tabella 8-3: incremento (nel caso di ventilazione naturale rispetto al caso di VMC) dei fabbisogni per riscaldamento locale 9x5

	Area finestrata 30%	Area finestrata 50%
U = 1,19 W/(m²K)		
Sud	+15%	+30%
Ovest	+15%	+30%
U = 0,31 W/(m²K)		
Sud	+20%	+35%
Ovest	+15%	+35%

Si analizza ora separatamente come le diverse caratteristiche dei locali vadano ad influire sul fabbisogno per riscaldamento.

8.1.1.1 Schermature

In termini di riscaldamento la presenza o meno delle schermature non ha grande impatto. Bisogna infatti ricordare che, come input del programma, è stata prevista l'attivazione dei sistemi schermanti in presenza di una radiazione incidente sui serramenti pari a 300 W/m^2 e contemporaneamente una temperatura esterna pari a 20°C . Per come si è impostato il sistema questi sistemi schermanti sono di conseguenza ottimizzati per il periodo estivo e avranno importanza nella valutazione del fabbisogno per raffrescamento.

8.1.1.2 Aggetti

Gli aggetti inseriti nei vari scenari vanno in generale ad aumentare il fabbisogno per il riscaldamento. Questo risultato è prevedibile in quanto si vanno a ridurre gli apporti solari, favorevoli durante la stagione invernale. In particolare si può riscontrare che un oggetto orizzontale ha un effetto peggiorativo maggiore rispetto ad uno verticale.

Questo risultato è determinato dal fatto che si è pensata l'applicazione degli aggetti verticali solo agli estremi del locale e non in prossimità di ciascuna finestra. Vanno quindi ad influire di meno rispetto all'oggetto orizzontale che invece è presente per tutta la larghezza della facciata, determinando di conseguenza un'ombra maggiore.

Questa considerazione è anche confermata dalla diminuzione dell'effetto dell'oggetto verticale all'aumentare della larghezza della facciata del locale. Infatti, come si può notare nei grafici riportati di seguito, nel locale 9×5 metri la presenza di questa tipologia di oggetto incide in maniera poco significativa sull'aumento del fabbisogno.

Grafico 8-4: influenza delle schermature sul fabbisogno per riscaldamento.
Af 30% (KWh/m² anno)

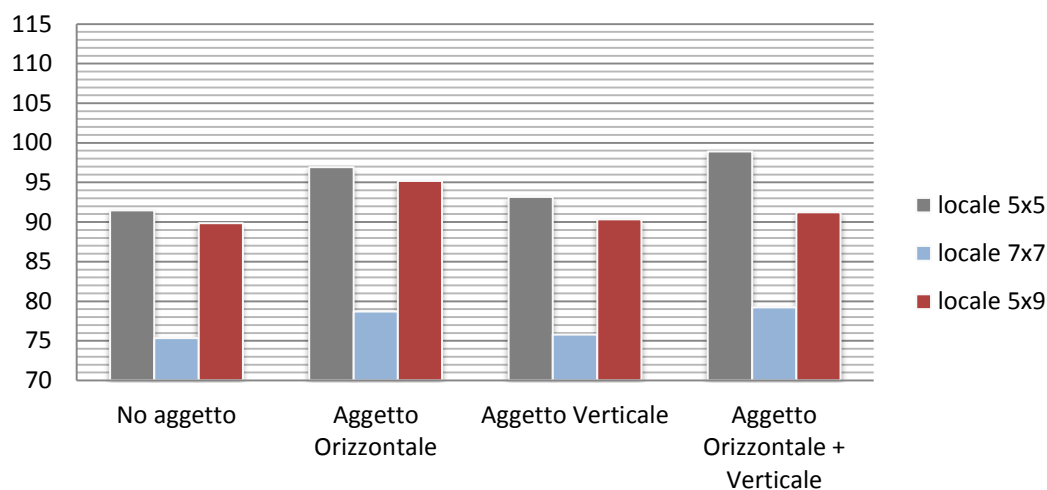
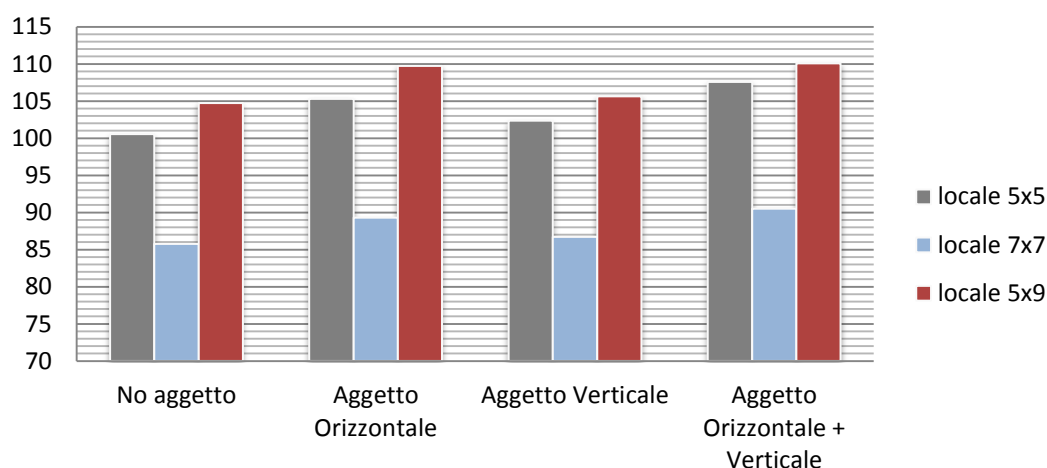
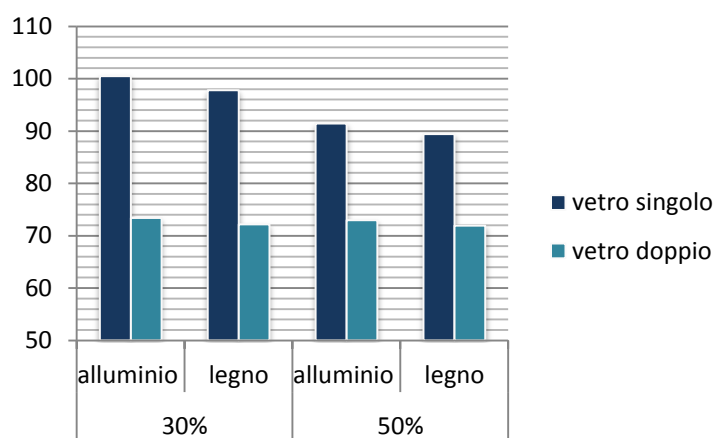


Grafico 8-5: influenza delle schermature sul fabbisogno per riscaldamento.
Af 50% (KWh/m² anno)



8.1.1.3 Caratteristiche serramenti

I serramenti hanno un ruolo fondamentale nel fabbisogno per riscaldamento degli edifici. L'alta percentuale di superficie finestrata delle scuole infatti, fa sì che la loro incidenza sia così elevata. In particolare nelle simulazioni sono state considerate due tipologie di vetratura e due tipologie di materiale del telaio per rappresentare al meglio gli edifici scolastici italiani esistenti.

Grafico 8-6: influenza delle caratteristiche dei serramenti (KWh/m² anno)

Come si può notare dal grafico l'aumento delle prestazioni dei serramenti influisce moltissimo. In particolare solo sostituendo un vetro singolo con trasmittanza pari a $5,816 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ con un vetro doppio avente trasmittanza di $2,689 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, il fabbisogno si riduce del 20%. Il discorso è ancora più rilevante nel caso di percentuale di area finestrata pari a 50%. In questo caso si ottiene un risparmio che arriva addirittura al 27%. Oggi in commercio esistono vetrazioni ancora più performanti con trasmittanze che arrivano facilmente a 1,5 o addirittura a $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, che garantirebbero risparmi energetici ancora più elevati.

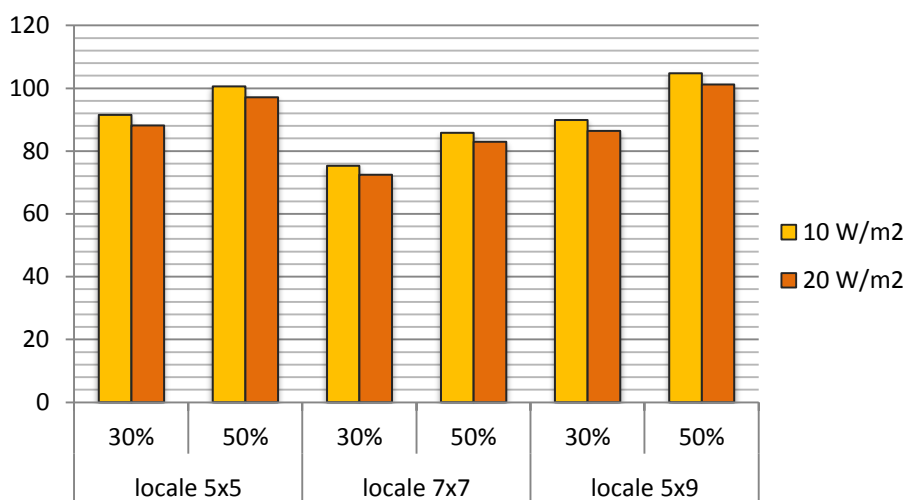
La presenza di un telaio in legno piuttosto che in alluminio provoca una riduzione di questo fabbisogno di circa il 5%, in quanto si passa da un valore di trasmittanza del telaio in alluminio di $5,68 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a un valore di $2,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ per telai in legno.

8.1.1.4 Illuminazione

Un altro fattore che va a modificare i consumi per il riscaldamento riguarda i carichi interni degli apparecchi luminosi. La variazione di questi carichi è dovuta sia alla diversa potenza installata nel locale, sia alla tipologia di controllo dell'illuminazione.

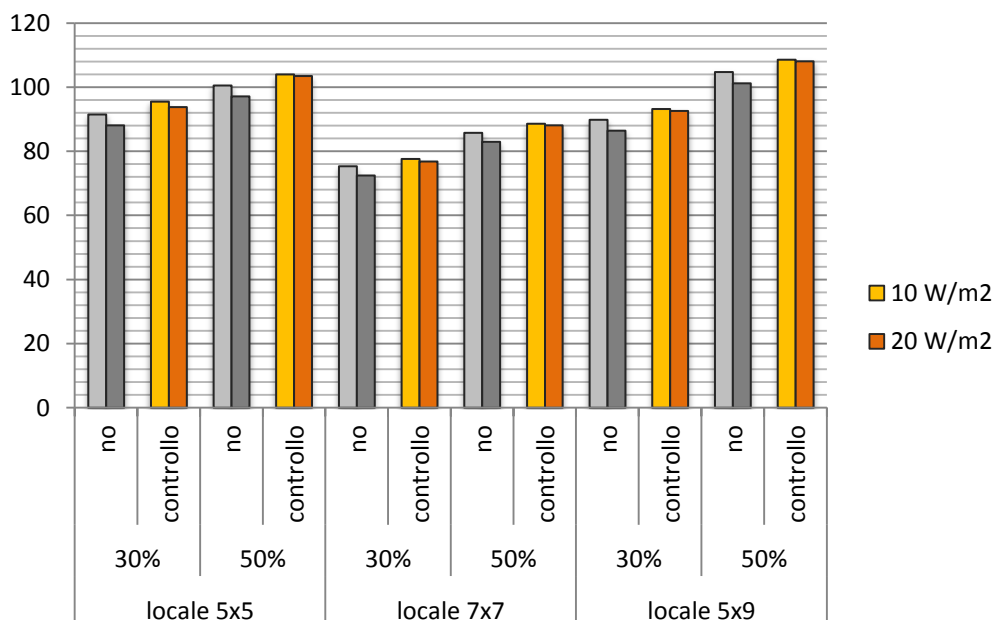
Si analizza in un primo momento l'incidenza della potenza installata.

Considerando scenari aventi stesse caratteristiche geometriche e di involucro e senza alcun controllo dell'illuminazione si valuta quale possa essere la differenza in termini di fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento, nel caso di una potenza installata di $10 \text{ W}/\text{m}^2$ oppure di $20 \text{ W}/\text{m}^2$.

Grafico 8-7: influenza della potenza elettrica installata (KWh/m² anno)

Dal grafico precedente si può notare che l'incidenza della potenza elettrica installata sul fabbisogno termico non è molto rilevante. Le due diverse potenze comportano una variazione del 4% nel caso di percentuale di area finestrata del 30%, mentre del 3% considerando un'area finestrata del 50%.

Si passa ora ad analizzare l'incidenza del sistema di controllo dell'illuminazione.

Grafico 8-8: influenza della tipologia di controllo (KWh/m² anno)

Dall'analisi dei risultati si evidenzia che, con l'installazione del sistema di controllo dell'illuminazione proposto, il fabbisogno per riscaldamento aumenta del 3-4% nel caso di 10 W/m^2 di potenza installata, mentre arriva a 6-7% se si considera una potenza installata di 20 W/m^2 . Dal grafico sopra riportato si evidenzia inoltre come, installando il sistema di controllo, tra le due potenze elettriche installate si vada a ridurre ancora di più la differenza di fabbisogno per il riscaldamento.

Riassumendo quindi l'impianto di illuminazione non provoca grandi variazioni in termini di energia termica richiesta per il riscaldamento.

8.1.2 Considerazioni sul fabbisogno per raffrescamento

Il fabbisogno energetico per il raffrescamento rappresenta un indice abbastanza inconsueto per gli edifici scolastici in quanto, spesso, non è presente un impianto che tratta l'aria nella stagione estiva.

Bisogna anche tenere in considerazione che per gran parte dell'estate, in concomitanza del periodo più caldo dell'anno, le scuole rimangono chiuse o comunque presentano un'occupazione molto inferiore rispetto all'inverno. Nelle simulazioni la scuola è stata considerata occupata fino al 30 Giugno e a partire dal 1 Settembre, escludendo quindi in toto i mesi di Luglio e Agosto. In particolare durante le ore di occupazione è stata impostata una temperatura di set point di 26°C, mentre nelle altre ore l'impianto è previsto spento.

Gli unici dati riguardanti il fabbisogno per il raffrescamento sono stati trovati nella banca dati del CEER, dai quali si è estrapolato un valore mediato sulle superfici di 29,87 KWh/(m²annuo). Questo valore rappresenta il fabbisogno di energia termica (in termini di energia utile) per raffrescare gli edifici.

I valori estrapolati dalle simulazioni invece considerano il rendimento dell'impianto di raffrescamento che è stato imposto pari a 2,7 COP. Non si tratta però di energia primaria in quanto non considerano il vettore energetico.

Nei grafici seguenti si riportano gli intervalli di variazione dei fabbisogni per raffrescare il locale analizzato suddivisi per tipologia di locale, per percentuale di area finestrata e per orientamento.

Grafico 8-9: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 5x5 (KWh/m² anno)

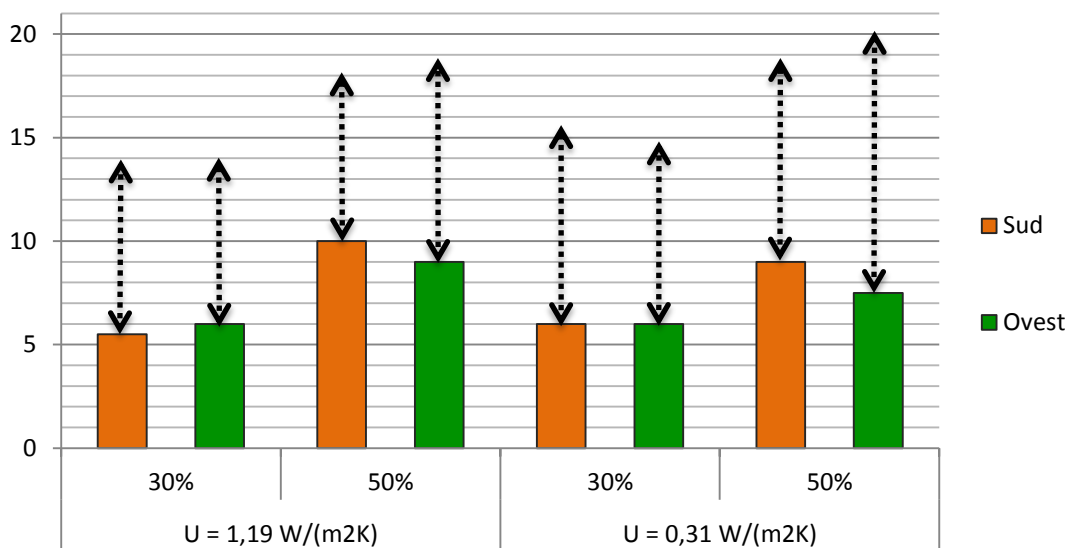


Grafico 8-10: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 7x7 (KWh/m² anno)

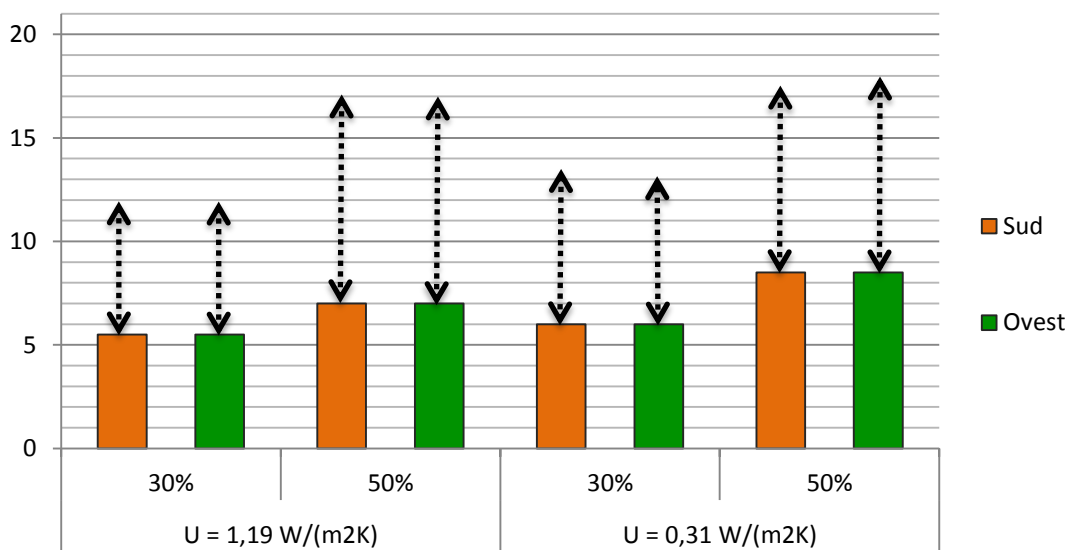
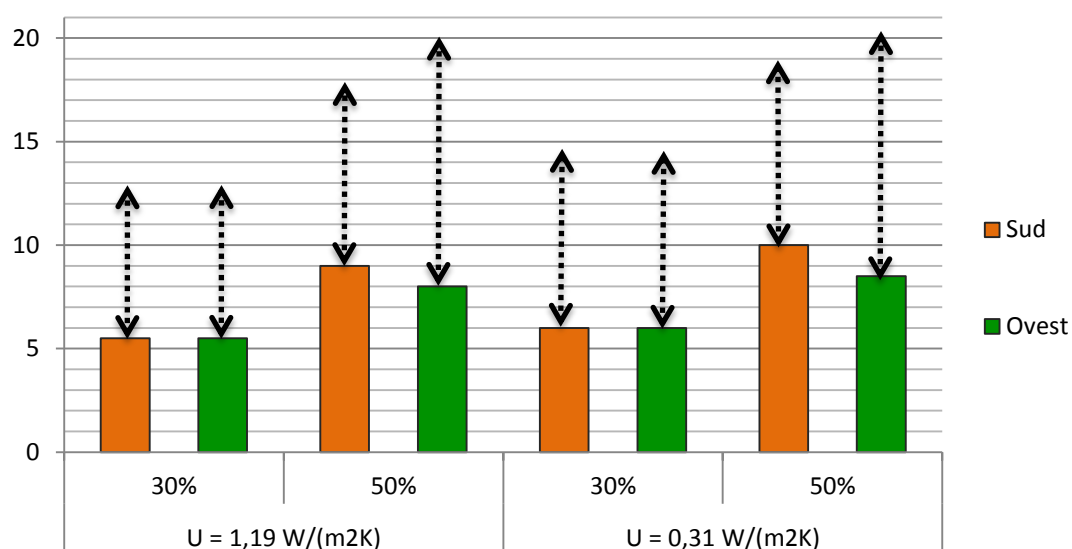


Grafico 8-11: valori di fabbisogni per riscaldamento locale 9x5 (KWh/m² anno)

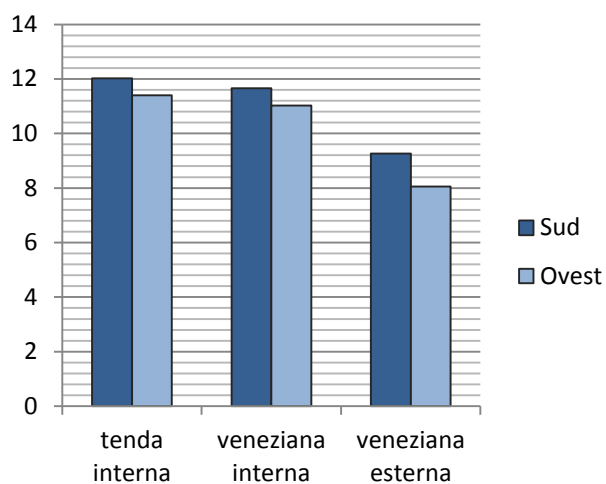
8.1.2.1 Schermature

Le schermature hanno ovviamente un ruolo importante nella riduzione dei fabbisogni per il raffrescamento. In particolare tra le tre tipologie simulate la più performante risulta essere la veneziana esterna, mentre la meno performante la tenda interna. Questo risultato conferma le aspettative in quanto la veneziana esterna, proprio per la sua posizione, riflette parte della radiazione solare ed evita il surriscaldamento interno. Al contrario, con le due schermature interne, parte della radiazione solare riflessa viene assorbita dalla vetratura che quindi la ritrasmette verso l'interno.

In particolare di seguito viene riportato un grafico che mostra l'influenza dei sistemi schermanti in scenari senza aggetti.

Con la veneziana esterna c'è una riduzione dei fabbisogni per raffrescare, rispetto alle altre due tipologie, di più del 20% nel caso di esposizione Sud fino ad arrivare fino al 30% nel caso di esposizione Ovest.

Grafico 8-12: influenza dei sistemi schermanti sul fabbisogno per raffrescamento (KWh/m² anno)



8.1.2.2 Aggetti

Dall'analisi dei risultati, la prima considerazione che emerge riguarda l'influenza dei sistemi schermanti in presenza di aggetti. Se si considerano gli scenari aventi lo stesso aggetto ma diversa schermatura si nota come l'aggetto orizzontale fa sì che i sistemi schermanti non si attivino a causa dell'ombra da lui stesso generata.

Grafico 8-13: incidenza dei sistemi schermanti sul fabbisogno per il raffrescamento in base al tipo di aggetto Af 30% (KWh/m² anno)

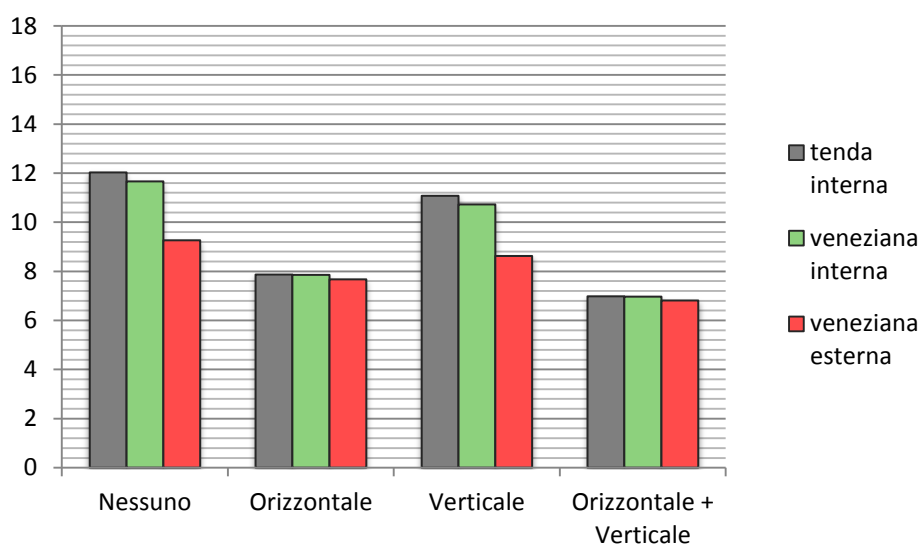
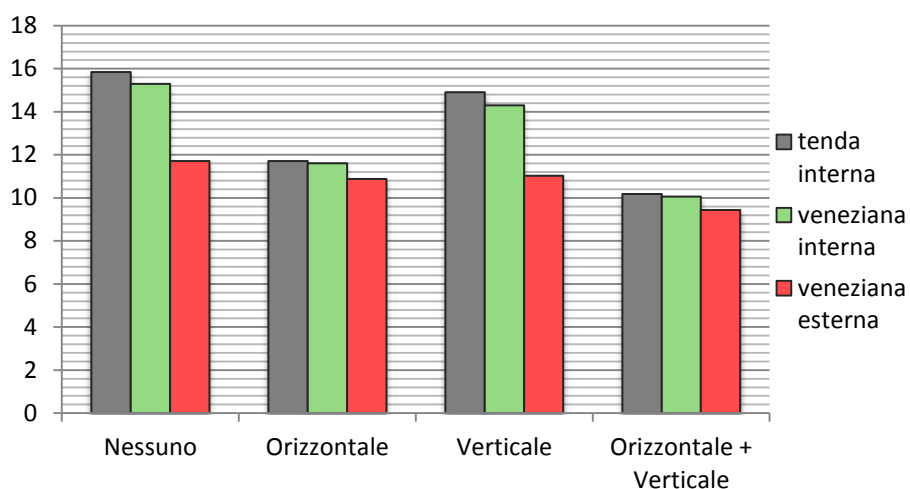


Grafico 8-14: incidenza dei sistemi schermanti sul fabbisogno per il raffrescamento in base al tipo di aggetto Af 30% (KWh/m² anno)



Questa tendenza si verifica per tutti gli scenari indipendentemente dall'esposizione e dalla geometria del locale. In particolare quest'appiattimento delle differenze si riscontra negli scenari con l'aggetto orizzontale e gli aggetti combinati, mentre non interessa il caso con l'aggetto verticale.

Questa caratteristica è dovuta all'opera di blocco degli aggetti della radiazione solare che quindi non raggiunge un valore sui serramenti di 300 W/m², soglia oltre la quali si attivano i sistemi schermanti.

Il fatto che l'aggetto verticale non presenti questa caratteristica è sintomo di funzionamento non ottimale in estate per ridurre il fabbisogno di raffrescamento.

Si passa ora ad analizzare il potenziale di riduzione di ciascuna tipologia di aggetto.

Come si può notare il comportamento degli aggetti rimane il medesimo per tutte le tipologie di locale. Di seguito vengono riportate in tabelle le percentuali di risparmio nell'applicare gli aggetti in tutte le configurazioni geometriche e per le due esposizioni.

Tabella 8-4: percentuali di risparmio fabbisogno raffrescamento, locale 5x5

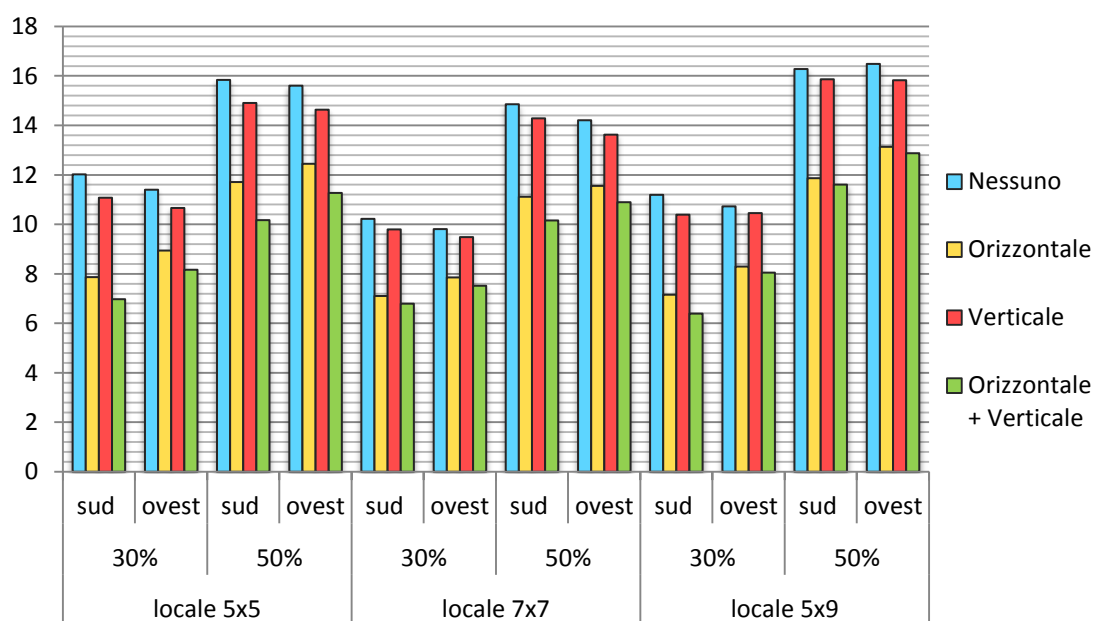
	30%		50%	
	Sud	Ovest	Sud	Ovest
Orizzontale	35%	22%	26%	20%
Verticale	8%	6%	6%	6%
Orizzontale + Verticale	42%	28%	36%	28%

Tabella 8-5: percentuali di risparmio fabbisogno raffrescamento, locale 7x7

	30%		50%	
	Sud	Ovest	Sud	Ovest
Orizzontale	30%	20%	25%	19%
Verticale	4%	3%	4%	4%
Orizzontale + Verticale	34%	23%	32%	23%

Tabella 8-6: percentuali di risparmio fabbisogno raffrescamento, locale 9x5

	30%		50%	
	Sud	Ovest	Sud	Ovest
Orizzontale	36%	23%	27%	20%
Verticale	7%	3%	3%	4%
Orizzontale + Verticale	43%	25%	29%	22%

Grafico 8-15: fabbisogno per raffrescamento a seconda dell' oggetto (KWh/m² anno)

Riassumendo:

- L'oggetto orizzontale garantisce un risparmio energetico variabile tra il 20% e il 35%. In particolare, l'effetto dell'oggetto è maggiore nell'esposizione Sud;
- L'oggetto verticale ha un'influenza molto minore che varia tra il 3 e l'8%;
- La combinazione dei due oggetti ha il miglior rendimento ai fini della riduzione dei fabbisogni in quanto coniuga gli effetti positivi delle due tipologie.

8.1.2.3 Caratteristiche serramenti

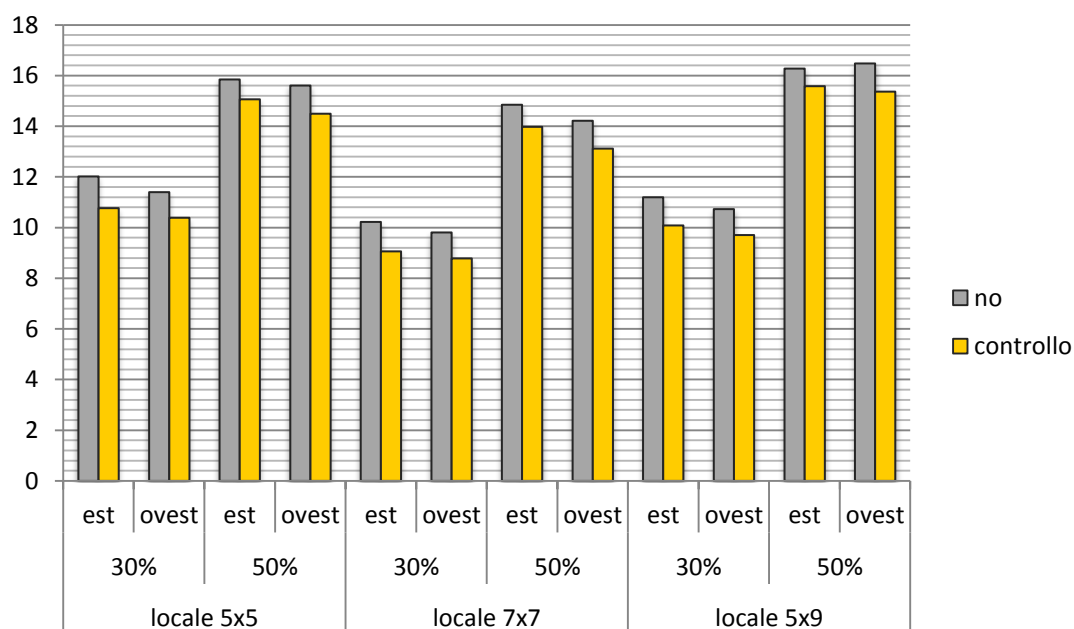
Le caratteristiche dei serramenti, nel considerare il fabbisogno per raffrescamento, influiscono in maniera opposta rispetto a quanto succede per il riscaldamento. In particolare un vetro doppio rispetto ad uno singolo comporta un maggior surriscaldamento del locale, mentre avere un telaio in legno più largo di uno in alluminio, diminuisce l'area della vetratura e il conseguente ingresso della radiazione solare.

In sostanza quindi la presenza di un vetro doppio incrementa il fabbisogno nell'ordine del 6 o 7 %, mentre il telaio in legno al posto di quello in alluminio lo riduce del 2%.

8.1.2.4 Illuminazione

Anche l'illuminazione fornisce apporti interni che in inverno risultano favorevoli, mentre in estate sono peggiorativi. In particolare le maggiori differenze si riscontrano tra gli scenari con il sistema di controllo dell'illuminazione e quelli senza.

Grafico 8-16: influenza del controllo sul fabbisogno per raffrescamento (KWh/m² anno)



Con il controllo dell'illuminazione si ha una riduzione del fabbisogno per raffrescamento attorno al 10% se l'area finestrata è pari al 30% e tra 5 e 7% se è pari al 50%.

8.1.3 Considerazioni sul fabbisogno per illuminazione

Per analizzare i risultati relativi al fabbisogno per l'illuminazione bisogna ricordare quando già evidenziato nel Paragrafo 5.3, soprattutto per quel che riguarda la tipologia di controllo dell'illuminazione prevista.

Il software come caso peggiore di controllo prevede la dicitura "none" equivalente quindi a nessun controllo dell'illuminazione. In questo caso l'impianto rimane acceso in tutte le ore di occupazione, indifferentemente dalla presenza di un illuminamento sufficiente sul piano di lavoro. È dunque assolutamente indipendente da fattori quali l'esposizione, le schermature, gli aggetti.

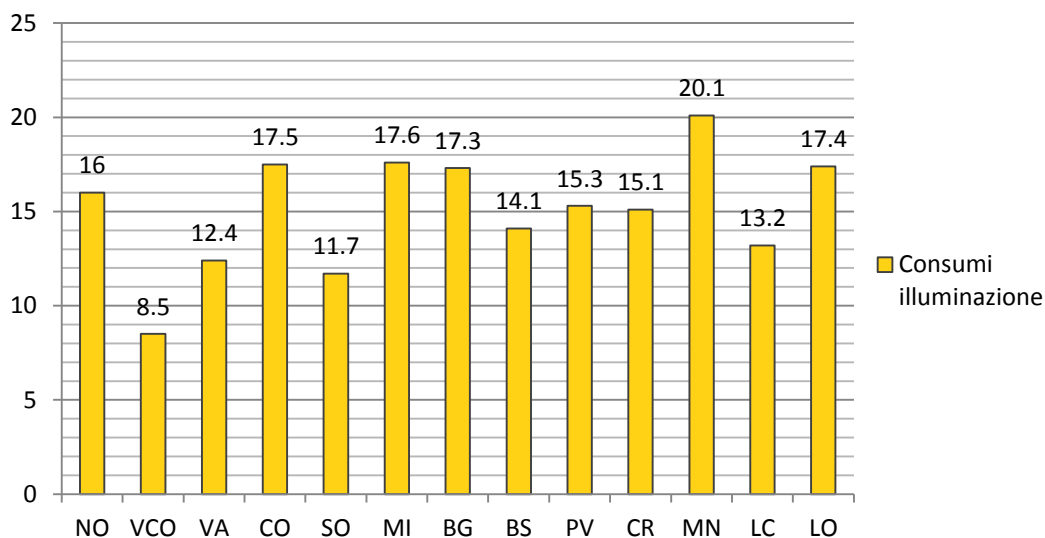
Nel caso quindi di una potenza installata di 10 W/m^2 si ottiene un fabbisogno di $14,28 \text{ KWh}/(\text{m}^2 \text{ annuo})$, corrispondente a 1428 ore di illuminamento all'anno. Questo valore risulta ovviamente raddoppiato se si considera una potenza installata di 20 W/m^2 .

Dall'analisi della banca dati Audit GIS è possibile ricavare i fabbisogni di energia elettrica all'interno degli edifici scolastici.

In questa tipologia di edifici l'energia elettrica viene principalmente utilizzata dall'impianto di illuminazione in quanto non sono presenti altre apparecchiature che possano comportare un elevato consumo elettrico. Appare quindi una buona approssimazione considerare di attribuire all'impianto di illuminazione una percentuale tra l'80 e il 90% del fabbisogno elettrico, totale, mentre la rimanente parte è utilizzata da apparecchiature quali ad esempio computer, stampanti o altri accessori a disposizione dell'utenza.

Nel grafico seguente si riportano i valori di fabbisogni elettrici necessari all'illuminazione, con le ipotesi di cui sopra.

Grafico 8-17: fabbisogni illuminazione per Provincia (KWh/m² anno)
(elaborazione a cura dell'autore)

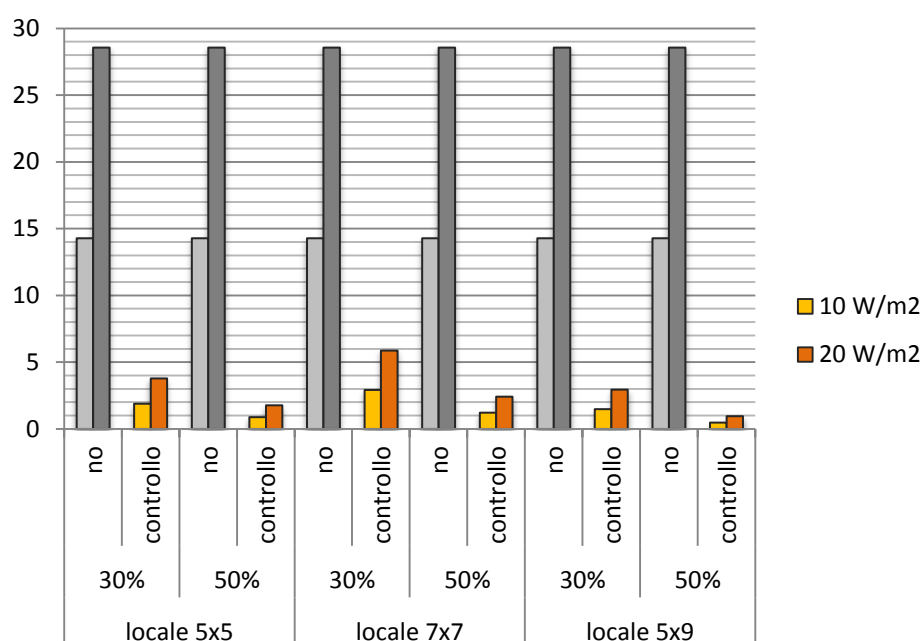


I valori variano dagli 8 ai 20 KWh/m² annuo con un valore medio attorno ai 15. In particolare per Milano, località presa in considerazione per le simulazioni, questo valore risulta pari a 17,6 KWh/m² annuo.

Questi valori non sono molto distanti dai risultati delle simulazioni, tenendo anche in considerazione che in un edificio reale difficilmente le luci rimangono accese sempre durante l'occupazione. Un utente medio, anche se poco attento al risparmio energetico, interagisce con l'impianto d'illuminazione spegnendolo qualora il livello di illuminamento sia molto elevato.

A questo punto l'attenzione si sposta sugli scenari con il controllo dell'illuminazione che prevede la dimmerazione degli apparecchi luminosi in relazione all'illuminamento presente, fino al totale spegnimento nel momento del raggiungimento del target desiderato.

Con questo sistema di controllo si ottengono risparmi elevatissimi. In particolare considerando un locale esposto a Sud, si ottengono i seguenti risultati.

Grafico 8-18: confronto sistemi di controllo illuminazione (KWh/m² anno)

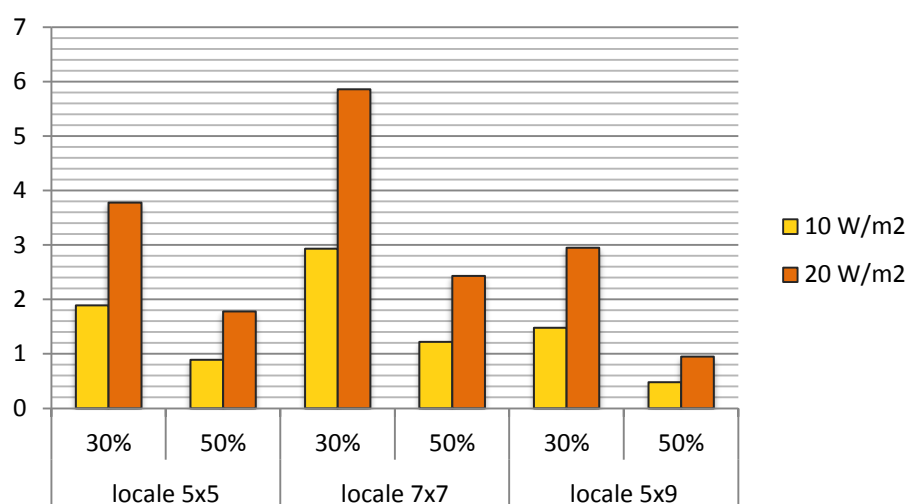
Dal grafico si può notare come la scelta di questo sistema di controllo dell'illuminazione comporti una riduzione dei fabbisogni compresa tra l'87 e il 97%.

Di seguito, per gli scenari con questa tipologia di controllo, verrà evidenziato come le differenti scelte costruttive vanno a influenzare i fabbisogni elettrici per l'illuminazione.

8.1.3.1 Geometria locale

I valori di fabbisogno per illuminazione risentono molto della geometria del locale. Per geometria del locale si intendono sia le dimensioni in pianta sia la percentuale di area finestrata.

Dal grafico si può notare che, variando le dimensioni in pianta del locale, cambia l'efficienza del sistema di controllo dell'illuminazione. In particolare il locale 7x7 metri, data la sua maggiore profondità, necessita di un numero maggiore di ore di accensione degli apparecchi. Questa considerazione è ragionevole in quanto la penetrazione della luce solare non risulta sufficiente a garantire un adeguato livello di illuminamento nei punti del locale lontani dai serramenti.

Grafico 8-19: influenza della geometria del locale (KWh/m² anno)

Un altro aspetto che risulta evidente è che, nel caso in cui i due locali siano profondi uguali, una maggior superficie rivolta all'esterno, con la relativa superficie finestrata, determina un minor fabbisogno di energia elettrica per illuminare l'ambiente. Nel caso specifico avere una facciata larga 9 metri comporta una riduzione del fabbisogno del 20% o del 45% in base alla percentuale di superficie finestrata, rispetto ad averla larga 5 metri.

Per quel che riguarda invece la percentuale di superficie finestrata influisce anch'essa molto sulla riduzione del fabbisogno.

Tabella 8-7: riassunto risparmi dipendenti dalla geometria del locale

	Af 30%	Af 50%
locale 5x5	87%	94%
locale 7x7	79%	91%
locale 9x5	90%	97%

In particolare nella Tabella 8-7 vengono riassunti i valori di risparmio ottenibile dal sistema di controllo, divisi per le tre diverse configurazioni d'aula e per le percentuali di area finestrata in un locale esposto a Sud.

Si può notare che la maggior area finestrata determina una riduzione notevole in tutte e tre le tipologie di locale. Anche il locale 7x7 metri, che nel caso di area finestrata pari al 30%

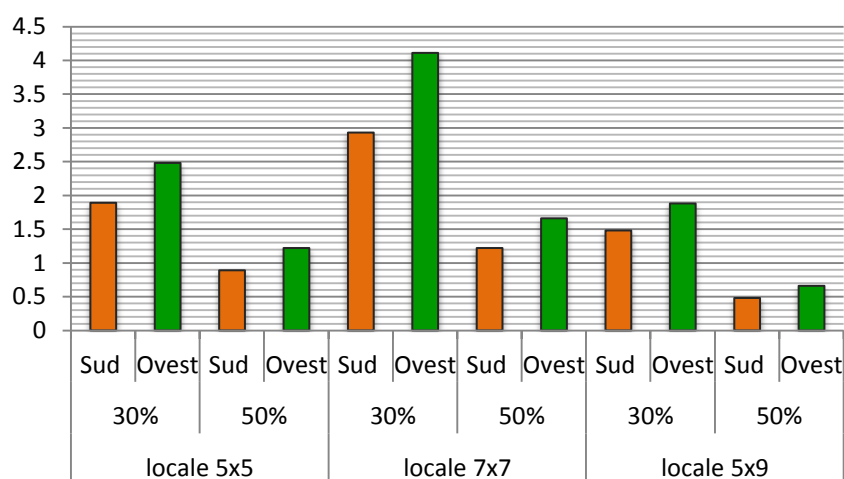
arriva a una riduzione decisamente più bassa degli altri due, riesce a raggiungere una percentuale di risparmio sopra il 90%.

Riassumendo quindi il sistema di controllo comporta un'elevatissima riduzione del fabbisogno. In particolare il suo rendimento migliora nei locali caratterizzati da una profondità non eccessiva e nei casi in cui la percentuale di area finestrata sia elevata.

8.1.3.2 Orientamento

Anche l'orientamento influisce sul fabbisogno energetico per l'illuminazione. In particolare dai risultati ottenuti, si evidenzia che l'esposizione Sud consente di avere un miglior risparmio a seguito dell'installazione del sistema di controllo.

Grafico 8-20: confronto fabbisogno illuminazione tra diverse esposizioni (KWh/m² anno)



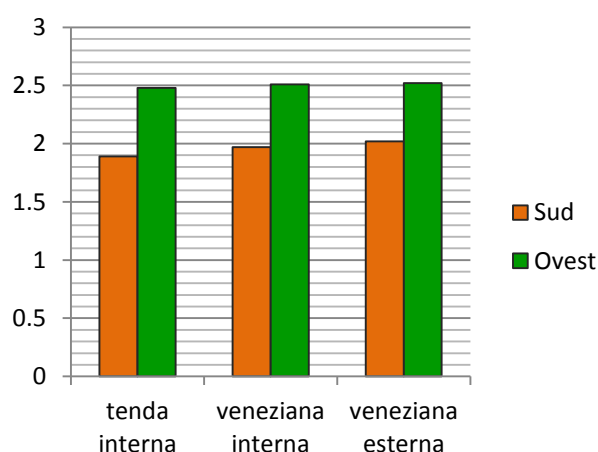
In particolare il fabbisogno di un locale esposto a Sud risulta mediamente più basso del 25 % rispetto a un locale esposto ad Ovest.

8.1.3.3 Schermature

Come già detto le schermature si attivano praticamente solo nel periodo estivo, momento dell'anno caratterizzato dal massimo irraggiamento. Proprio per questo motivo sussiste poca differenza tra i risultati degli scenari con le tre tipologie di schermature.

Si riportano, a titolo di esempio, scenari con le stesse caratteristiche geometriche e costruttive, ma con diversa esposizione e diverso sistema di schermatura.

Grafico 8-21: incidenza della schermatura sul fabbisogno per illuminazione (KWh/m² anno)



Come si può notare la scelta della schermatura non comporta un'importante variazione del fabbisogno per illuminazione. Tenzialmente comunque la veneziana esterna è la tipologia che comporta un maggior aumento di fabbisogno, seguita dalla veneziana interna e quindi dalla tenda.

8.1.3.4 Aggetti

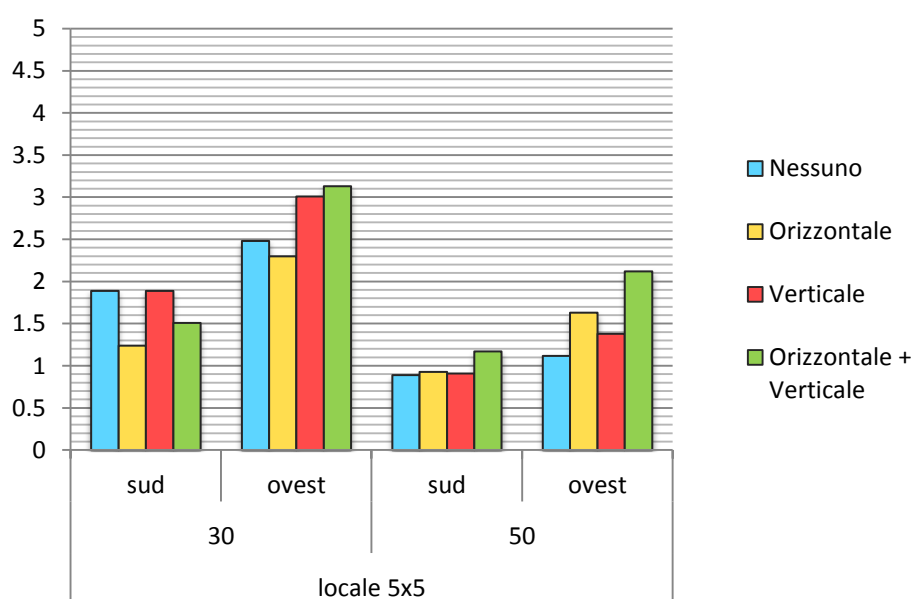
La presenza di aggetti influenza, in maniera anche significativa, il fabbisogno energetico per illuminare. Per riuscire a determinare la loro incidenza, si sono riassunti i valori nei seguenti grafici, suddivisi per geometria del locale ed esposizione.

In generale non esiste una regola rigida che definisce l'aumento del fabbisogno in base alla presenza e alla tipologia dell'aggetto. Si procede quindi a studiare puntualmente ogni scenario.

- locale 5x5 metri
 - l'aggetto orizzontale comporta una riduzione del fabbisogno negli scenari con area finestrata 30%, mentre un aumento nei casi di area finestrata pari al 50%. In generale però il valore peggiore si trova nell'esposizione Ovest;

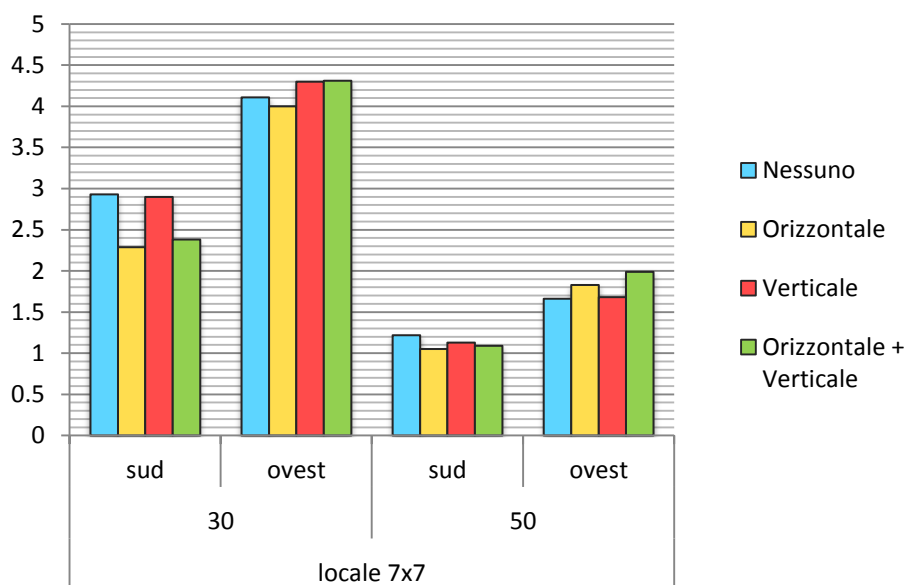
- L'aggetto verticale tendenzialmente non influisce negli scenari esposti a Sud, mentre aumenta il fabbisogno in quelli a Ovest;
- La combinazione dei due aggetti comporta una riduzione del fabbisogno solo negli scenari esposti a Sud con Af pari al 30%; per tutti gli altri è peggiorativa. Ancora una volta la situazione peggiore si ha a Ovest;

Grafico 8-22: influenza degli aggetti, locale 5x5 (KWh/m² anno)



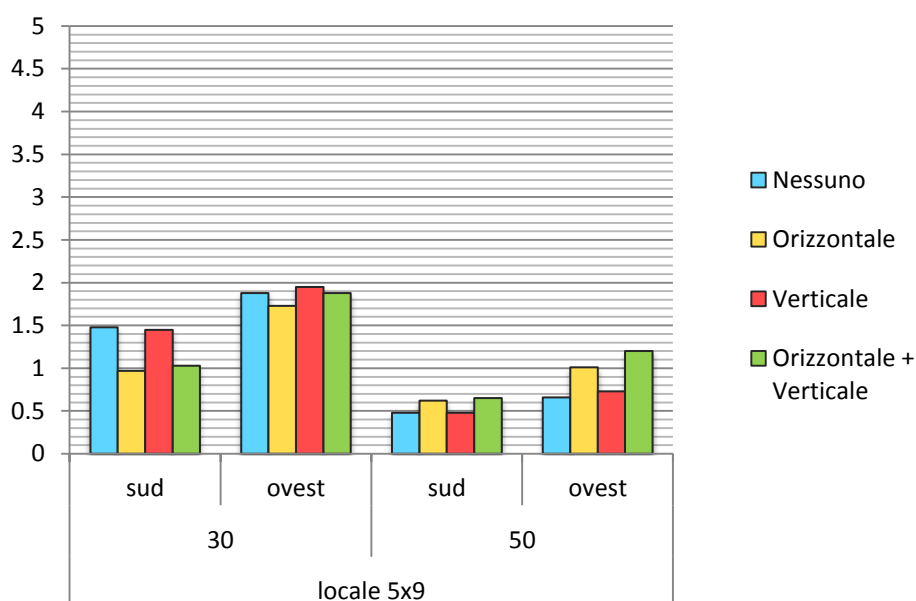
– locale 7x7 metri

- l'aggetto orizzontale comporta una riduzione del fabbisogno in tutti gli scenari tranne quelli esposti a Ovest con Af 50%. In generale comunque il valore peggiore si trova nell'esposizione Ovest;
- L'aggetto verticale tendenzialmente influisce poco, provocando un lieve miglioramento negli scenari esposti a Sud, mentre aumenta il fabbisogno di poco in quelli a Ovest;
- La combinazione dei due aggetti comporta una riduzione del fabbisogno solo negli scenari esposti a Sud; mentre un aumento in quelli esposti ad Ovest;

Grafico 8-23: influenza degli aggetti, locale 7x7(KWh/m² anno)

– locale 9x5 metri

- l'aggetto orizzontale comporta un aumento del fabbisogno in tutti gli scenari tranne quelli esposti a Sud con Af 30%. In generale comunque il valore peggiore si trova nell'esposizione Ovest;
- L'aggetto verticale tendenzialmente influisce poco, provocando un lieve miglioramento negli scenari esposti a Sud, mentre aumenta il fabbisogno di poco in quelli a Ovest con Af 50%;
- La combinazione dei due aggetti comporta una riduzione del fabbisogno solo negli scenari esposti a Sud con Af pari al 30%; per tutti gli altri è peggiorativa. Ancora una volta la situazione peggiore si ha a Ovest;

Grafico 8-24: influenza degli aggetti, locale 9x5 (KWh/m² anno)

Riassumendo in generale quanto sopra descritto ci si accorge che:

- l'applicazione degli aggetti ad Ovest comporta quasi sempre un peggioramento del fabbisogno;
- l'aggetto orizzontale ha quasi sempre un effetto migliorativo per gli scenari con area finestrata pari a al 30%, mentre tendenzialmente peggiora la situazione in quelli con maggior superficie finestrata;
- l'aggetto verticale tendenzialmente ha poca influenza, provocando un leggero miglioramento negli scenari esposti a Sud e un lieve peggioramento in quelli esposti ad Ovest;
- la combinazione dei due aggetti tendenzialmente provoca un aumento del fabbisogno per illuminazione, tranne per gli scenari esposti a Sud con area finestrata pari al 30%;

È opportuno fare alcune considerazioni in merito al motivo per cui aggiungendo degli aggetti il fabbisogno energetico per illuminare diminuisca. In linea generale gli sporti o le ostruzioni esterne vanno a ridurre la quantità di radiazione solare entrante e quindi sarebbe ragionevole aspettarsi un aumento della richiesta energetica da parte degli apparecchi luminosi per garantire il livello di illuminamento desiderato.

Il software però, tra i vari parametri che controlla, considera l'indice di abbagliamento DGI "Daylight Glare Index", per la valutazione del disturbo causato da estese sorgenti luminose, quali ad esempio il cielo.

In particolare il valore limite per non avere abbagliamento è 22 e il software, prima di raggiungere tale limite, va ad attivare i sistemi schermanti anche se non ci sono i valori di irraggiamento e temperatura esterna limite, come descritto nel Paragrafo 7.1.6.

Un funzionamento di questo tipo ha senso in quanto molto spesso nelle aule scolastiche in inverno i sistemi schermanti vengono attivati proprio per evitare questa problematica.

Ne consegue che gli oggetti possano avere un ruolo positivo nella diminuzione del fabbisogno energetico per illuminare in quanto il valore dell'indice di abbagliamento rimane contenuto e non si attivano i sistemi schermanti. In queste condizioni spesso gli apparecchi rimangono spenti o comunque accesi ma con un consumo minore.

8.1.3.5 Caratteristiche serramenti

Le caratteristiche dei serramenti che rientrano in gioco nel fabbisogno energetico per l'illuminazione sono le proprietà ottiche delle vetrazioni e l'incidenza del telaio rispetto al vetro.

Il vetro singolo simulato presenta un valore di trasmissione luminosa τ_v pari a 0,884, mentre il vetro doppio 0,786. Questa differenza fa sì che maggior radiazione luminosa entri all'interno dell'ambiente negli scenari con vetro singolo rispetto a vetro doppio. Ne risulta quindi che la differenza di fabbisogno fra le due tipologie varia tra il 15% e il 25%.

L'altro aspetto da tenere in considerazione è l'incidenza del telaio. Il telaio in alluminio presenta una larghezza di 57,2 mm, mentre per quello in legno di 68,9 mm. Questa differenza di larghezza determina una variazione dei fabbisogni che si aggira intorno al 6%.

Nei grafici seguenti si riportano gli esempi che mostrano quanto sopra scritto.

Grafico 8-25: variazione del fabbisogno di illuminazione in base al tipo di vetratura (KWh/m² anno)

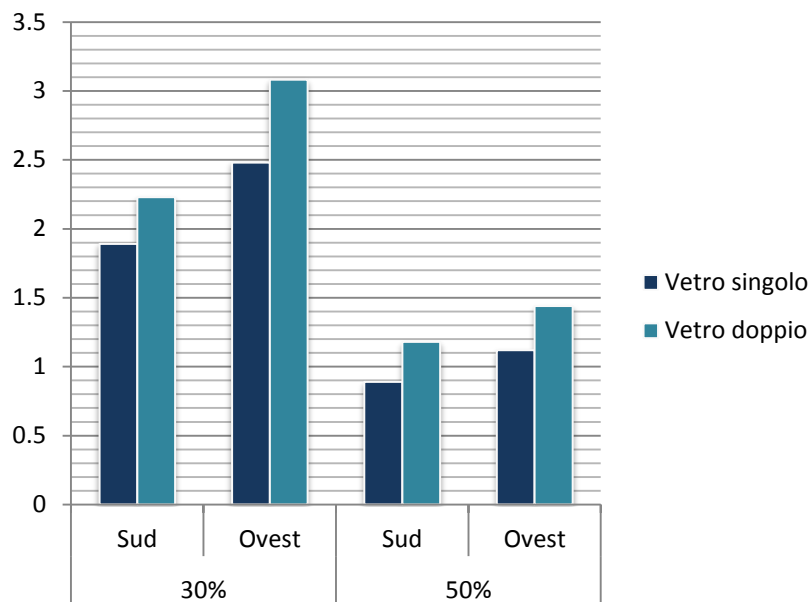
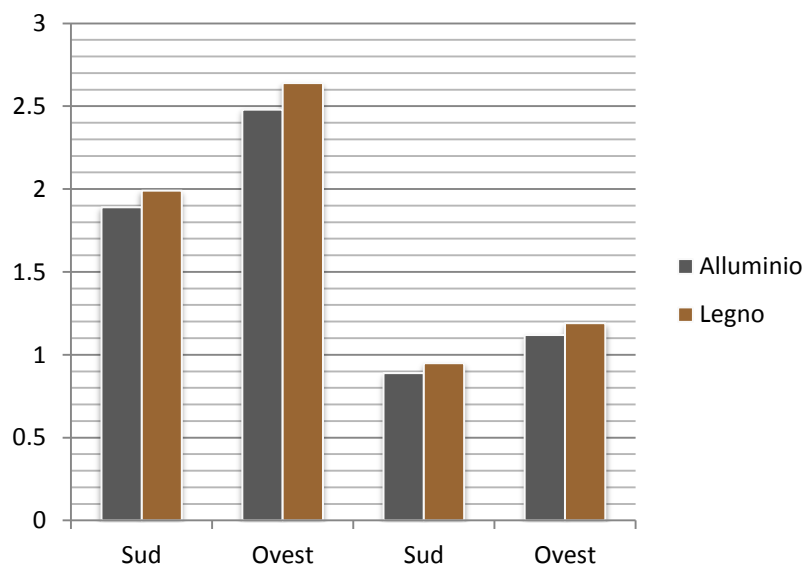


Grafico 8-26: variazione del fabbisogno di illuminazione in base al tipo di telaio (KWh/m² anno)



8.1.3.6 Il fabbisogno di illuminazione: confronto tra il metodo di calcolo dinamico e stazionario

Obiettivo di questo punto è confrontare puntualmente alcuni risultati ottenuti dalla modellazione dinamica svolta dal software con risultati che si ottengono dall'applicazione del metodo proposto dalle normative. In particolare si considera la norma ISO 10916 in quanto risulta essere più aggiornata e precisa rispetto alla UNI EN 15193, come visto in precedenza.

Da questa analisi è possibile determinare anche fabbisogni per illuminazione legati a sistemi di controllo non considerati dal software.

Lo studio è condotto su un locale avente la geometria 7x7 metri, esposto a Sud, senza aggetti, con potenza installata pari a 20 W/m² e un serramento in alluminio con singola vetratura, considerando il sistema di controllo dell'illuminazione peggiore previsto sia dal software che dalla normativa. Si analizzano i casi con area finestrata pari al 30% e al 50%.

Si ottengono i risultati riportati nella seguente tabella:

Tabella 8-8: confronto risultati Comfen con risultati normativa, Sud

	ISO 10916	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
30 %	23,52	28,56
50%	22,53	28,56

Passando all'esposizione Ovest invece si ottengono i seguenti valori:

Tabella 8-9: confronto risultati Comfen con risultati normativa, Ovest

	ISO 10916	COMFEN
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
30 %	23,99	28,56
50%	23,13	28,56

Come era già stato evidenziato nel Paragrafo 5.5, la peggior tipologia di controllo prevista dalla norma non corrisponde con l'assenza totale di controllo prevista dal software. In particolare considerare una tipologia di controllo di tipo manuale prevista dalla normativa determina una riduzione del fabbisogno ottenuto in assenza di controllo di valori compresi tra il 15 e il 21% in relazione a esposizione e area finestrata.

Considerando invece il sistema di controllo proposto dalla norma “no total switch-off” che non prevede la dimmerazione degli apparecchi, ma solo il loro spegnimento graduale al raggiungimento di livelli di illuminamento desiderati, si arriva a percentuali di riduzione rispetto alla totale accensione degli apparecchi, variabili tra il 28 e il 32%.

Un passo successivo prevede lo studio dello stesso locale sopra analizzato, ma con l’aggiunta dell’aggetto orizzontale. Si vuole quindi analizzare come questo elemento vada a influire sui consumi ricavati dalla normativa.

Tabella 8-10: influenza dell’aggetto orizzontale sui risultati della ISO 10916, Sud

	No aggetto	Aggetto Orizzontale
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
30 %	23,52	24,88
50%	22,53	23,55

Tabella 8-11: influenza dell’aggetto orizzontale sui risultati della ISO 10916, Ovest

	No aggetto	Aggetto Orizzontale
	kWh/m ² annuo	kWh/m ² annuo
30 %	23,99	25,15
50%	23,13	23,99

Dai risultati sopra riportati si può evidenziare come l’aggetto orizzontale comporti una aumento dei fabbisogni che varia tra il 5 e il 6%. Questo valore risulta essere in controtendenza rispetto a quello ottenuto simulando lo stesso locale in Comfen con un controllo di tipo Continuous/Off. Il motivo di questa differenza è legato alla dinamicità del software che in automatico attiva o disattiva i sistemi schermanti.

Un altro punto in cui si presenta una difficoltà nell’applicare il metodo previsto dalla norma consiste nell’analisi dell’aggetto verticale, in quanto non è possibile definire un angolo univoco tra il centro della finestra e l’aggetto. Essendoci infatti più finestre, ognuna presenta un cono d’ombra dovuto all’aggetto diverso. Pertanto per questa tipologia di aggetto e la conseguente combinazione dei due aggetti questo confronto non risulta realizzabile. Dalle considerazioni sopra riportate si evince che, anche per il calcolo del fabbisogno per illuminare i locali, il confronto tra i risultati ottenuti dal metodo statico e da quello dinamico risulta di difficile applicazione. In particolare più aumenta la complessità del modello e più aumentano le differenze tra i risultati.

8.2 Step 2: definizione del comfort termico

Il secondo step di analisi dei risultati prevede la valutazione dei valori di temperatura operante interna in free floating, ossia in assenza dell'impianto di climatizzazione estiva.

Bisogna ricordare che l'edificio risulta non occupato per gli interi mesi di Luglio e Agosto, quindi i valori di temperatura calcolati non considerano questi periodi che sono in realtà i più caldi dell'anno. Infatti da una prima lettura dei risultati del metodo dinamico ci si accorge che il giorno in cui la temperatura operante interna raggiunge il valore massimo risulta essere il 24 luglio.

Nel periodo invece in cui il locale risulta occupato, i valori massimi di temperatura si verificano il 26 giugno alle ore 17. In generale si ottengono, per i vari scenari, valori abbastanza elevati che oscillano tra i 30 e i 34°C, come si può vedere nel Paragrafo 12.5.

In particolare per capire se questi valori di temperatura possano essere considerati accettabili all'interno di un edificio esistente, si è ricorsi alla normativa **EN 15251**. Questa normativa propone un metodo (benessere adattivo) per la valutazione del comfort termico a partire proprio dalla temperatura operante interna dei locali.

La norma evidenzia che questo metodo è applicabile solo se il locale in esame presenti le seguenti caratteristiche:

- assenza impianto di raffrescamento e in generale della ventilazione meccanica. In particolare gli utenti devono poter aprire o chiudere le finestre;
- l'utenza deve svolgere attività di tipo sedentario;
- l'utenza deve poter liberamente modificare il proprio abbigliamento qualora lo reputi necessario.

Come si può notare sono caratteristiche che si trovano in accordo con l'aula scolastica analizzata.

Il valore di temperatura operante massima dipende dalla categoria di rispetto delle aspettative previste e dal valore della temperatura corrente esterna.

La norma infatti definisce quattro diverse categorie a cui corrispondono diverse aspettative di conseguimento del comfort. In particolare:

- la categoria 1 presuppone un alto livello di aspettativa ed è raccomandata per spazi occupati da persone che necessitano di particolari condizioni di comfort come ad esempio persone malate, bambini piccoli;
- la categoria 2 presuppone un normale livello di aspettativa e viene richiesta per edifici nuovi o ristrutturati;
- la categoria 3 prevede un accettabile livello di aspettativa e viene attribuita agli edifici esistenti;
- la categoria 4 raccoglie i valori fuori dalle precedenti categorie e può essere accettata solo pochi giorni l'anno;

A seconda della categoria viene quindi fornita una diversa formula per il calcolo della massima temperatura operante interna. In particolare le formule sono le seguenti

$$\vartheta_{oimax} = 0,33 \times \vartheta_{rm} + 18,8 + 2 \quad \text{Categoria 1}$$

$$\vartheta_{oimax} = 0,33 \times \vartheta_{rm} + 18,8 + 3 \quad \text{Categoria 2}$$

$$\vartheta_{oimax} = 0,33 \times \vartheta_{rm} + 18,8 + 4 \quad \text{Categoria 3}$$

La normativa propone un metodo per calcolare la temperatura media mobile esterna, che dipende strettamente dalle temperature esterne dei giorni precedenti all'analisi. In particolare si calcola con la seguente formula:

$$\vartheta_{rm} = (\vartheta_{ed-1} + 0,8 \times \vartheta_{ed-2} + 0,6 \times \vartheta_{ed-3} + 0,5 \times \vartheta_{ed-4} + 0,4 \times \vartheta_{ed-5} + 0,3 \times \vartheta_{ed-6} + 0,2 \times \vartheta_{ed-7}) / 3,8$$

dove ϑ_{ed-1} è la temperatura media esterna del giorno precedente, ϑ_{ed-2} di due giorni precedenti e così via.

Prendendo in considerazione quindi il valore della Temperatura media mobile esterna del 26 Giugno, giorno peggiore per tutti gli scenari, si è calcolato il valore della massima temperatura operante accettabile pari a 28,06°C in caso di categoria 1, 29,06°C in caso di categoria 2 e 30,06°C per la categoria 3.

In particolare di seguito si riporta l'andamento giornaliero della temperatura operante interna in relazione al valore massimo deducibile dalla norma; si può notare come il superamento del livello imposto dalla norma avvenga, per tutte e due le esposizioni considerate nelle ore pomeridiane. Ricordando che l'occupazione dell'aula avviene dalle 8 alle 15, si riscontrano almeno un paio d'ore di discomfort.

Per capire in quanti giorni all'anno si verificano le condizioni di discomfort (non rispetto delle aspettative) si è proceduto ad analizzare tutto il periodo estivo. In particolare ci si è resi conto che i valori peggiori si verificano da inizio Maggio a fine Giugno, mentre nei mesi di Aprile Settembre e Ottobre il rispetto del comfort risulta essere quasi sempre verificato.

Un ulteriore passo prevede la stessa analisi svolta in precedenza considerando però solo le ore di effettiva occupazione del locale. Seppur non sia previsto direttamente dalla normativa, si sceglie di calcolare la temperatura media mobile esterna considerando la media giornaliera delle temperature esterne delle sole ore di occupazione dei giorni precedenti. Quest'analisi serve per determinare se le ore di discomfort precedentemente evidenziate si trovano all'interno del periodo di occupazione o meno.

Di seguito si riportano prima i grafici relativi al confronto fra i risultati di temperatura operante ottenuti dal software con quelli della normativa nel giorno più caldo ed in seguito per l'intero periodo estivo.

Grafico 8-27: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 30%, no Aggetti

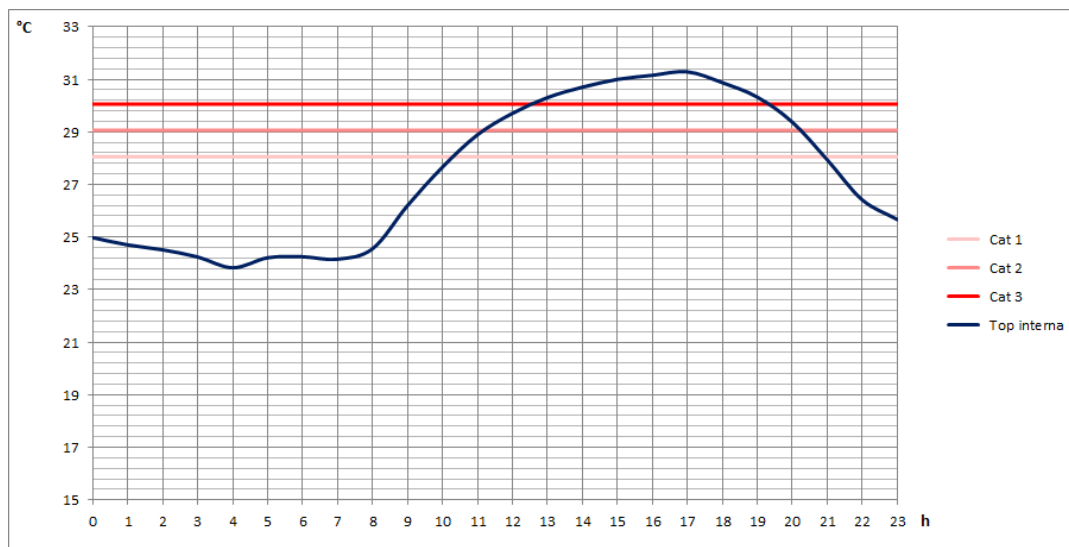
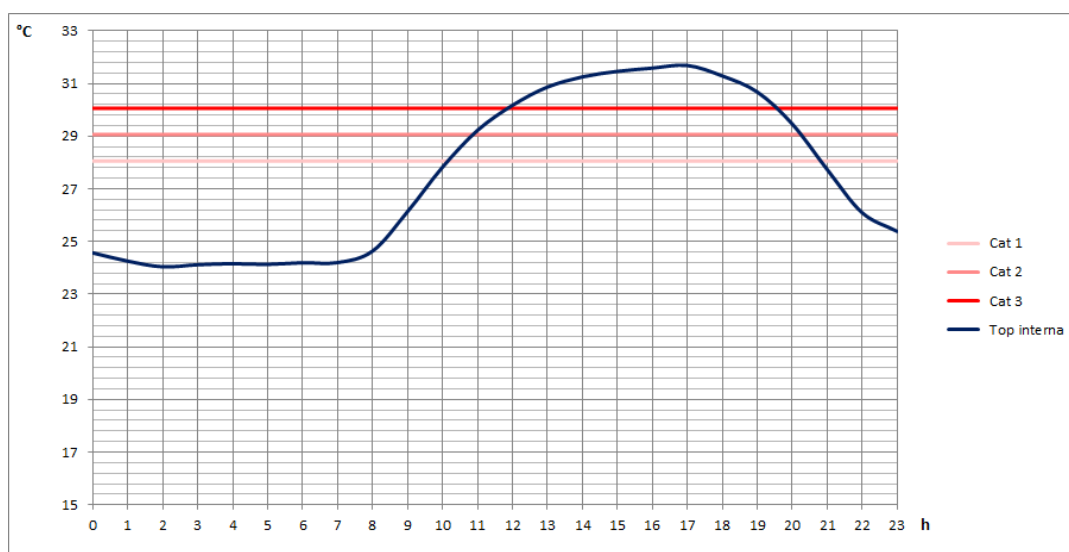


Grafico 8-28: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 50%, no Aggetti



La temperatura operante interna in generale supera il limite imposto dalla norma UNI 25251. Aumentando la percentuale di area finestrata la temperatura interna si alza e il periodo in cui il comfort non è rispettato di conseguenza si allunga.

Un ulteriore aumento della temperatura interna si verifica considerando l'esposizione Ovest. Come si può vedere dai grafici successivi il periodo di non rispetto del comfort

subisce una traslazione di qualche ora. Questa osservazione è importante in quanto l'aula scolastica è occupata solo fino alle 15:00. Le ore di discomfort quindi tendono a diminuire.

Grafico 8-29: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 30%, no Aggetti

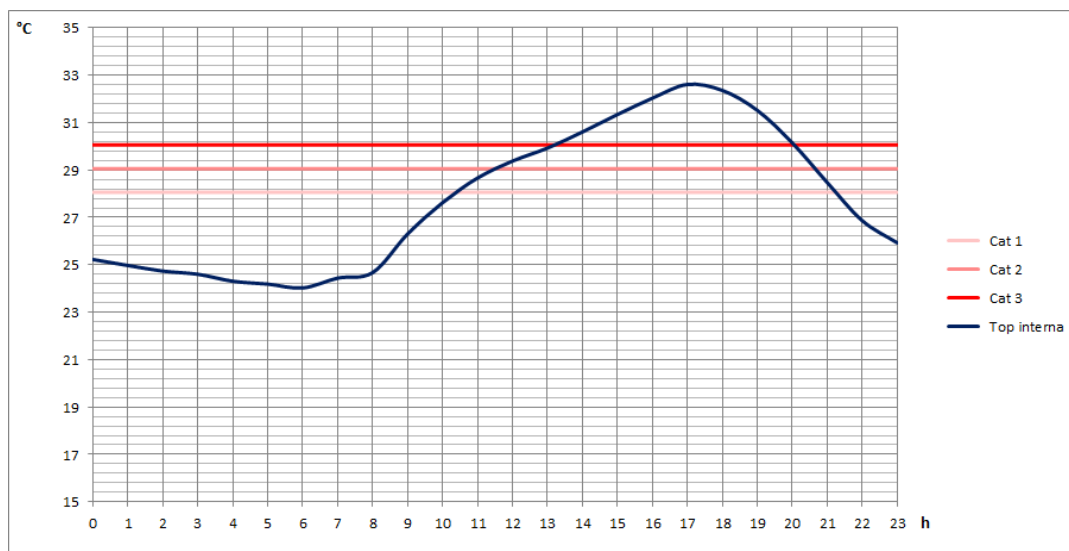
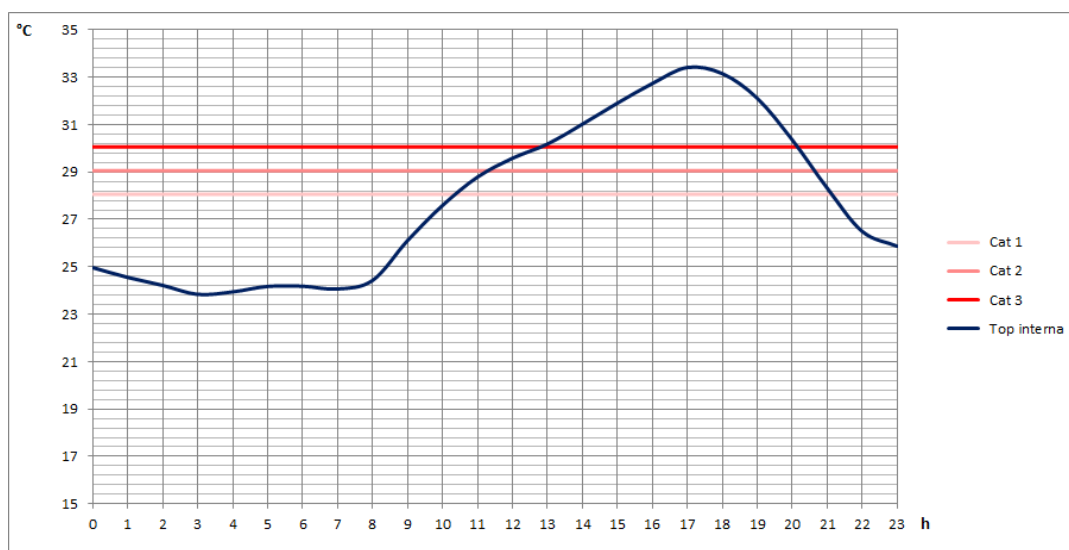


Grafico 8-30: confronto temperatura operante con la normativa, 26 Giugno, locale 5x5, Sud, Af 30%, no Aggetti



Si passa a questo punto ad analizzare il comfort sull'intero periodo estivo. Si analizza per prima uno scenario con esposizione Sud, area finestrata pari al 30% e senza aggetti e si verifica come la variazione di questi parametri influenza il comfort.

In appendice, al Paragrafo 12.4, vengono riportati i grafici riportanti l'andamento delle temperature operanti interne rispetto ai limiti imposti dalla norma UNI 15252.

Nella seguente tabella vengono raccolti i valori relativi al numero di ore di discomfort evidenziate negli esempi riportati in Appendice.

Tabella 8-12: ore di discomfort degli esempi sopra riportati, Categoria 3

Caratteristiche locale	Intero periodo estivo	Solo occupazione
Locale 5x5, esposto a sud, 30% di area finestrata, senza aggetto	29	1
Aggetto Orizzontale	11	0
Aggetto Verticale	24	0
Aggetto Orizzontale e verticale	7	0
50% di area finestrata, senza aggetto	41	4
Esposizione Ovest	37	1

Considerando invece una categoria 2 di edificio si ottengono i seguenti risultati:

Tabella 8-13: ore di discomfort degli esempi sopra riportati, Categoria 2

Caratteristiche locale	Intero periodo estivo	Solo occupazione
Locale 5x5, esposto a sud, 30% di area finestrata, senza aggetto	89	12
Aggetto Orizzontale	50	3
Aggetto Verticale	77	9
Aggetto Orizzontale e verticale	42	1
50% di area finestrata, senza aggetto	116	19
Esposizione Ovest	94	8

Si può notare come l'esposizione Ovest sia peggiorativa dal punto di vista del comfort nei mesi tra Aprile e Giugno in quanto aumentano sia i giorni in cui si verifica un superamento della temperatura consigliata, sia aumenta in questi giorni la differenza della situazione reale con le condizioni di comfort.

Anche la percentuale di area finestrata incide molto sul comfort termico in quanto gli apporti aumentano in maniera indicativa; in particolare questa tendenza è significativa per l'esposizione Ovest, in cui si hanno incrementi di temperatura anche di più di un grado. Ne

risulta quindi che le ore in cui la temperatura operante interna non rispetti le prescrizioni della norma aumentino.

Gli aggetti hanno un effetto migliorativo sul comfort termico interno in estate in quanto vanno a ridurre gli apporti solari. La tipologia di aggetto più efficiente è quella che combina l'aggetto verticale con l'aggetto orizzontale in quanto ne va a sommare i benefici. Ancora l'aggetto orizzontale funziona meglio rispetto a quello verticale.

Le considerazioni riguardanti i serramenti, il sistema di controllo dell'illuminazione e le schermature risultano simili a quelle già evidenziate per il fabbisogno di raffrescamento in quanto le due tematiche sono strettamente collegate.

La tipologia di serramento influisce poco sulla temperatura interna dei locali, in quanto si ottengono variazioni irrisorie al di sotto di un punto percentuale.

Anche il controllo dell'illuminazione e la potenza installata non comportano significative variazioni in termini di temperatura.

Per le schermature si evidenzia una differenza di efficacia dei diversi sistemi schermanti nelle due diverse esposizioni. A Sud la presenza di un tipo di schermatura piuttosto che un'altra non comporta particolari variazioni di temperatura, mentre ad Ovest questa differenza si accentua. Questo risultato è legato al fatto che la massima temperatura si registra alle 17, momento in cui la maggior radiazione solare arriva proprio ad Ovest e quindi il rendimento delle diverse schermature influisce di più. A Sud invece le schermature lavorano poco e solo sulla radiazione diffusa.

In particolare la schermatura con un miglior rendimento risulta essere la veneziana esterna seguita da veneziana interna e infine dalla tenda esterna, per lo stesso motivo evidenziato nella discussione dei risultati relativi al fabbisogno di raffrescamento.

A questo punto si passa all'analisi del comfort nelle effettive ore di occupazione dell'aula, come precedentemente anticipato. Si analizza lo stesso locale visto in precedenza così da poter comparare i risultati.

Con la seconda analisi si può osservare che delle ore di discomfort presenti nell'intera stagione estiva, ben poche sono localizzate nel periodo di occupazione del locale. In particolare si rientra facilmente nella categoria 3, mentre per la categoria 2 esistono configurazioni in cui ci sono parecchie ore di discomfort.

In particolare il metodo di calcolo che considera la media delle temperature esterne delle sole ore occupate crea un innalzamento del limite di comfort che arriva a un valore massimo di 31,75 °C.

9 L'incidenza dei parametri variabili sui fabbisogni

Dopo aver analizzato l'incidenza dei parametri in gioco nelle simulazioni, separatamente per i tre fabbisogni, si esegue un'analisi conclusiva più generale che considera contemporaneamente gli aspetti energetici.

Questa analisi verrà suddivisa ancora rispetto ai parametri variabili delle simulazioni in modo da avere un'idea più chiara e dettagliata della loro incidenza sul comportamento energetico totale del locale analizzato.

In particolare i risultati dei tre fabbisogni verranno raggruppati in grafici a radar in grado di mostrare chiaramente la variazione determinata dai parametri. Per costruire questi grafici sono stati considerati fissi i risultati derivanti da un parametro e si sono osservate le variazioni dei risultati derivanti dagli altri. Si tratta dunque di variazioni percentuali.

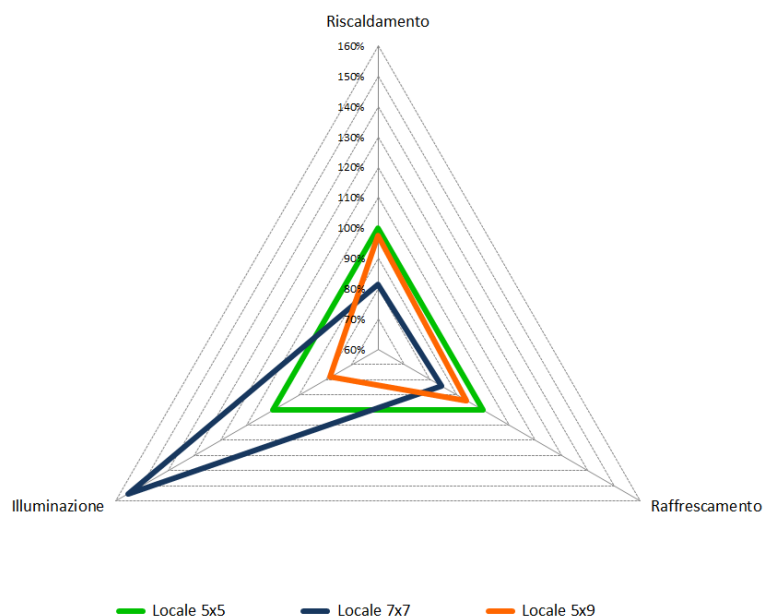
Al fine di apprezzare meglio la variazione nel fabbisogno per illuminazione in generale vengono considerati gli scenari aventi un sistema di controllo di tipo continuous/off, mentre le differenze tra questi e gli scenari senza alcun controllo verrà analizzata solo nella sezione riservata all'impianto di illuminazione.

9.1 Geometria del locale

Le tre differenti configurazioni di geometria e le due diverse percentuali di area finestrata determinano un comportamento dei fabbisogni che si può apprezzare nei seguenti grafici.

Analizzando l'influenza della geometria del locale, si riscontra quanto segue. Il fabbisogno per riscaldamento massimo si riscontra nel locale 5x5, seguito con poca differenza dal locale 9x5 e infine dal locale 7x7 che presenta una riduzione significativa rispetto agli altri, pari al 20%. Stessa tendenza si riscontra nel fabbisogno per raffrescamento con differenze tra il locale 7x7 e gli altri due rispettivamente del 7% e del 15%. Discorso completamente diverso si riscontra nel fabbisogno per l'illuminazione. La maggior profondità del locale 7x7 determina un valore decisamente maggiore rispetto alle altre due geometrie, pari al 55% in più rispetto al locale 5x5 e al 77% in più rispetto al locale 9x5. La differenza tra i due locali con uguale profondità è determinata dalla maggior larghezza della facciata e dalla maggior area finestrata conseguente, che determinano quindi un illuminamento disponibile maggiore.

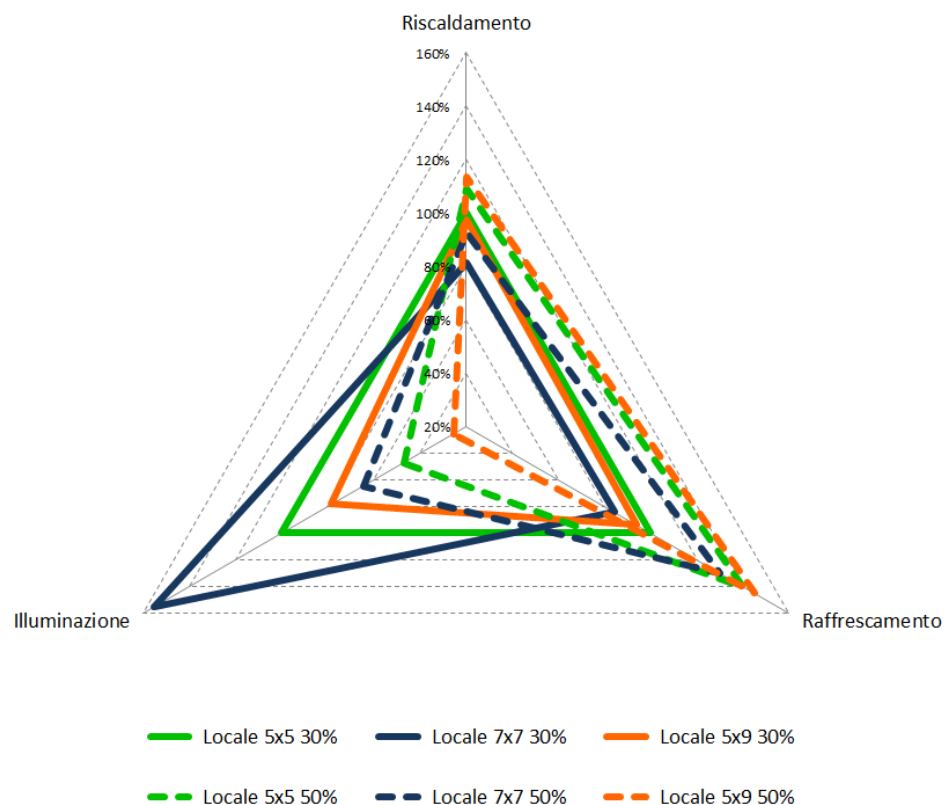
Grafico 9-1: influenza geometria locale sui fabbisogni, con controllo illuminazione



Il grafico seguente considera invece la diversa area finestrata. Come si può notare in generale l'aumento di superficie trasparente genera un incremento notevole del fabbisogno per raffrescamento, all'incirca del 35%, mentre comporta un incremento per il riscaldamento del 5/6%. Discorso totalmente opposto per il fabbisogno energetico per l'illuminazione che, con il passaggio da 30% a 50% di superficie finestrata, diminuisce di valori anche superiori al 40%.

In particolare si evidenzia che il locale 7x7, che prima presentava un valore decisamente più elevato rispetto agli altri a seguito di questa variazione tende a ridurre le differenze. Questa tendenza dimostra che più i locali sono profondi, più necessitano una grande quantità di area finestrata per poter garantire un adeguato livello di illuminamento senza l'ausilio dell'illuminazione artificiale.

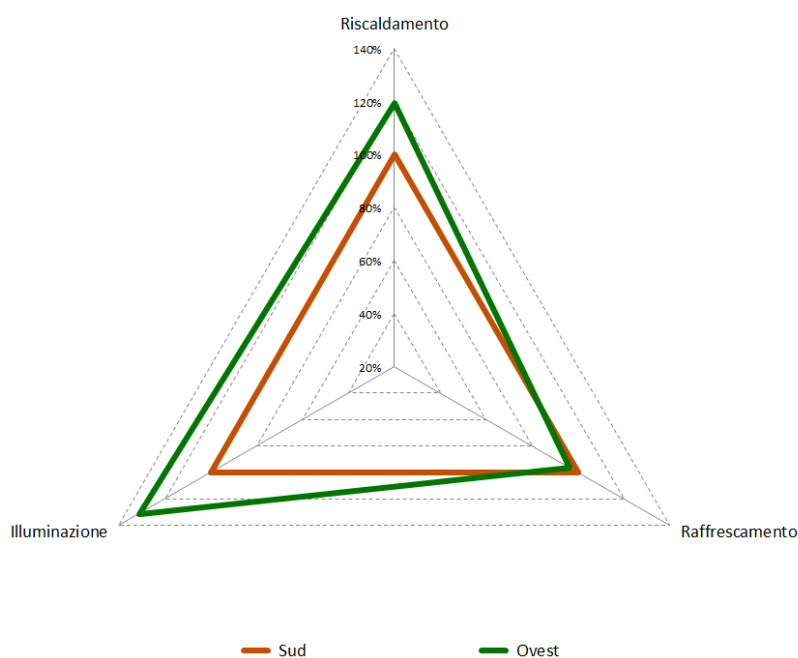
Grafico 9-2: influenza area finestrata sui fabbisogni, controllo illuminazione



9.2 Esposizione

Un ruolo importante per l'andamento dei fabbisogni è svolto dall'esposizione. Di seguito si riportano gli andamenti di scenari uguali ma con esposizione differente.

Grafico 9-3: influenza dell'esposizione sui fabbisogni



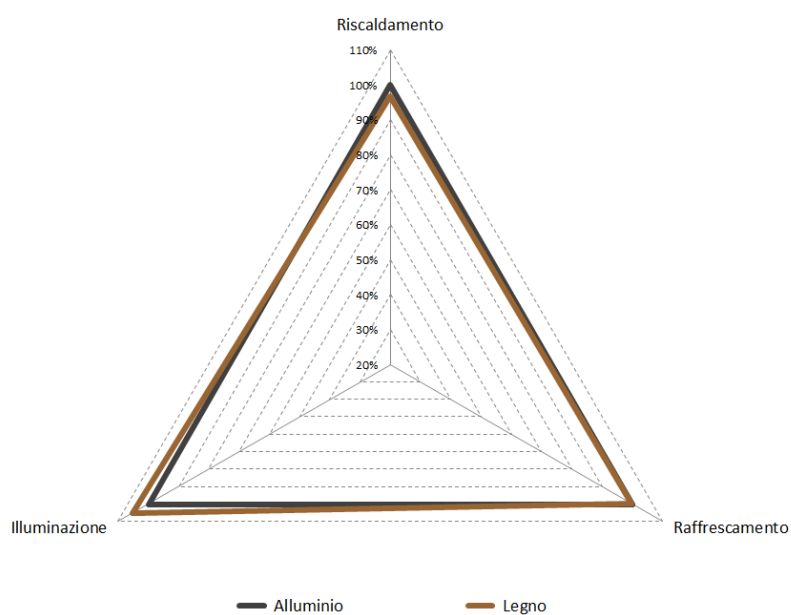
L'esposizione Ovest è in generale peggiore dal punto di vista energetico rispetto a quella Sud. In particolare si può osservare come il fabbisogno per l'illuminazione aumenti, in maniera considerevole, di circa il 24% e il fabbisogno per riscaldamento aumenti del 16%. Il fabbisogno per raffrescamento invece subisce una leggera riduzione attorno al 4%.

9.3 Caratteristiche dei serramenti

Le caratteristiche dei serramenti che sono state considerate nelle simulazioni riguardano la tipologia di vetratura e il materiale del telaio.

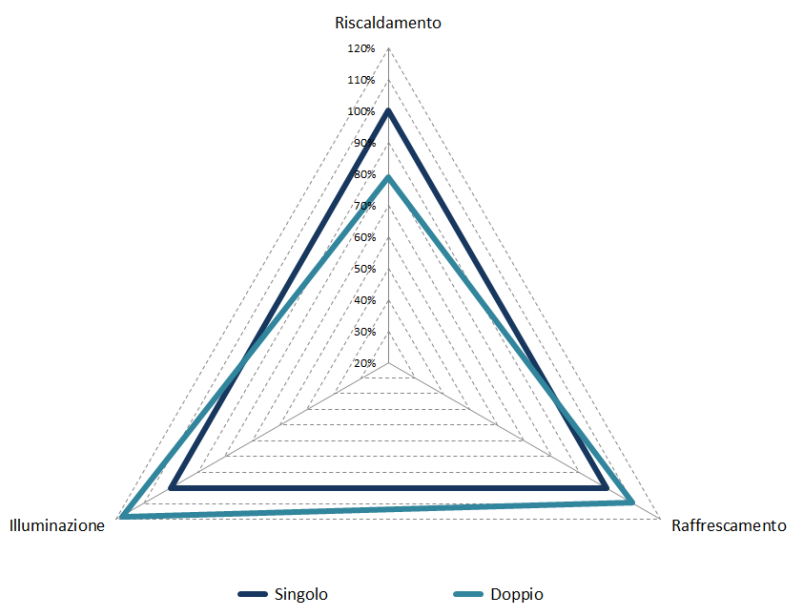
Per primo si visualizzano i risultati che riportano la differenza nell'aver un telaio in alluminio piuttosto che in legno.

Grafico 9-4: influenza del materiale del telaio sui fabbisogni



Si può notare che la differenza tra i due materiali non influenza in modo rilevante i fabbisogni. La massima variazione si ha nel fabbisogno per l'illuminazione che incrementa il suo valore del 5%. Si analizza ora la differenza di prestazione tra le due vetrate.

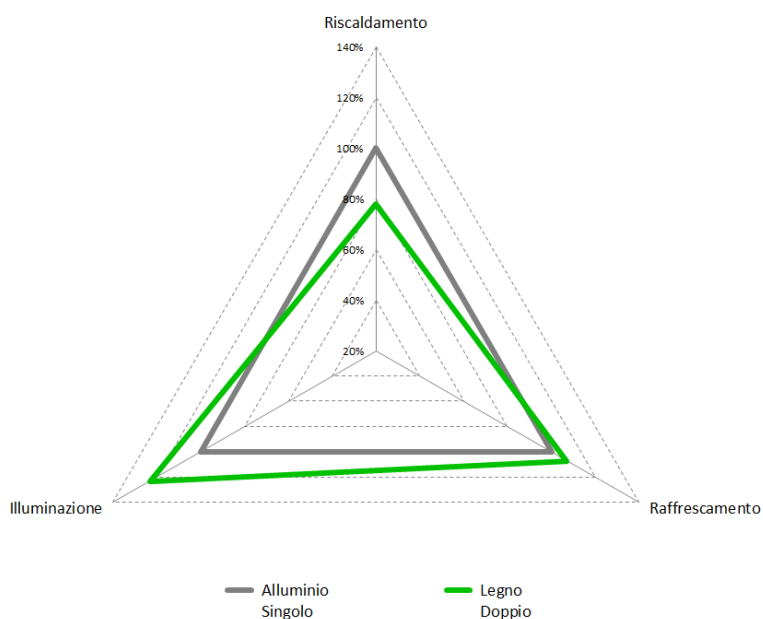
Grafico 9-5: influenza della tipologia di vetrazione sui fabbisogni



La tipologia di vetrazione influenza invece in maniera più significativa i fabbisogni. In particolare va a ridurre di valori compresi tra il 25 e il 30% il fabbisogno per riscaldamento, mentre aumenta quello per raffreddamento ed in particolare il fabbisogno per illuminare. Quest'ultimo subisce una variazione compresa tra il 15 e il 20%.

A questo punto si passa ad analizzare la combinazione delle due proprietà, ossia si confronta un serramento in alluminio con vetro singolo con uno in legno con vetro doppio.

Grafico 9-6: influenza delle caratteristiche dei serramenti sui fabbisogni



Si può notare che il risultato rispecchia la combinazione delle due diverse soluzioni.

Si ottiene un incremento dell'influenza sui fabbisogni per riscaldamento e illuminazione, mentre l'influenza sul fabbisogno per raffrescamento è mitigata dai comportamenti diversi del materiale telaio e della tipologia di vetrazione.

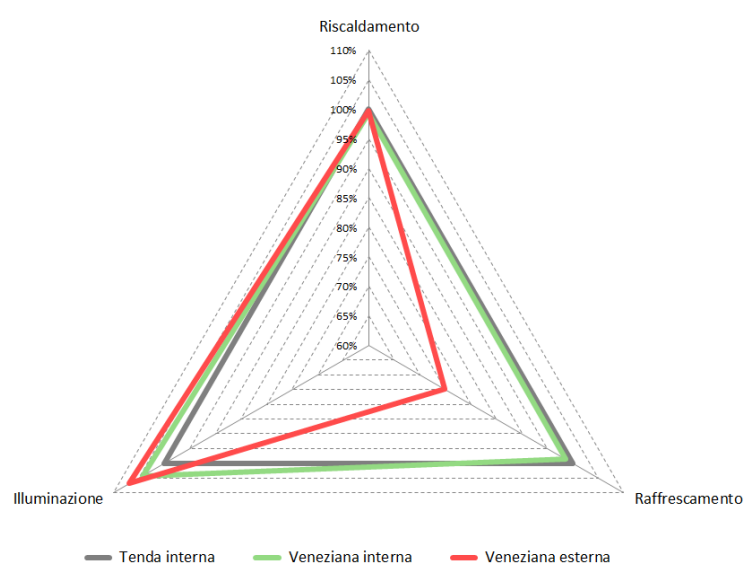
In particolare il fabbisogno per riscaldare si riduce di un valore addirittura pari al 29%, mentre quello per raffrescare arriva a un valore di riduzione del 19%.

Discorso diverso invece per il fabbisogno per raffrescare. Se prima la sola vetrazione provocava un aumento del fabbisogno pari al 9%, mentre il diverso telaio praticamente non comporta alcuna variazione, combinando telaio e vetrazione si ottiene un aumento del 7%, valore compreso tra i due precedenti.

9.4 Schermature

Una prima considerazione da ricordare sulle schermature è legata al loro funzionamento. Nelle simulazioni il loro utilizzo è ottimizzato per il periodo estivo, avendo definito che la loro attivazione avviene con la contemporanea presenza di radiazione incidente sulla vetratura pari a 300 W/m^2 e di temperatura esterna pari a 20°C . Detto questo, nel grafico seguente si visualizza la loro influenza sui fabbisogni.

Grafico 9-7: influenza delle schermature sui fabbisogni



Come si può notare dal grafico le schermature praticamente non funzionano in inverno, in quanto si ottengono delle variazioni del fabbisogno per il riscaldamento minori dell'1%. In estate invece la schermatura più performante è di gran lunga la veneziana esterna che provoca delle riduzioni rispetto alle altre due di circa il 25%. I due sistemi schermanti interni praticamente si equivalgono in quanto presentano una differenza reciproca di meno del 2%. Questa variazione di efficienza determina di conseguenza anche una variazione di fabbisogno per l'illuminazione. In particolare, come è lecito attendersi, più le schermature lavorano e più aumenta la necessità di luce artificiale. Bisogna però evidenziare che questa differenza non incide molto sul valore del fabbisogno in quanto la quantità di energia per illuminare in estate risulta poco significativa rispetto al bilancio annuale. È in inverno infatti che c'è la maggior richiesta energetica per garantire l'illuminamento desiderato.

9.5 Aggetti

Gli aggetti influiscono in maniera rilevante sui fabbisogni. In particolare il loro comportamento varia a seconda dell'esposizione.

Viene riportato quindi un grafico per ciascuna esposizione.

Grafico 9-8: influenza degli aggetti sui fabbisogni, Sud

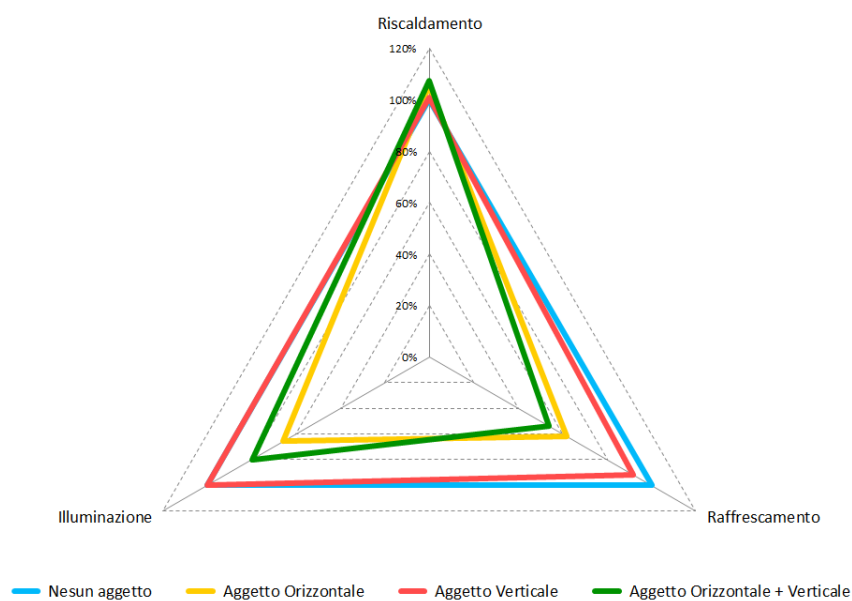
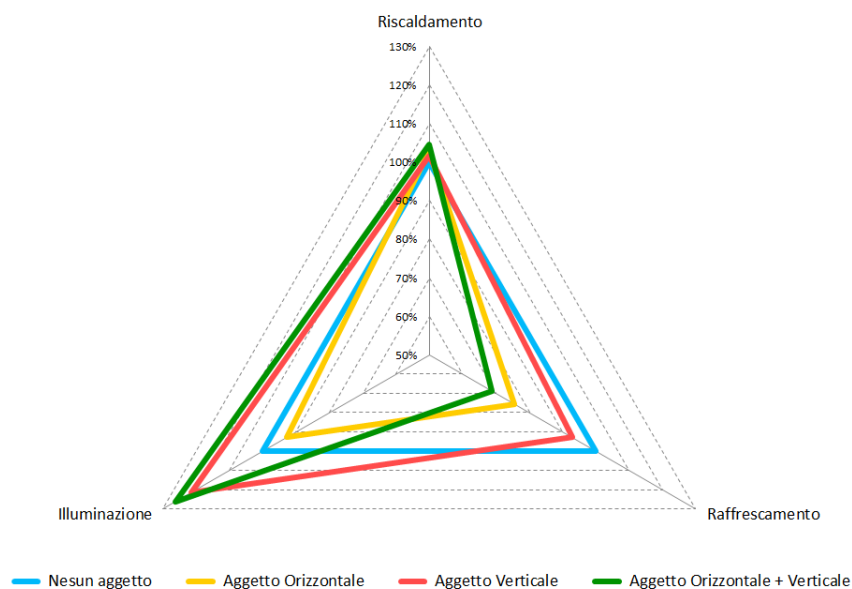


Grafico 9-9: influenza degli aggetti sui fabbisogni, Ovest



In generale gli aggetti sia ad Est che ad Ovest consentono una notevole riduzione dei carichi provenienti dalla radiazione solare. Hanno quindi un comportamento utile alla riduzione dei consumi legati al fabbisogno per raffrescamento mentre aumentano quello necessario al riscaldamento e in generale all'illuminazione.

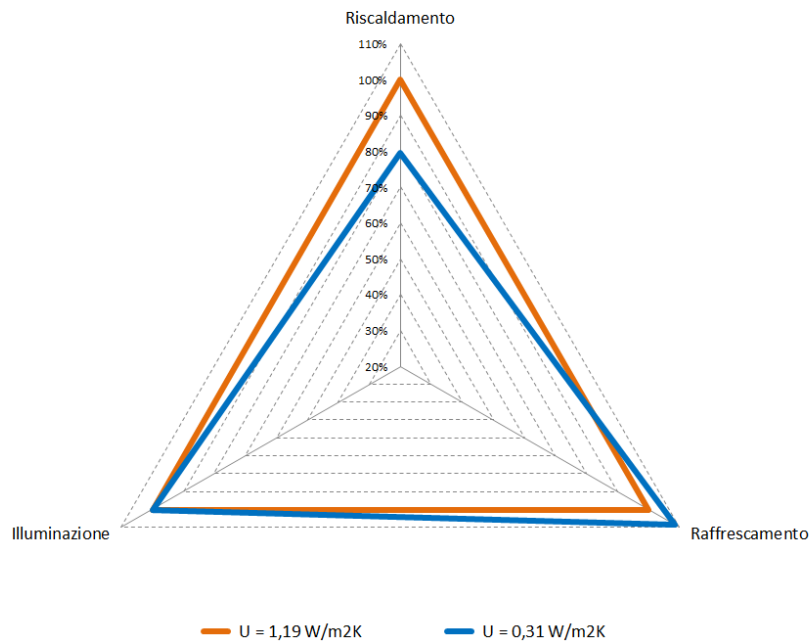
In particolare si evidenziano le caratteristiche tipologia per tipologia:

- L'aggetto orizzontale influisce molto sulla variazione dei fabbisogni. Fa aumentare la quantità utile a riscaldare di valori compresi tra il 5 e il 7%, mentre diminuisce la quantità per raffrescare di valori più notevoli. Si passa infatti da risparmi di circa il 40% a Sud a risparmi del 25% ad Ovest. A differenza degli altre tipologie di aggetti quello orizzontale diminuisce anche il fabbisogno per illuminare gli ambienti del 35% a Sud e del 25 a Ovest. Questo risultato può risultare strano, ma è dovuto all'ombra portata che evita il raggiungimento sia di una radiazione solare incidente sul serramento di 300 W/m^2 , sia di un valore di abbagliamento sul piano di lavoro, dovuto a una fonte luminosa estesa, superiore a 22, e la conseguente attivazione dei sistemi schermanti.
- L'aggetto verticale, così pensato, non ha grande influenza sulla variazione dei consumi. Un dato significativo si riscontra solo nell'aumento del fabbisogno per illuminazione ad Ovest, che si attesta attorno al 20%
- La combinazione dei due aggetti ha un comportamento che risente delle caratteristiche sia dell'aggetto verticale sia di quello orizzontale. In generale comporta una notevole riduzione del fabbisogno per raffrescamento, con valori prossimi al 50% a Sud e al 30% a Ovest e di conseguenza comporta un aumento più considerevole di quello per riscaldare pur mantenendo valori minori al 10%. Per quel che riguarda il fabbisogno per illuminare i due aggetti ne comportano una riduzione attorno al 20% a Sud mentre lo peggiorano di una valore superiore al 25% ad Ovest.

9.6 Trasmittanza dell'involucro opaco

Il valore di trasmittanza dell'involucro opaco va ad influire solo sui fabbisogni per il riscaldamento e il raffrescamento del locale.

Grafico 9-10: influenza dell'involucro opaco sui fabbisogni



In particolare passando da un valore di trasmittanza di $1,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ a $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, si ottiene una diminuzione del fabbisogno per riscaldare del 20% mentre un aumento di quello per raffrescare del 9%.

9.7 Impianto di illuminazione

Le ipotesi relative all'impianto d'illuminazione riguardano sia la potenza installata per unità di superficie che la tipologia di sistema di controllo. In particolare si sono pensate due potenze installate diverse con valori pari a 10 W/m^2 e 20 W/m^2 , e due diversi scenari di controllo dell'illuminazione, uno che prevede l'accensione continuativa degli apparecchi luminosi e l'altro che dimmerà e spegne i corpi in base alla disponibilità di luce diurna. Di seguito vengono riportati i grafici che mostrano questi due confronti.

Grafico 9-11: influenza della potenza elettrica installata sui fabbisogni

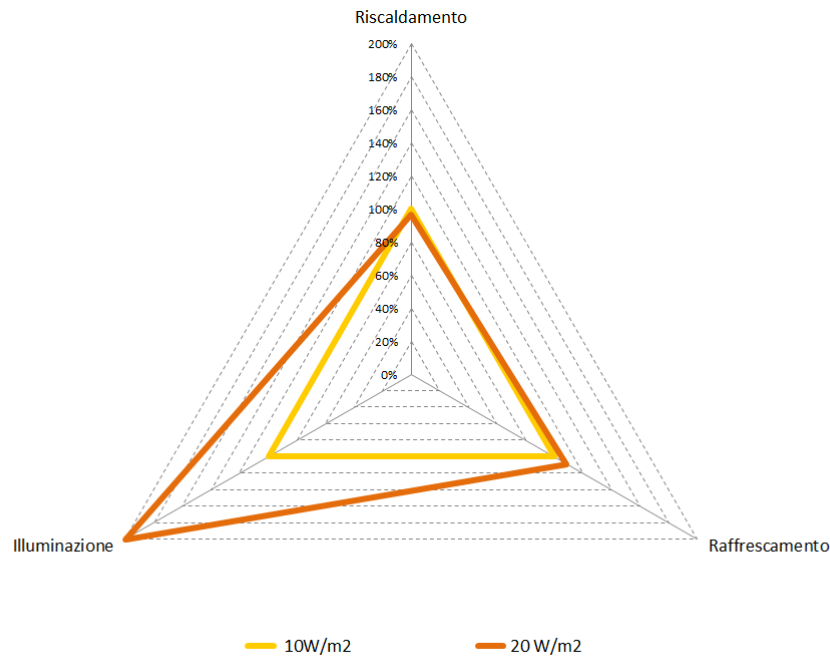
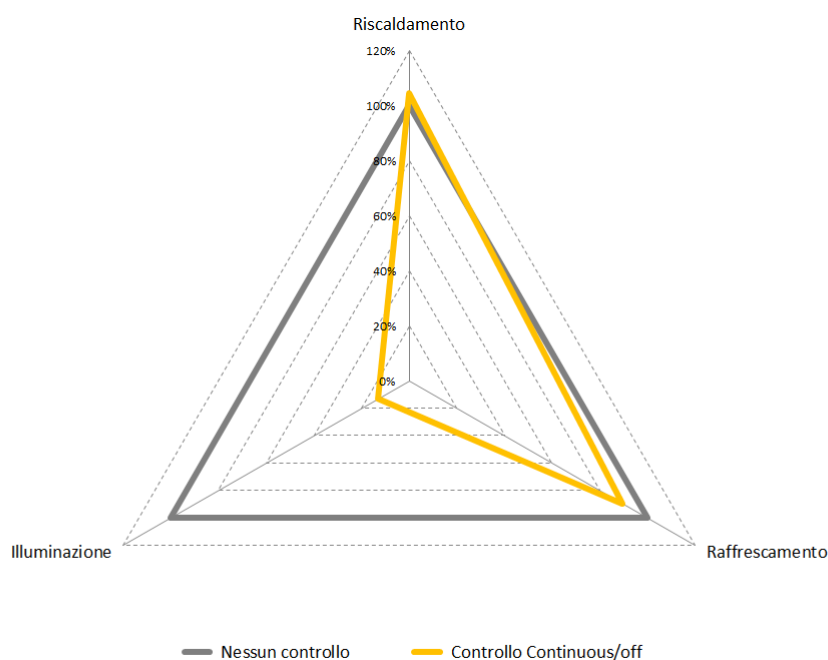


Grafico 9-12: influenza del sistema di controllo dell'illuminazione sui fabbisogni



Si può notare come la potenza elettrica installata influisce in maniera significativa solo sul fabbisogno per illuminare, mentre provoca delle variazioni meno importanti sui fabbisogni per riscaldare e raffrescare. In particolare gli apparecchi luminosi generano un carico termico che va quindi ad essere favorevole in inverno mentre sfavorevole d'estate.

La presenza del sistema di controllo dell'illuminazione ha un comportamento analogo: andando a ridurre le ore di accensione degli apparecchi luminosi si va a peggiorare il fabbisogno per riscaldamento, mentre si migliora quello per raffrescamento. Si tratta di variazioni rispettivamente pari all'8% e al 18%.

Il dato più significativo è la potenzialità di riduzione del fabbisogno elettrico per illuminare. Si arriva addirittura ad una riduzione del 93%.

10 Conclusioni

Il presente studio è caratterizzato da un duplice obiettivo:

- la definizione delle migliori configurazioni di involucro e impiantistiche per ottenere la riduzione dei consumi di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione di un'aula scolastica e per migliorare il comfort termico;
- il confronto tra i risultati ottenuti dai metodi stazionari suggeriti dalle normative con quelli derivanti dai metodi dinamici proposti dai software.

Particolarmente interessante è stato lo studio del fabbisogno energetico per l'illuminamento dei locali che, benché sia stato inserito da qualche anno all'interno delle normative è considerato di secondaria importanza rispetto ad altri aspetti energetici. Dal presente studio si evince che l'installazione dei moderni sistemi di controllo dell'illuminazione possono produrre riduzioni di questo fabbisogno significative anche fino al 90%. Negli edifici scolastici infatti, a causa di caratteristiche legate all'occupazione e alla geometria stessa dei locali, spesso la luce diurna risulta sufficiente a garantire l'illuminamento sul piano di lavoro richiesto.

Il fabbisogno energetico per l'illuminazione, se non controllato, può raggiungere valori anche nell'ordine dei 20-25 kWh/m² all'anno, ovvero simili a quelli di un fabbisogno termico per un edificio ben isolato. Trasformando questo valore in energia primaria si ottiene addirittura il doppio.

In generale dallo studio si evince che la geometria del locale influenza i fabbisogni. In particolare la maggior profondità dei locali incide negativamente sul fabbisogno energetico per l'illuminazione mentre ha un effetto positivo sia sui consumi energetici per il riscaldamento che per raffrescamento in quanto la superficie disperdente verso l'esterno risulta avere minore influenza. Discorso opposto invece può essere fatto per la maggior larghezza della facciata e per la maggior percentuale di area finestrata che riducono il fabbisogno per illuminare i locali ma aumentano in maniera significativa i fabbisogni per riscaldare e raffrescare gli edifici. Queste considerazioni ovviamente tengono conto della configurazioni di aula studiata, con un'unica parete disperdente e le altre adiabatiche

Dall'analisi delle caratteristiche dei serramenti si può concludere che la loro sostituzione con altri nuovi e più prestanti provoca indubbiamente vantaggi dal punto di vista termico in inverno ma contemporaneamente crea leggeri aumenti dei fabbisogni per il raffrescamento e l'illuminazione. In generale la riduzione del fabbisogno per riscaldare risulta molto più influente rispetto agli aumenti degli altri due fabbisogni.

Avendo considerato il funzionamento dei sistemi schermanti principalmente in estate si evince che la migliore soluzione risulta essere la veneziana esterna che è in grado di garantire una riduzione del fabbisogno per raffrescare gli edifici molto più elevata rispetto a tende e veneziane interne.

Per quel che riguarda gli oggetti da aggiungere all'esterno del locale, si è riscontrato che l'oggetto verticale così come è stato pensato non ha particolare incidenza sui fabbisogni. In particolare questa incidenza diminuisce all'aumentare della larghezza del locale in quanto il cono d'ombra creato va a ridursi. L'oggetto orizzontale invece influisce molto sulla variazione dei fabbisogni. In particolare, esso comporta una riduzione notevole dei consumi energetici per il raffrescamento e l'illuminamento dei locali. Quest'ultimo comportamento è dovuto al fatto che, andando mascherare parte della radiazione solare, evita problemi legati all'abbagliamento, condizione necessaria all'attivazione dei sistemi schermanti.

Dall'analisi del comfort termico degli scenari simulati si evince che nel periodo di occupazione del locale ci sono pochissime ore in cui si supera la soglia di discomfort, calcolata applicando il metodo del benessere adattivo. Le ore peggiori in cui si riscontrano le massime temperature operanti interne infatti risultano essere le 16:00 e le 17:00, ore in cui il locale è considerato vuoto.

L'analisi è stata condotta considerando una categoria di aspettativa 3, che comporta quindi valori accettabili di temperatura interna abbastanza elevati. È chiaro che nel caso di ristrutturazione questa soglia deve scendere ed è importante quindi la scelta delle migliori configurazioni di involucro e impianti. In generale il comportamento della temperatura interna si allinea con quello del fabbisogno energetico per raffrescare gli edifici. A un maggior fabbisogno infatti corrisponde una maggior temperatura interna.

Il confronto tra i risultati ottenuti dall'applicazione delle normative con i risultati ottenuti da software dinamici è risultato di difficile applicazione sia per l'inconciliabilità dei metodi di calcolo sia per la diversa considerazione di alcuni parametri che influenzano i risultati in modo significativo.

11 Bibliografia

- COMFEN. 2013. 5 Beta edn. LBNL Window & Daylight Software.
- Daysim. 3.1b.
- DIALux 4. 4.11.0.1. DIAL.
- ReluxPro. 2014.2.0.3. Relux Informatik AG
- TempAir 1.2. ANIT
- <http://www.webgis.fondazionecriplo.it/public/auditgis/> [10/21, 2014].
- <http://www.cened.it/home> [29/10, 2014].
- <http://www.istat.it/it/> [10/11, 2014].
- Piano d'Azione Italiano per l'Efficienza Energetica. 2014
- CORGNATI, S.P., FABRIZIO, E., ARIAUDO, E.F. and ROLLINO, L., 2011. 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. Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA edn.
- DESIDERI, U. and PROIETTI, S., 2002. Analysis of energy consumption in the high schools of a province in central Italy. *Energy and Buildings*, **34**(10), pp. 1003-1016.
- KATAFYGIOTOU, M.C. and SERGHIDES, D.K., 2014. Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in Cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school. *Energy and Buildings*, **72**(0), pp. 8-16.
- KIM, T., LEE, K. and HONG, W., 2012. Energy consumption characteristics of the elementary schools in South Korea. *Energy and Buildings*, **54**(0), pp. 480-489.

- Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio 25 ottobre 2012, 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 Testo rilevante ai fini del SEE (Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea L315/1).
- Decreto legislativo 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 (Gazzetta Ufficiale del 18 luglio 2014 n. 165).
- Decreto Ministeriale 26/06/2009, Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici (Gazzetta ufficiale 10/07/2009 n. 158).
- Decreto Regionale 11 Giugno 2009 n. 5796, Aggiornamento della procedura di calcolo per la certificazione energetica degli edifici. (Bollettino Ufficiale Regionale 22 Giugno 2009 n. 25 - Supplemento Straordinario 26 Giugno 2009, n.4).
- SAIT, H.H., 2013. Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and humid area. *Energy Conversion and Management*, **66**(0), pp. 143-152.
- ISO 10916 Calculation of the impact of daylight utilization on the net and final energy demand for lighting. 2014.
- UNI EN ISO 13792 Prestazione termica degli edifici. Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianto di climatizzazione. Metodi semplificati. 2012.
- UNI 10375 Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti. 2011.
- UNI EN 410 Vetro per edilizia. Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate. 2011.

- UNI EN 13363-1 Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate. Calcolo della trasmittanza solare e luminosa. Parte1: metodo semplificato. 2008.
- UNI EN 15193 Prestazione energetica degli edifici: requisiti energetici per illuminazione. 2008.
- UNI 15251 Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica. 2008.
- UNI EN ISO 13786 Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo. 2008.
- UNI EN ISO 13791 Prestazione termica degli edifici. Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione. Criteri generali e procedure di validazione. 2005.
- UNI 10349 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. 1994.

12 Appendice

12.1 Validazione del foglio di calcolo della Temperatura estiva

Il metodo di calcolo proposto dalla UNI 10375 è stato applicato in un foglio di calcolo. Per capire il suo funzionamento si propone la realizzazione del calcolo dell'esempio proposto dalla normativa.

Verrà inoltre proposto lo stesso calcolo utilizzando TempAir 1.2, un software sviluppato dall'ANIT (Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico) che utilizza la stessa norma per determinare la temperatura interna estiva in assenza di climatizzazione.

Si tratta di un ambiente situato in una località di latitudine 40° , con parete esterna orientata ad Ovest, tetto piano; gli altri elementi d'involucro si suppongono adiabatici. In particolare la geometria del locale è riportata nell'Immagine 12-1.

La superficie vetrata di $3,5 \text{ m}^2$ è costituita da un doppio vetro e da uno schermo esterno.

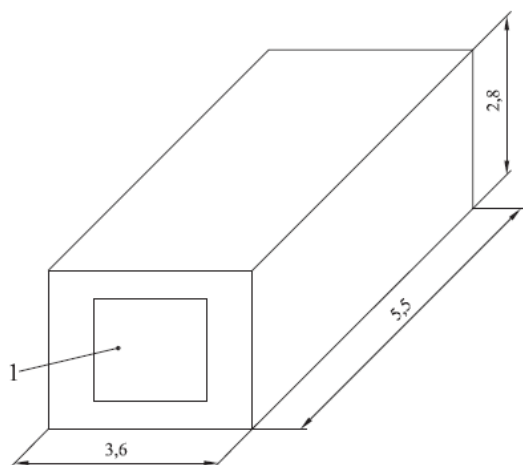
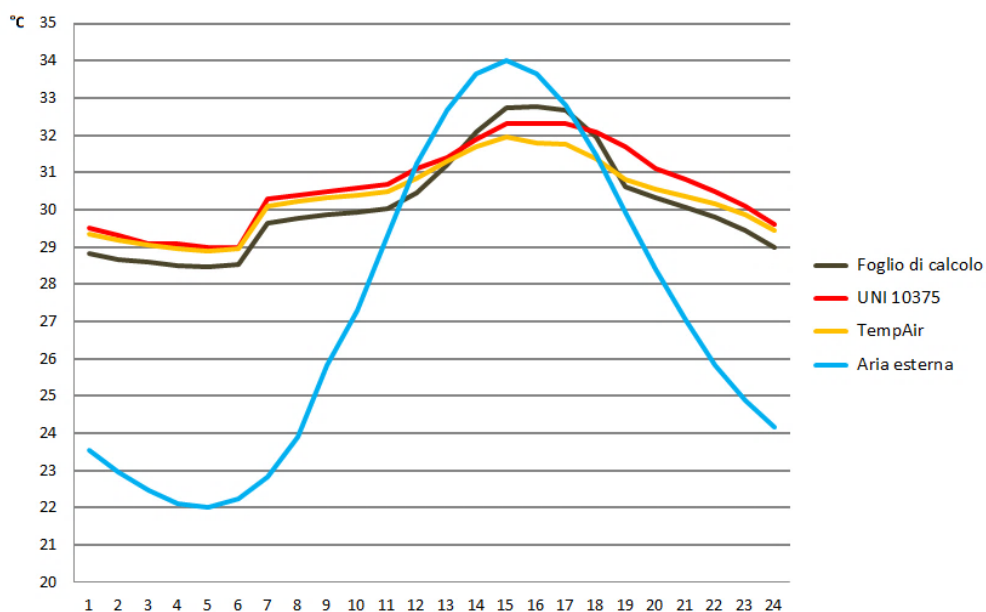


Immagine 12-1: geometria locale

Sono stati inseriti nel foglio di calcolo e nel software tutti i parametri in gioco tra cui i dati climatici, i parametri termofisici dell'involucro, i parametri di trasmissione solare, i parametri legati al comportamento dell'utenza e le condizioni al contorno, uguali a quelli descritti dalla norma

Grafico 12-1: confronto temperature operanti interne



Dal grafico si evince che i risultati ottenuti dal foglio di calcolo e dal software non sono perfettamente uguali a quelli ottenuti dalla norma. In particolare il foglio di calcolo presenta variazione tra valore massimo e valore minimo maggiore rispetto alla normativa. Si tratta di variazioni nell'ordine di mezzo grado.

Tabella 12-1: confronto tra temperature operanti

	Foglio di calcolo	UNI 10375	Tempair
max	32.8	32.3	32.0
medio	30.2	30.6	30.3
min	28.5	29	28.9

12.2 Preparazione dei modelli

Per capire come modellare tutti gli scenari precedentemente descritti, si è studiato il metodo di simulazione del software COMFEN.

Una prima considerazione riscontrata riguarda la trasmittanza termica dell'involucro opaco. Per il software infatti questo valore può essere associato direttamente al dato climatico. Si sono quindi creati due file climatici diversi.

Per evitare di creare singolarmente ogni scenari, si sono utilizzati i file CSV, che contengono le definizioni degli scenari e dei loro serramenti e sistemi di schermatura.

In particolare dal sito del software è stato possibile scaricare file un format pre-impostato in cui andare a definire le caratteristiche di ciascuno scenario.

Dalla compilazione del file sono emersi dei limiti qui sotto elencati

- È possibile l'inserimento di serramenti a battente. Altre tipologie di apertura generano una difficoltà di importazione del file all'interno del software
- Risulta difficilmente gestibile la gestione di layout di finestra particolari in quanto non è possibile suddividere il medesimo serramento in più parti

In ciascun file sono contenute le seguenti informazioni:

- *Informazioni generali*
 - *Nome del progetto*
 - *Codice localizzazione (contiene sia località che trasmittanza chiusura verticale)*
 - *Rotazione rispetto al Nord*
 - *Destinazione d'uso*
- *Scenari*
 - *Numero scenario*
 - *Nome scenario*
 - *Descrizione*
 - *Larghezza facciata*
 - *Altezza facciata*
 - *Profondità locale*
 - *Orientazione*
 - *Numero di persone*
 - *Potenza installata per l'illuminazione*
 - *Tipo di controllo dell'illuminazione*

- *Potenza apparecchiature*
- *Controllo dell'abbagliamento*
- *Tipo di economizzatore HVAC*
- *Ventilazione naturale*
- *Finestre*
 - *Numero scenario di riferimento*
 - *Nome finestra*
 - *Posizione rispetto al muro di sinistra*
 - *Posizione rispetto al pavimento*
 - *Altezza finestra*
 - *Larghezza finestra*
 - *Dimensione imbotte*
 - *Codice vetrazione*
 - *Codice schermatura*
 - *Codice materiale telaio*
 - *Tipo di apertura*
 - *Area apribile (valore che si sovrappone alla percentuale di apertura prevista per tipo di apertura)*
- *Aggetti esterni*
 - *Numero scenario di riferimento*
 - *Nome dell'aggetto*
 - *Altezza aggetto*
 - *Profondità aggetto*
 - *Larghezza aggetto*
 - *Offset aggetto*
 - *Posizione rispetto al muro di sinistra*
 - *Posizione rispetto al pavimento*

Proprio a causa della struttura del foglio CSV, sono stati definiti quattro livelli di importanza dei parametri, al fine di gestire al meglio tutte le configurazioni. In particolare il livello 0 determina localizzazione e trasmittanza delle chiusure verticali, il livello 1 corrisponde a parametri che vanno a modificare le caratteristiche degli scenari, il livello 2 lavora sulle caratteristiche dei serramenti mentre il livello 3 lavora sugli aggetti esterni.

Nella tabella seguente vengono riassunti i quattro livelli e i rispettivi parametri appartenenti:

Tabella 12-2: Riassunto dei livelli e dei parametri dipendenti

Livello 0				
Trasmittanza pareti	1,19	0,31		

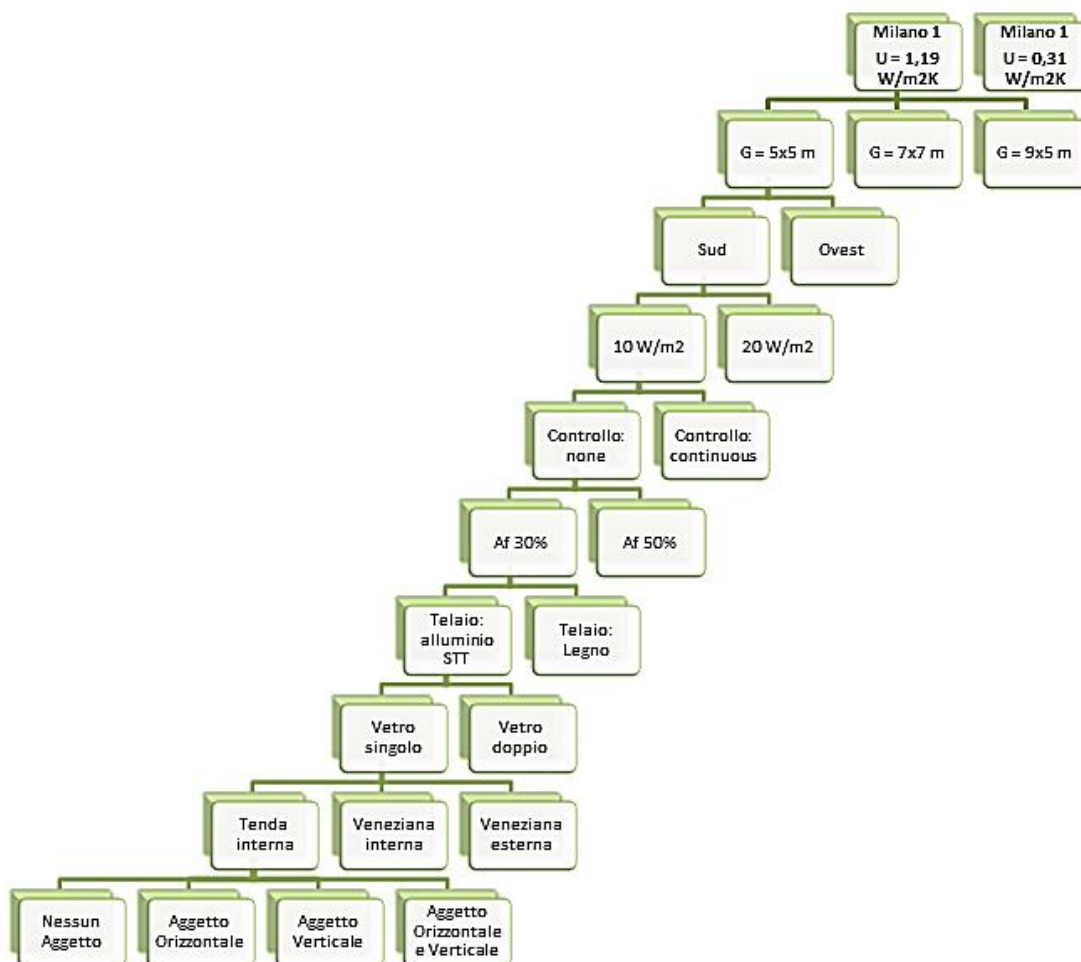
Livello 1				
Geometria	5x5	7x7	9x5	
Esposizione	S	W		
Potenza elettrica installata	10	20		
Controllo dell'illuminazione	None	Continuous		

Livello 2				
Percentuale area finestrata	30%	50%		
Materiale telaio	Alluminio senza TT	Legno		
Tipologia vetratura	Vetro singolo	Doppio vetro		
Tipologia schermatura	Tenda interna	Veneziana interna	Veneziana esterna	

Livello 3				
Tipologia oggetto	Nessuno	Orizzontale	Verticale	O + V

12.2.1 Livelli

Grafico 12-2: diagramma ad albero dei livelli delle simulazioni



12.3 Gli aggetti: variazione di radiazione solare incidente

In questa sezione si intende studiare l'andamento della radiazione solare annua incidente sui serramenti in dipendenza della tipologia di aggetto selezionata. In particolare si confrontano scenari aventi stesse caratteristiche geometriche ma diversa tipologia di aggetto per le due diverse esposizioni.

Il locale scelto per il confronto è quello avente dimensioni 5x5 metri, con percentuale di area finestrata pari al 30%. Si riporta la variazione di radiazione incidente dovuta agli aggetti sui tre serramenti previsti per questo locale.

Grafico 12-3: variazione della radiazione solare per tipologia di aggetto, Fin 1, Sud

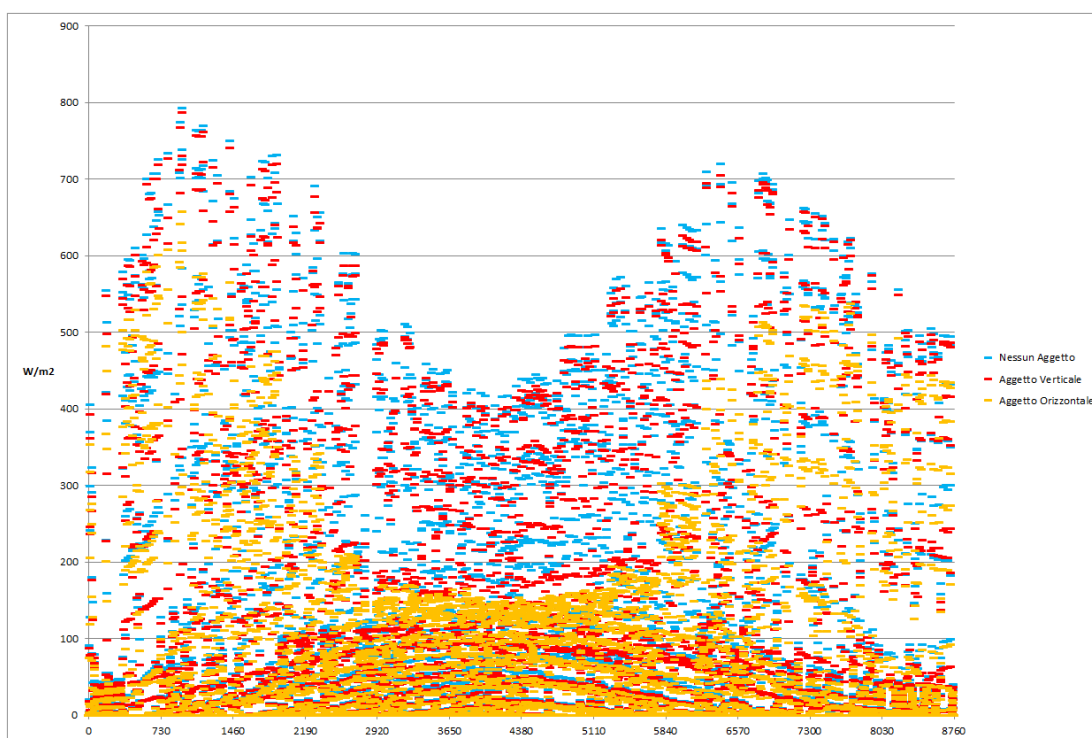


Grafico 12-4: variazione della radiazione solare per tipologia di aggetto, Fin 2, Sud

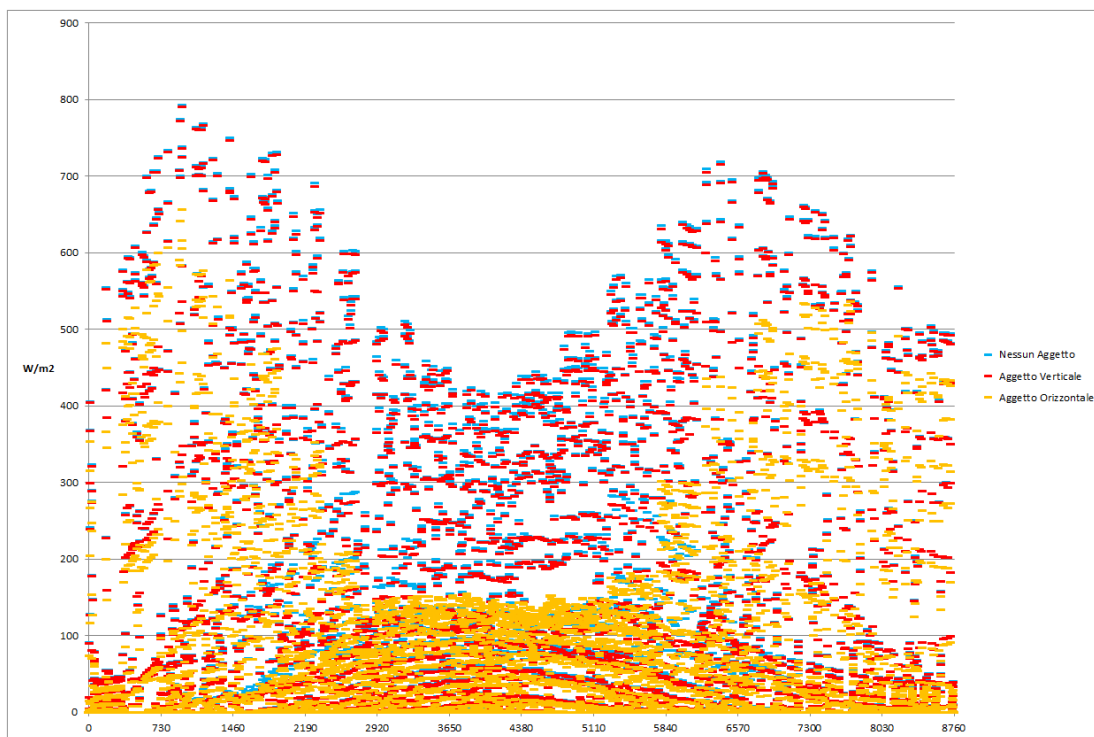


Grafico 12-5: variazione della radiazione solare per tipologia di aggetto, Fin 3, Sud

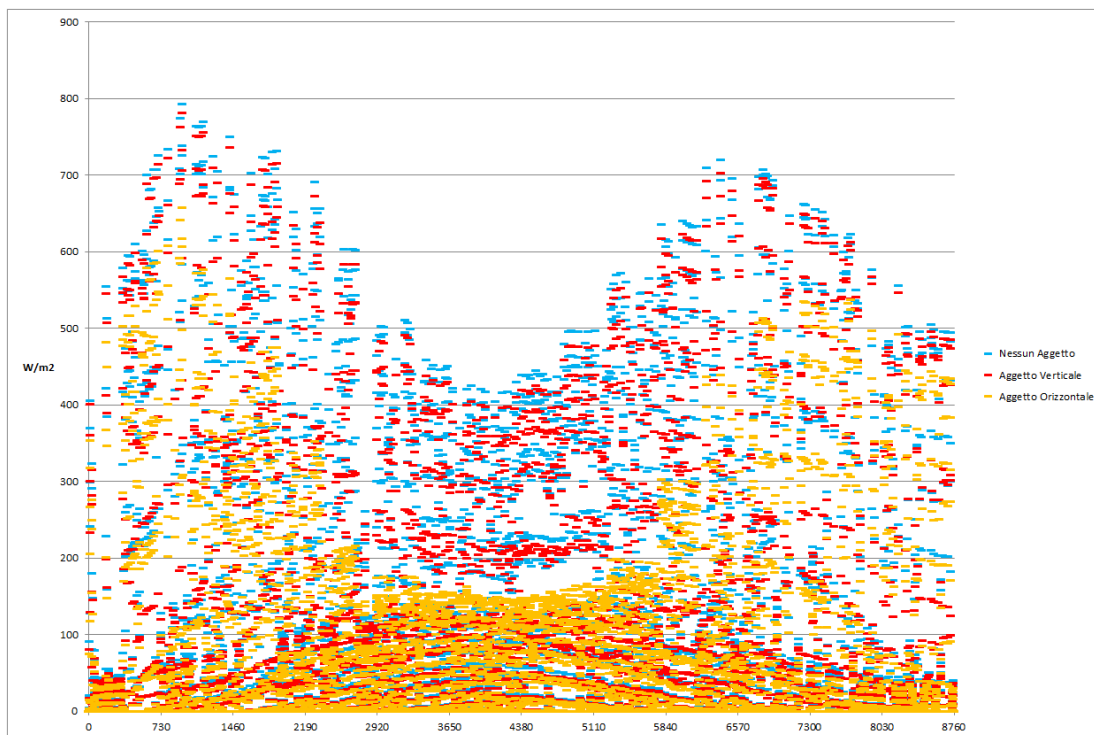


Grafico 12-6: variazione della radiazione solare per tipologia di aggetto, Fin1, Ovest

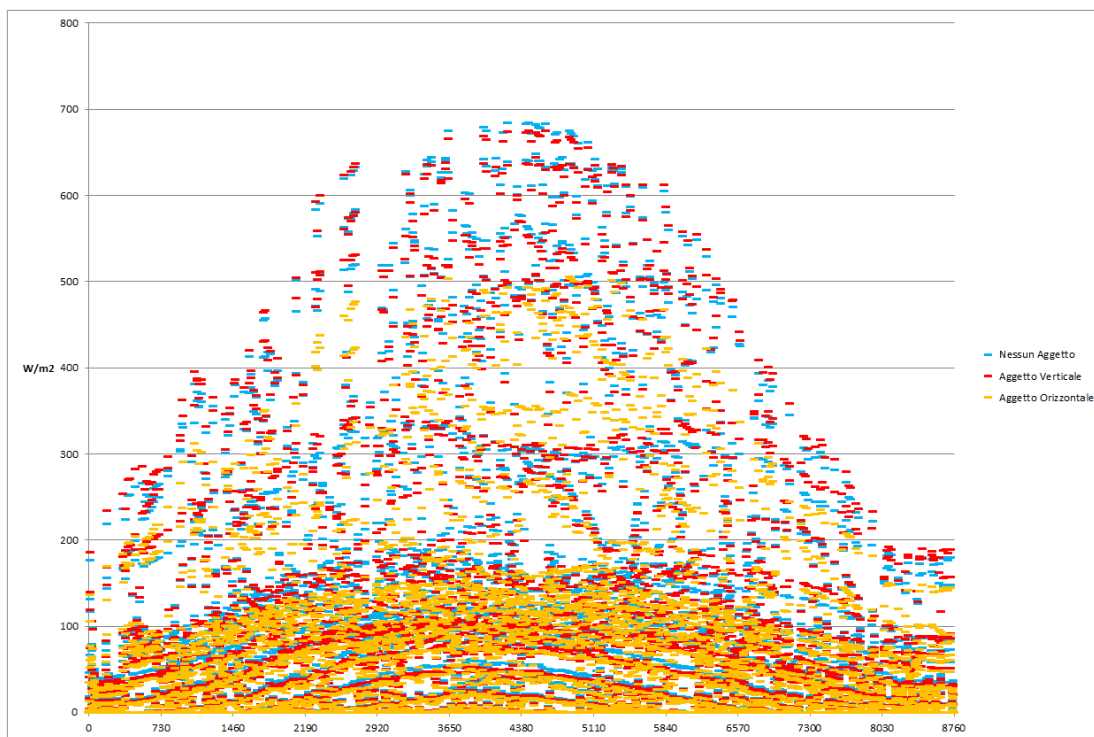


Grafico 12-7: variazione della radiazione solare per tipologia di aggetto, Fin 2, Ovest

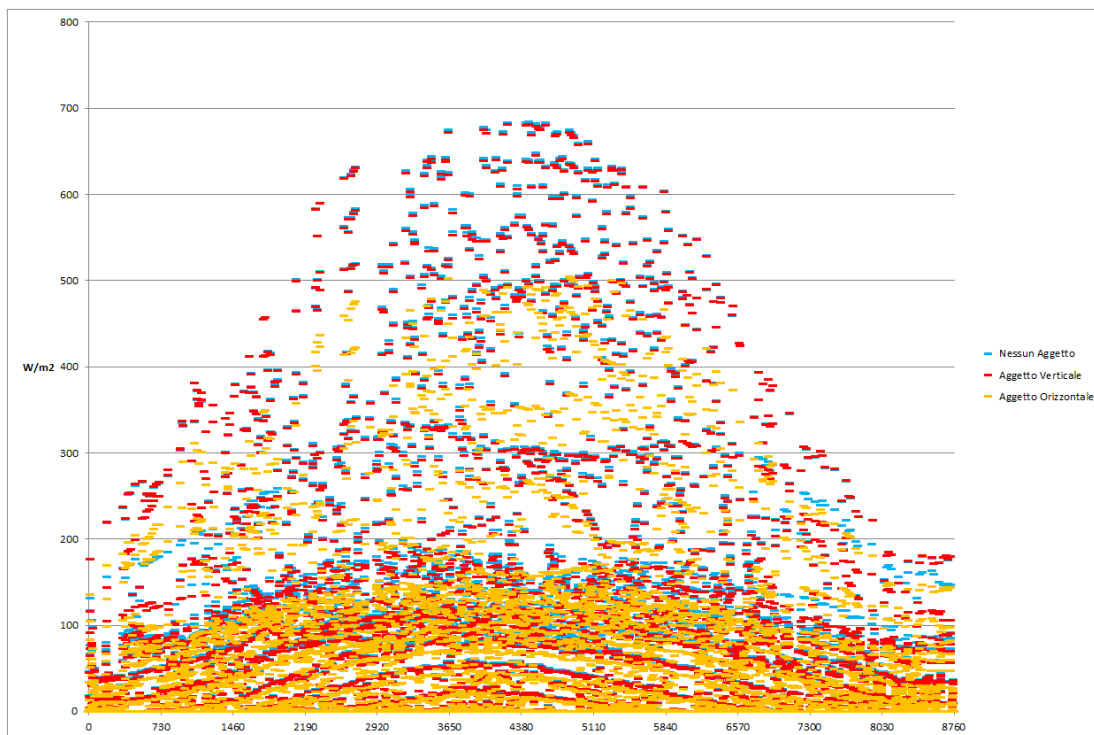
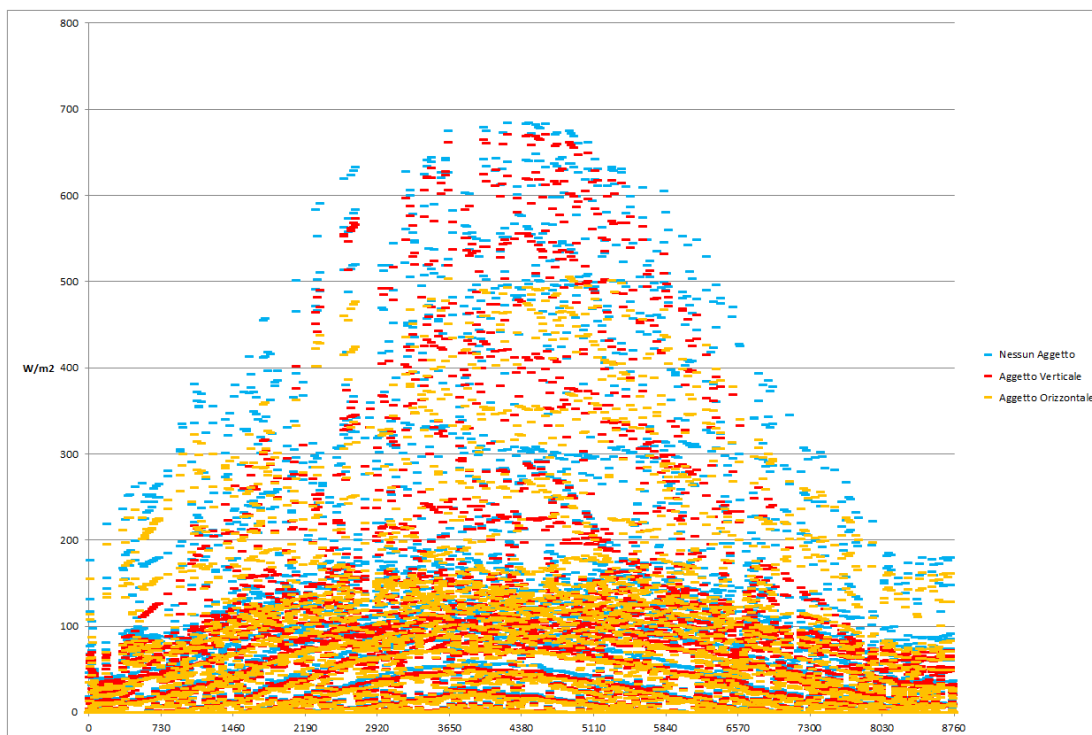


Grafico 12-8: variazione della radiazione solare per tipologia di aggetto, Fin 3, Ovest



Dall'analisi dei risultati si può osservare come l'aggetto orizzontale in generale comporti una riduzione di radiazione solare molto più significativa rispetto a quello verticale. In particolare questa riduzione rimane costante per tutti i serramenti presenti nello scenario.

L'aggetto verticale invece comporta una riduzione molto meno significativa e in particolare il suo effetto praticamente si annulla nei serramenti più lontani. Nel Grafico 12-4 e nel Grafico 12-7 infatti si può osservare che nella finestra centrale la presenza dell'aggetto comporta variazioni quasi nulle della radiazione.

Risultati analoghi, in termini di variazioni, si ottengono per le due esposizioni.

Dai grafici sopra riportati si può anche osservare come a Sud la radiazione solare risulti massima nei mesi di Febbraio-Marzo e Ottobre-Novembre mentre ad Ovest nei mesi estivi. Questo comporta per l'esposizione Ovest un peggior comportamento sia dal punto di vista del fabbisogno termico per riscaldare e raffreddare gli edifici, sia dal punto di vista del fabbisogno per illuminare gli ambienti.

12.4 Grafici dell'andamento della temperatura operante interna

Locale 5x5.

Grafico 12-9: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, no AGG

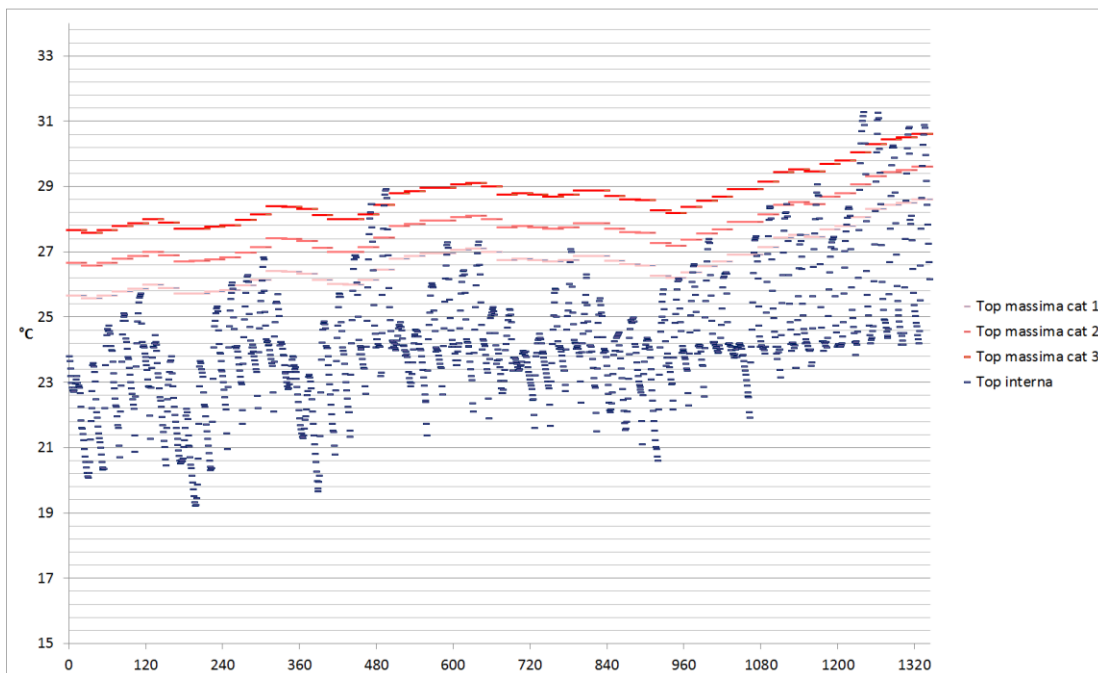
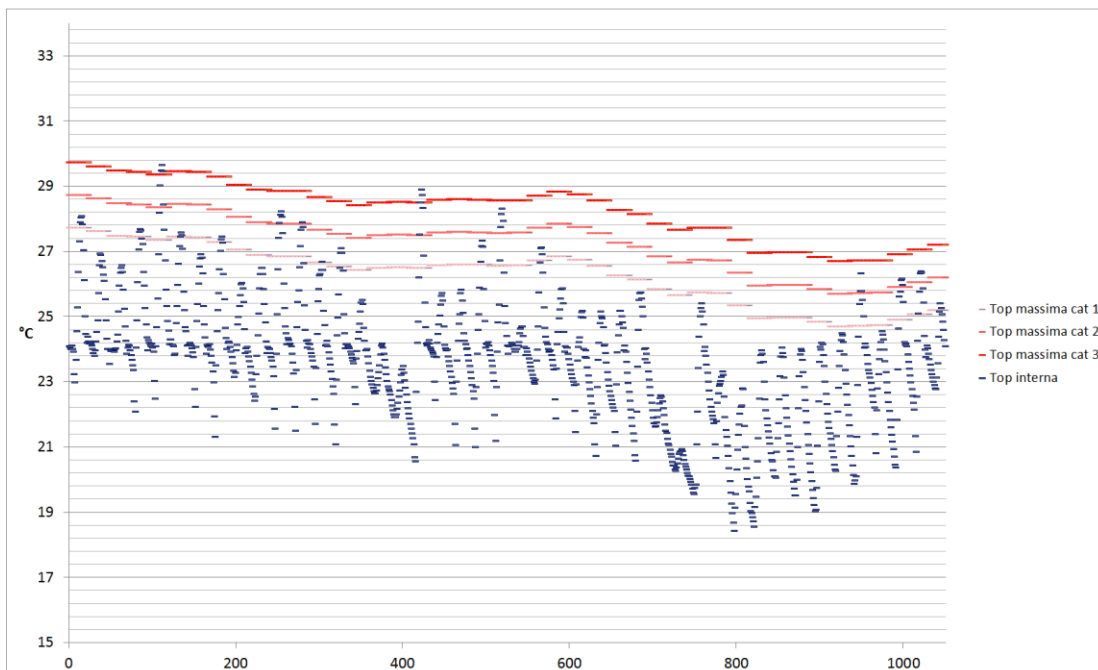


Grafico 12-10: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, no AGG



Aggetto orizzontale.

Grafico 12-11: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O

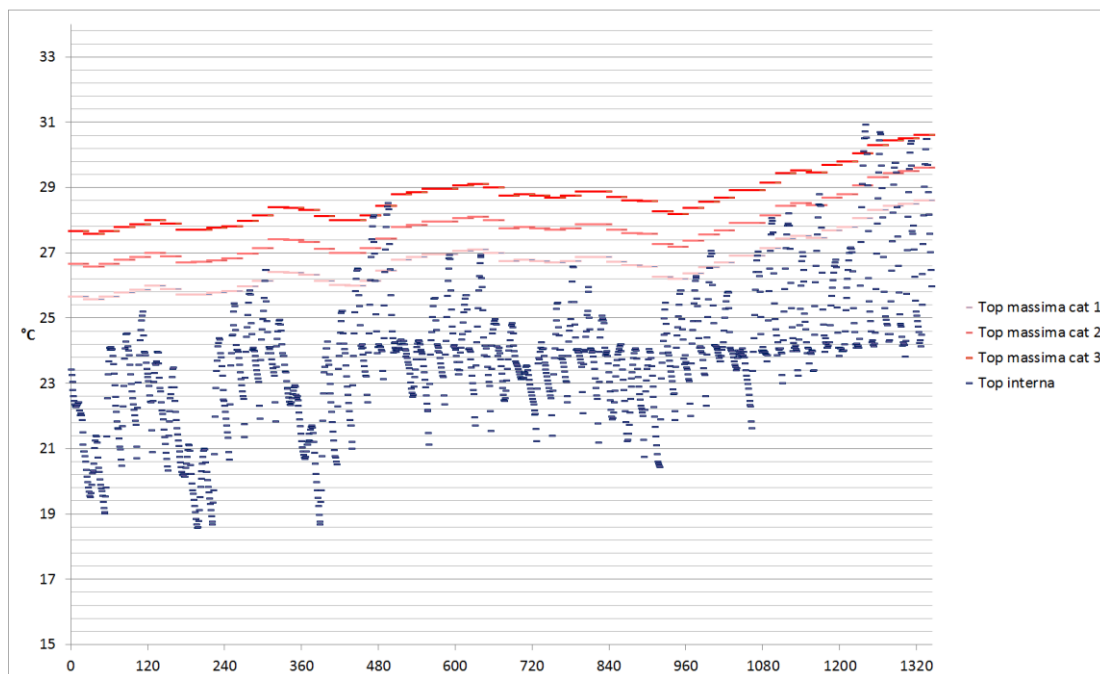
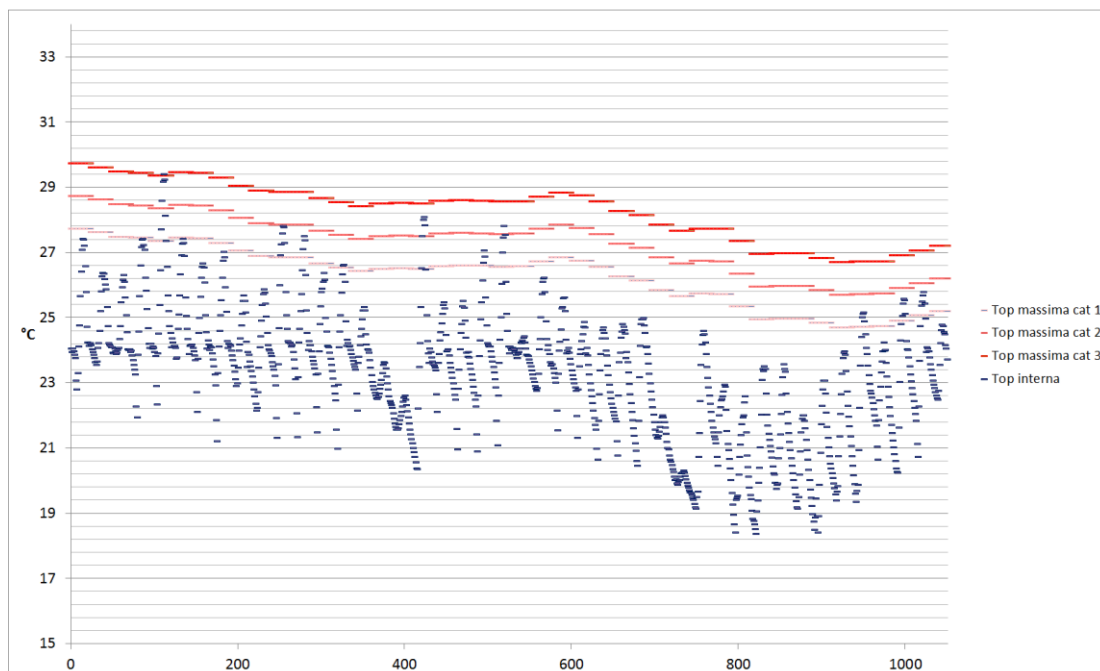


Grafico 12-12: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O



Aggetto verticale.

Grafico 12-13: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG V

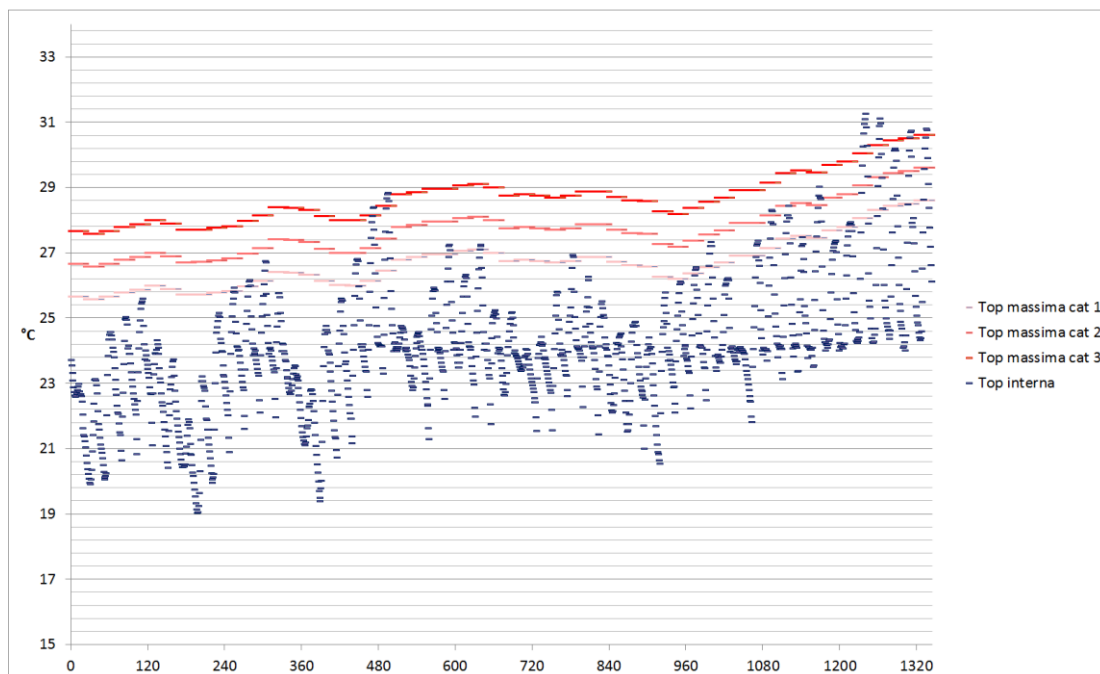
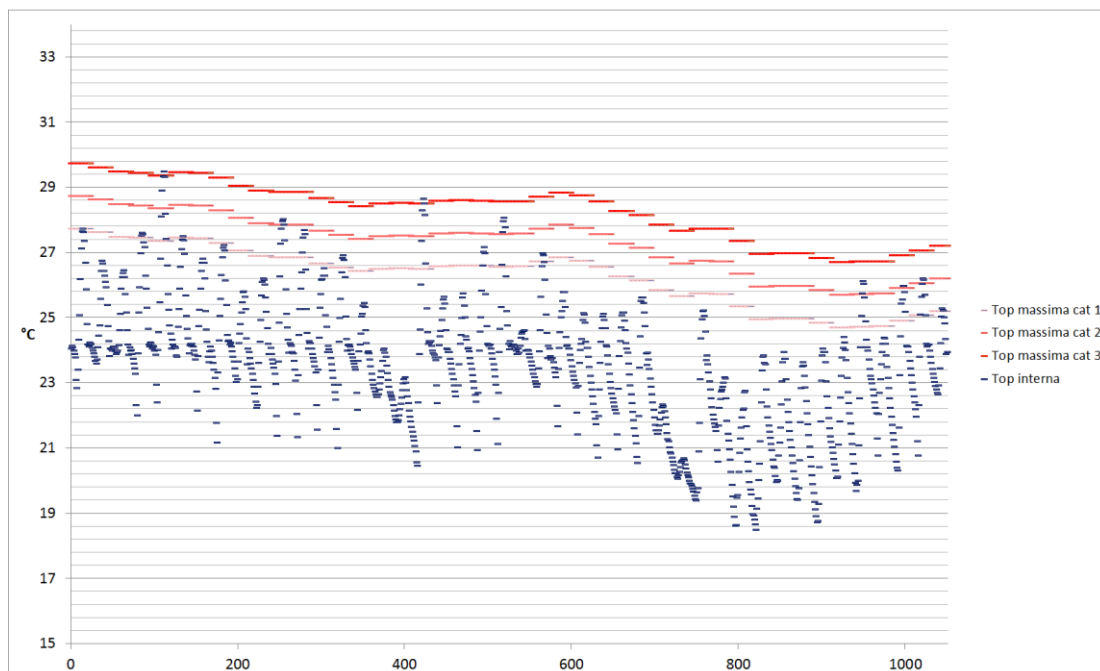


Grafico 12-14: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG V



Combinazione degli aggetti.

Grafico 12-15: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O+V

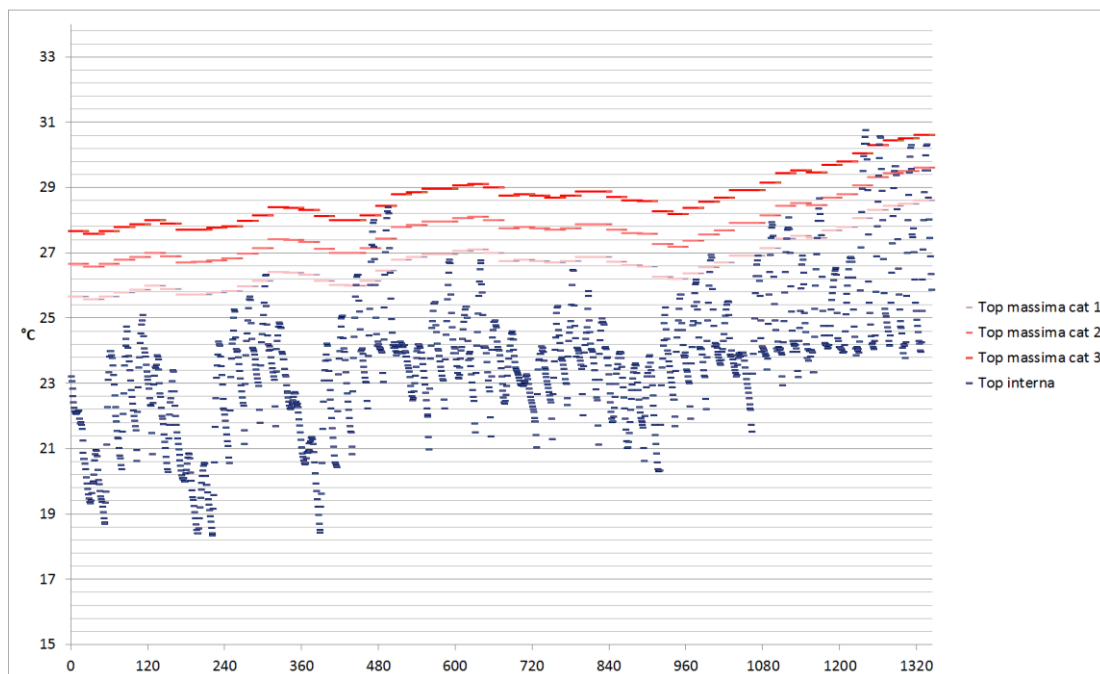
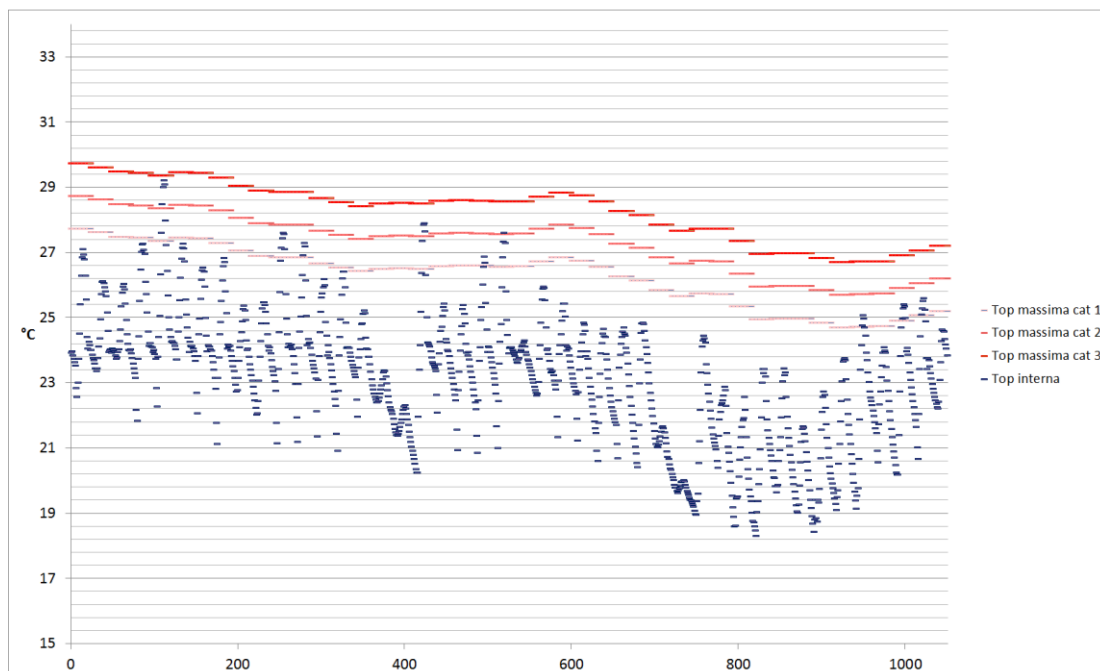


Grafico 12-16: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O+V



Caso base con il 50% di area finestrata

Grafico 12-17: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 50%, NO AGG

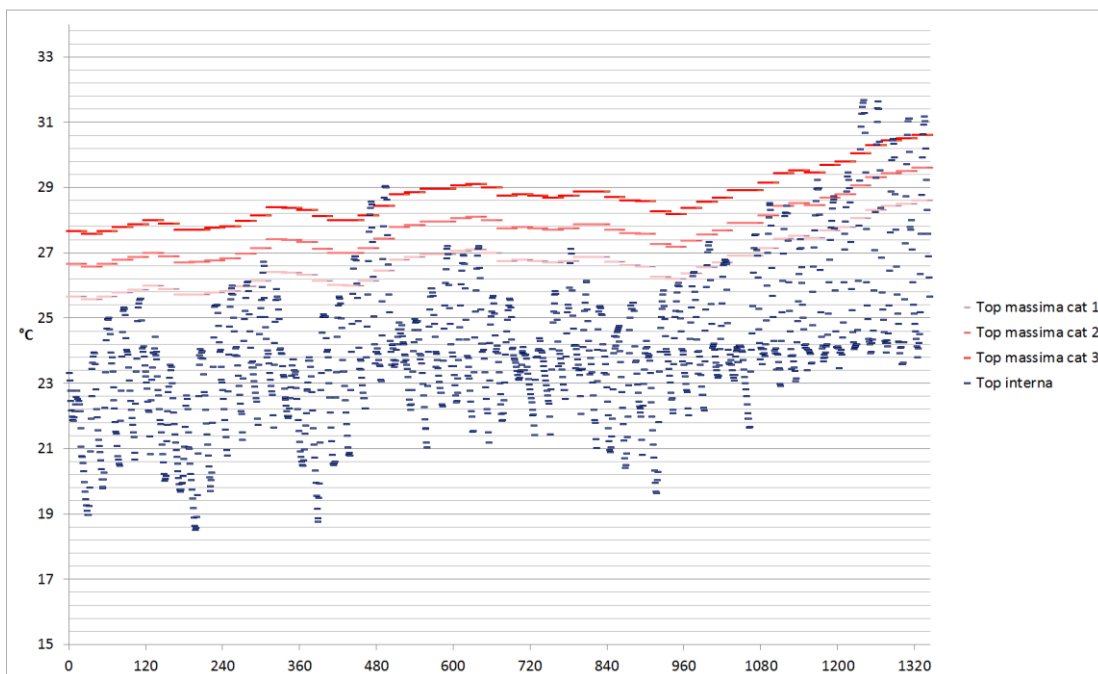
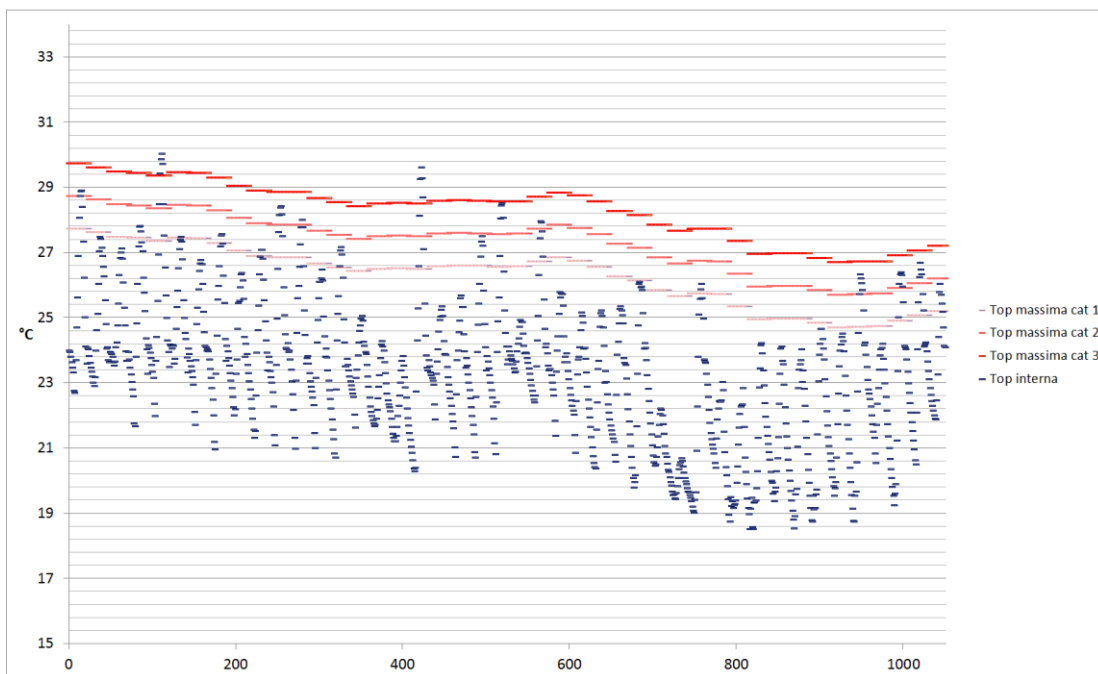


Grafico 12-18: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 50%, NO AGG



Caso base esposto a Ovest

Grafico 12-19: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Ovest 50%, NO AGG

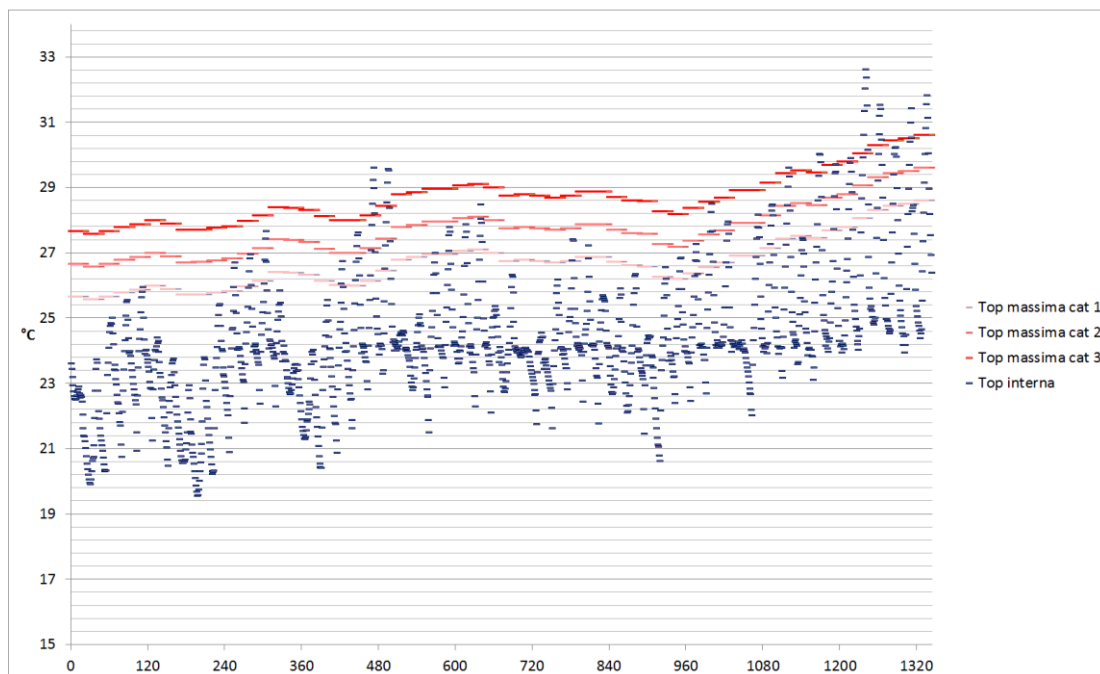
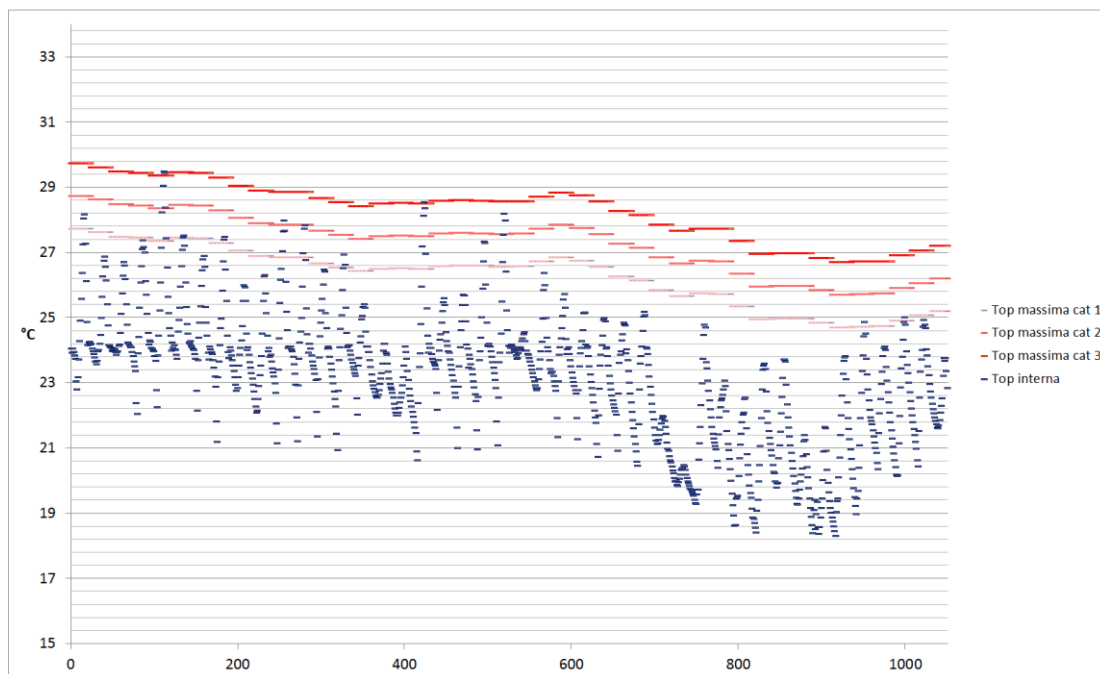


Grafico 12-20: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Ovest 50%, NO AGG



Considerando solo le ore di occupazione

Caso base.

Grafico 12-21: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, no AGG

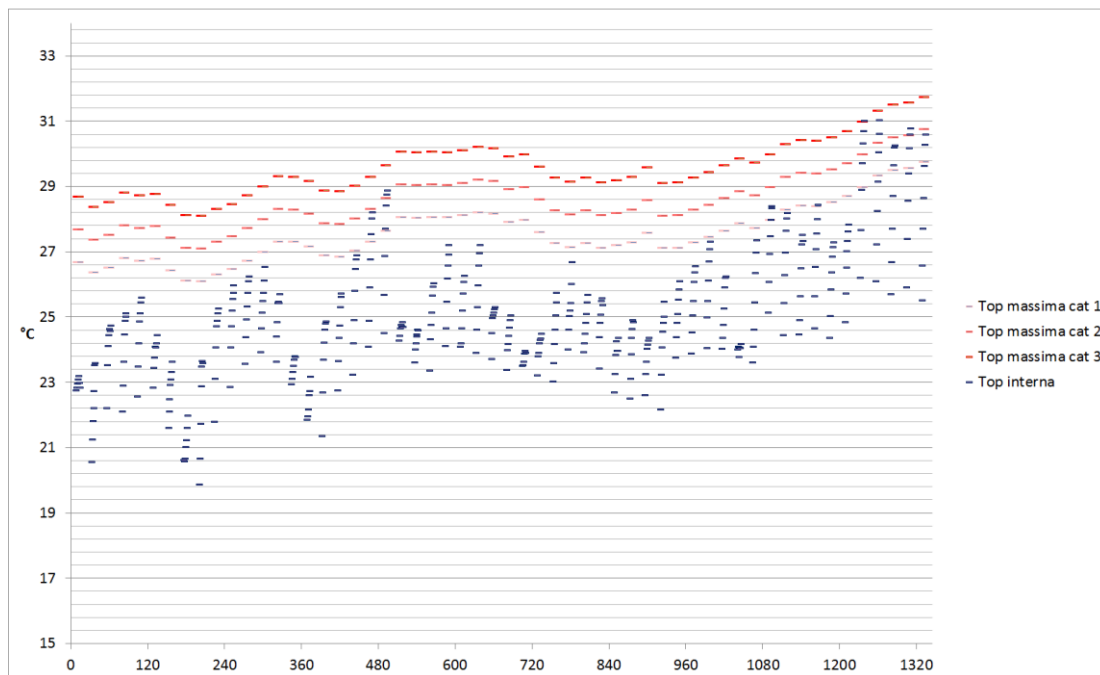
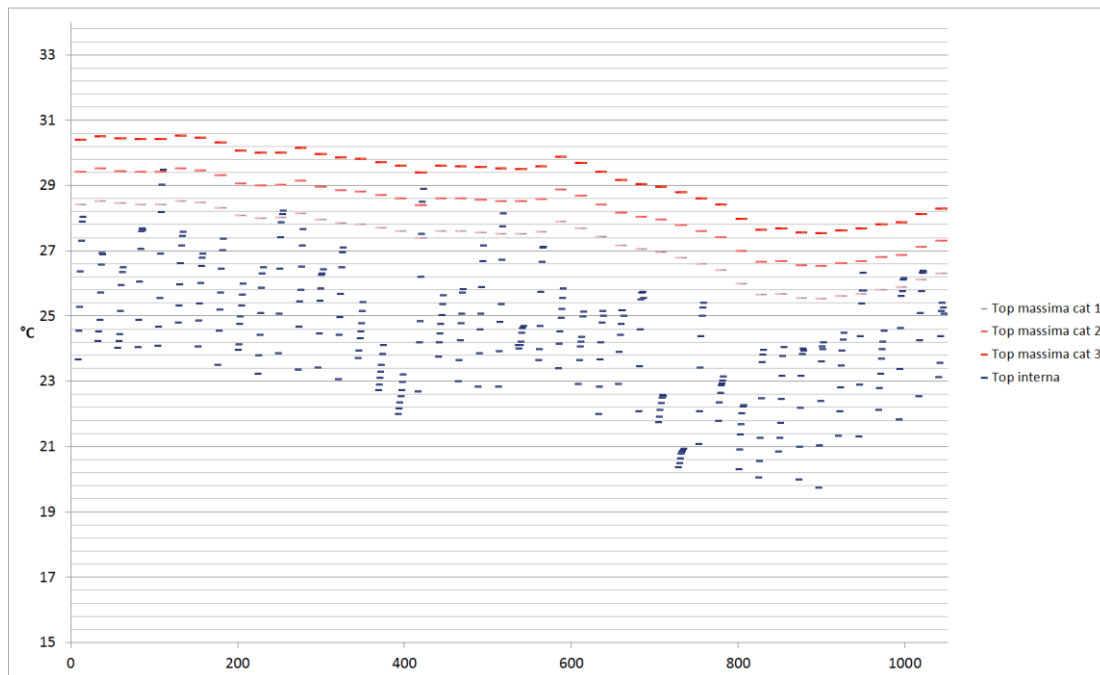


Grafico 12-22: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, no AGG



Aggetto orizzontale.

Grafico 12-23: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O

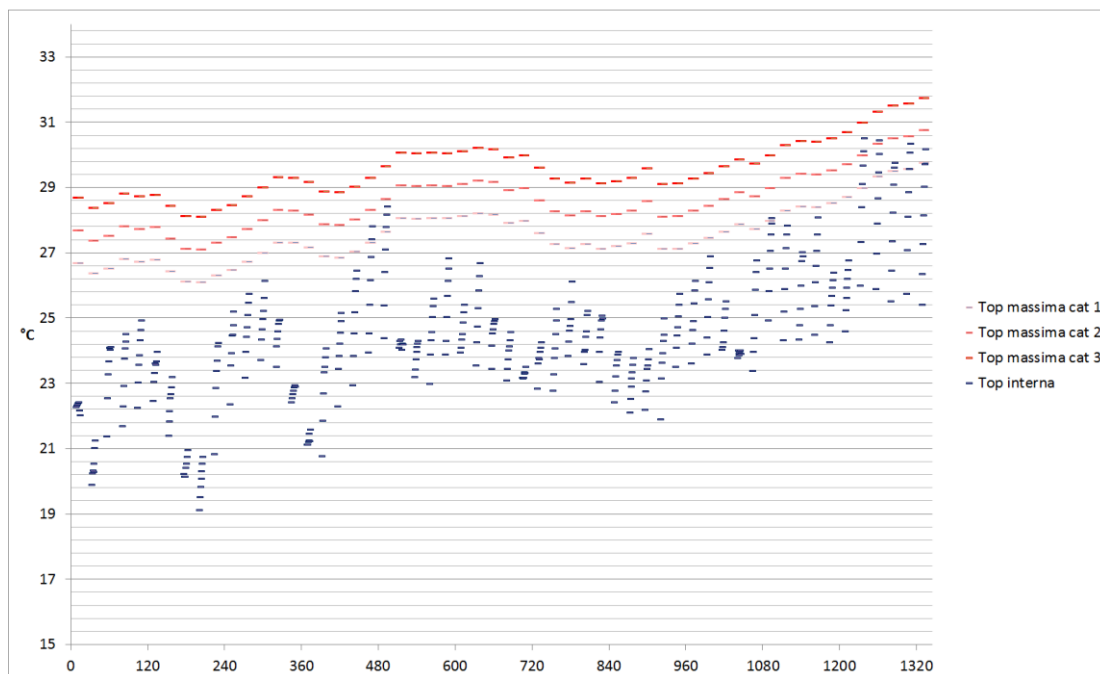
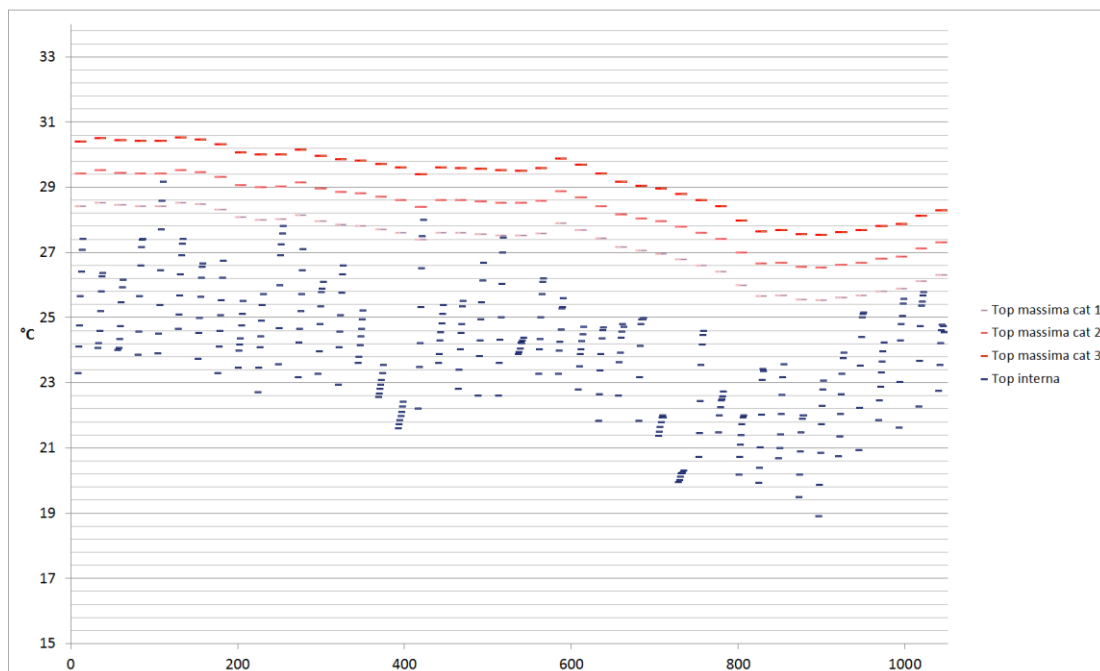


Grafico 12-24: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O



Aggetto verticale.

Grafico 12-25: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG V

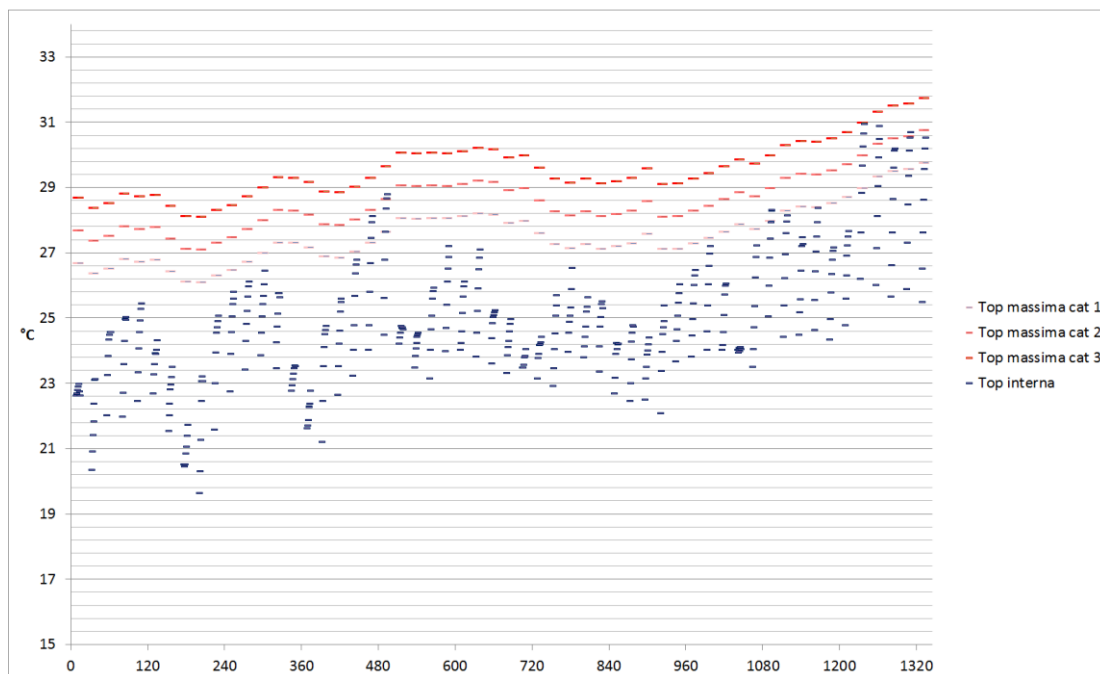
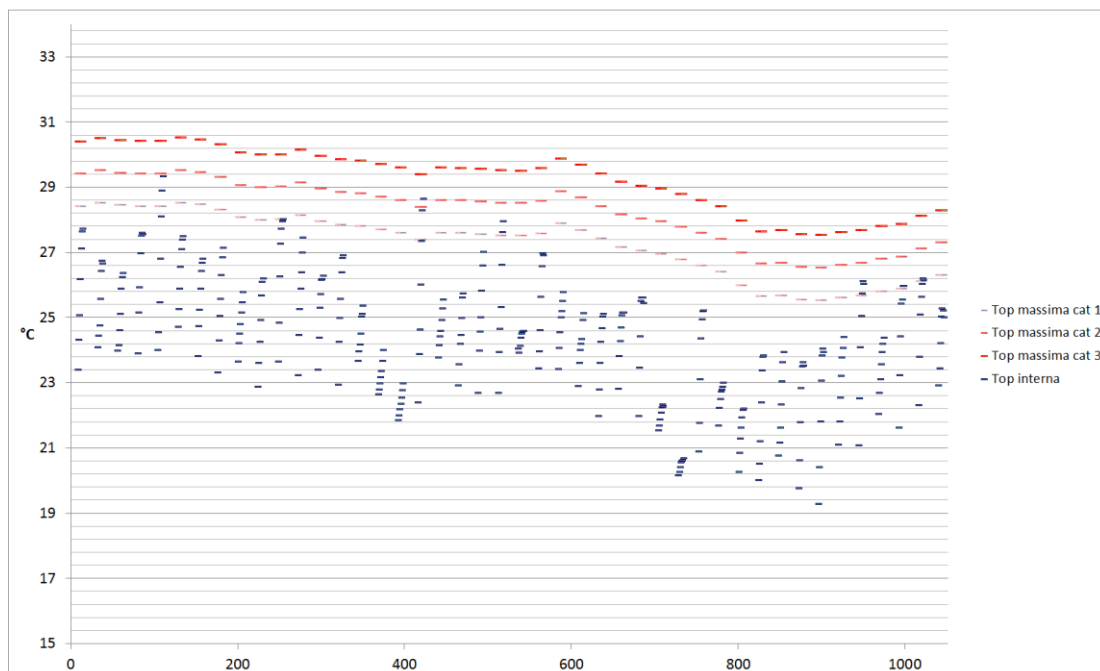


Grafico 12-26: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG V



Combinazione degli aggetti.

Grafico 12-27: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 30%, AGG O+V

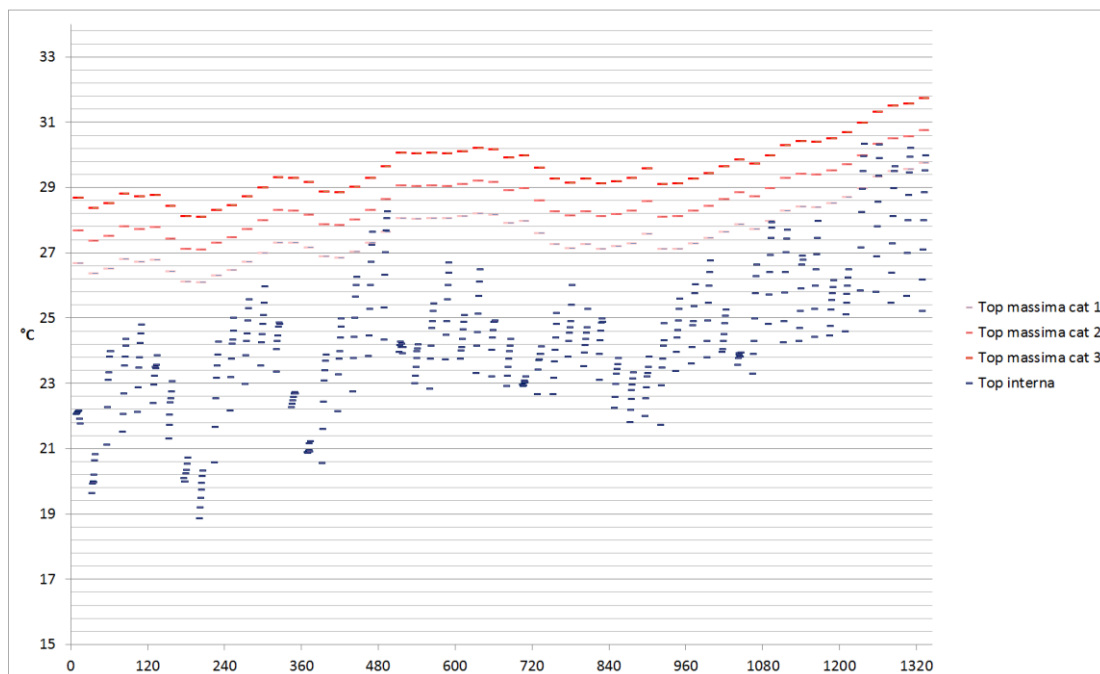
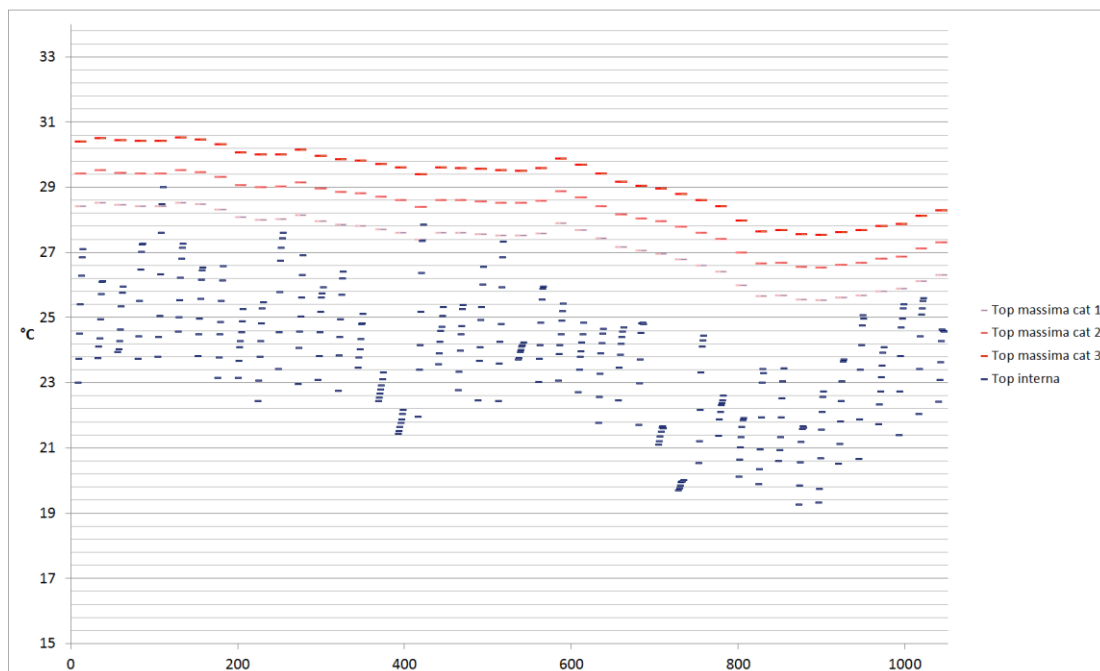


Grafico 12-28: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 30%, AGG O+V



Caso base con il 50% di area finestrata

Grafico 12-29: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Sud 50%, NO AGG

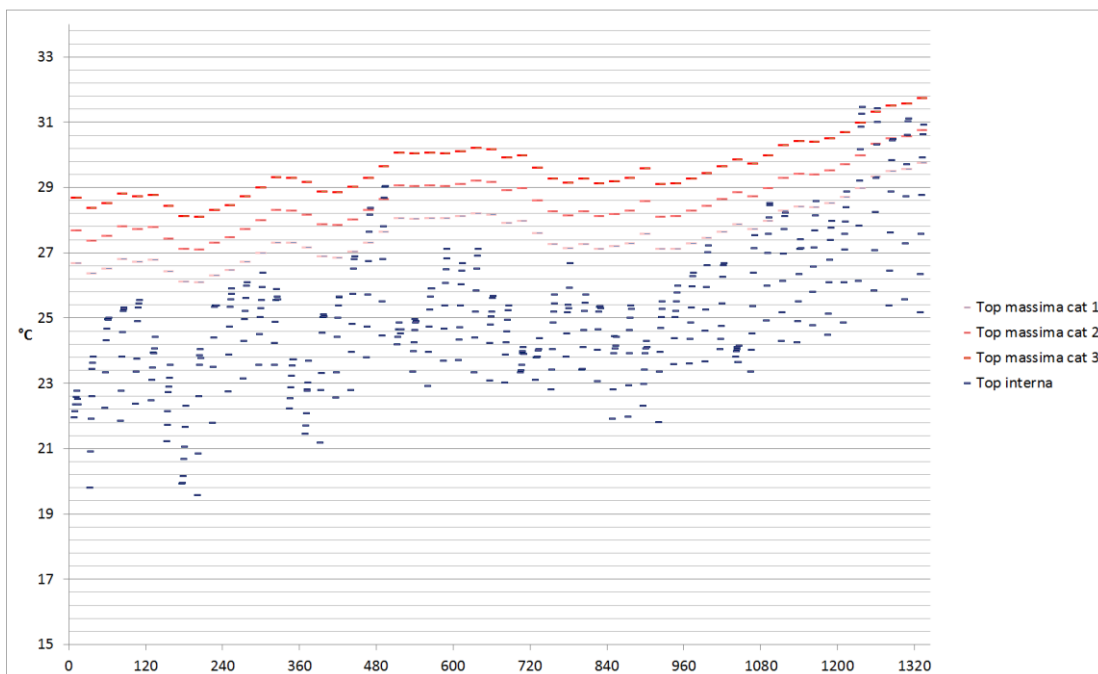
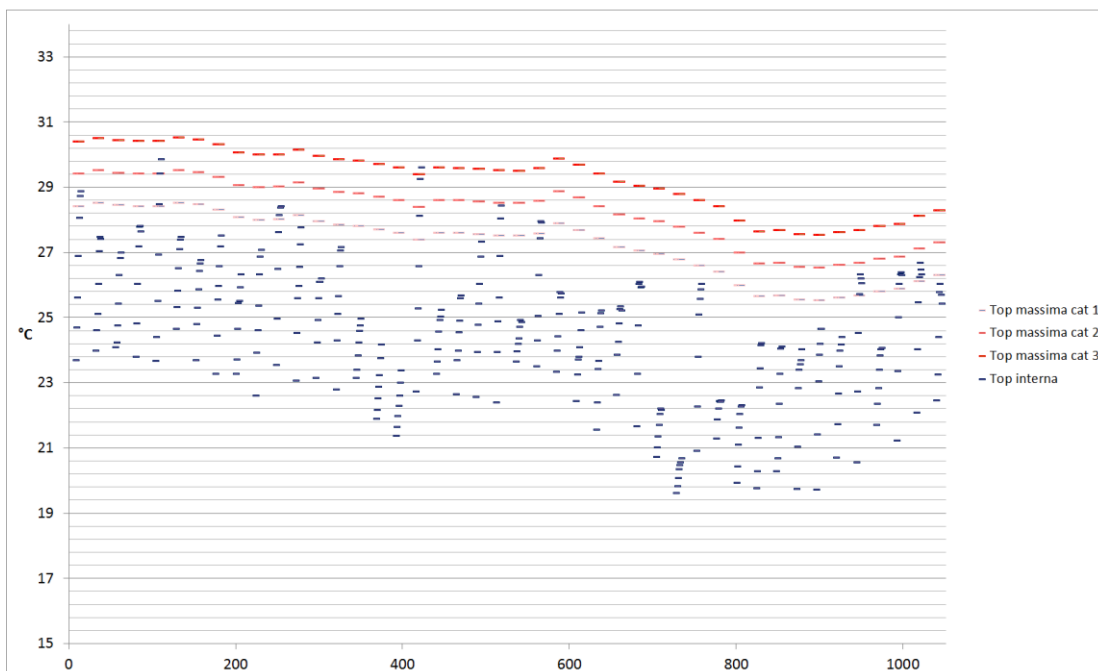


Grafico 12-30: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Sud 50%, NO AGG



Caso base esposto a Ovest

Grafico 12-31: confronto Toperante, Maggio-Giugno, Ovest 50%, NO AGG

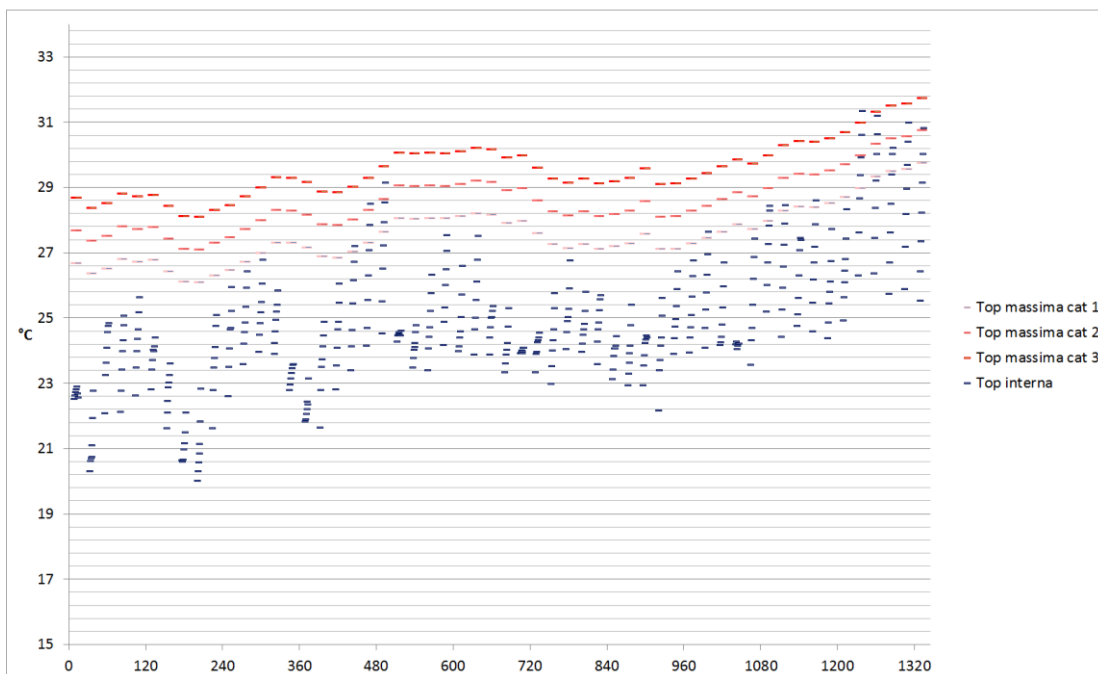
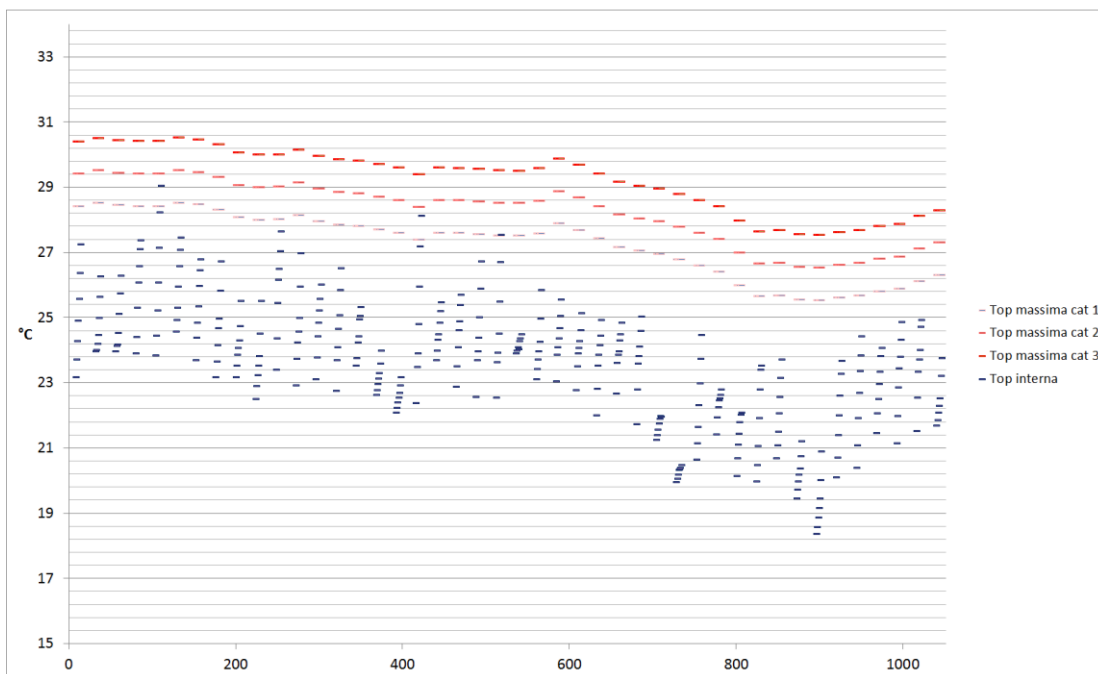


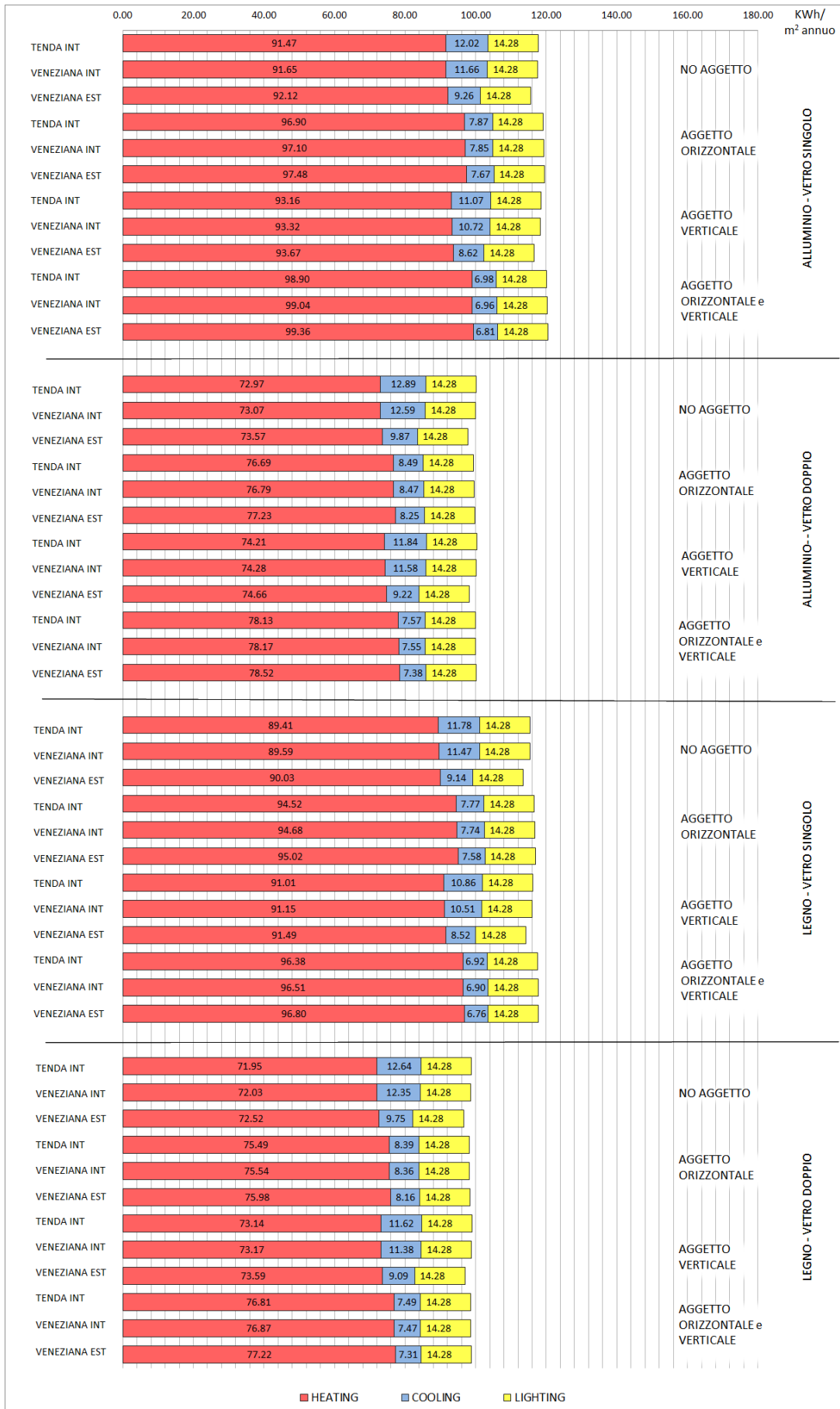
Grafico 12-32: confronto Toperante, Settembre-Ottobre, Ovest 50%, NO AGG



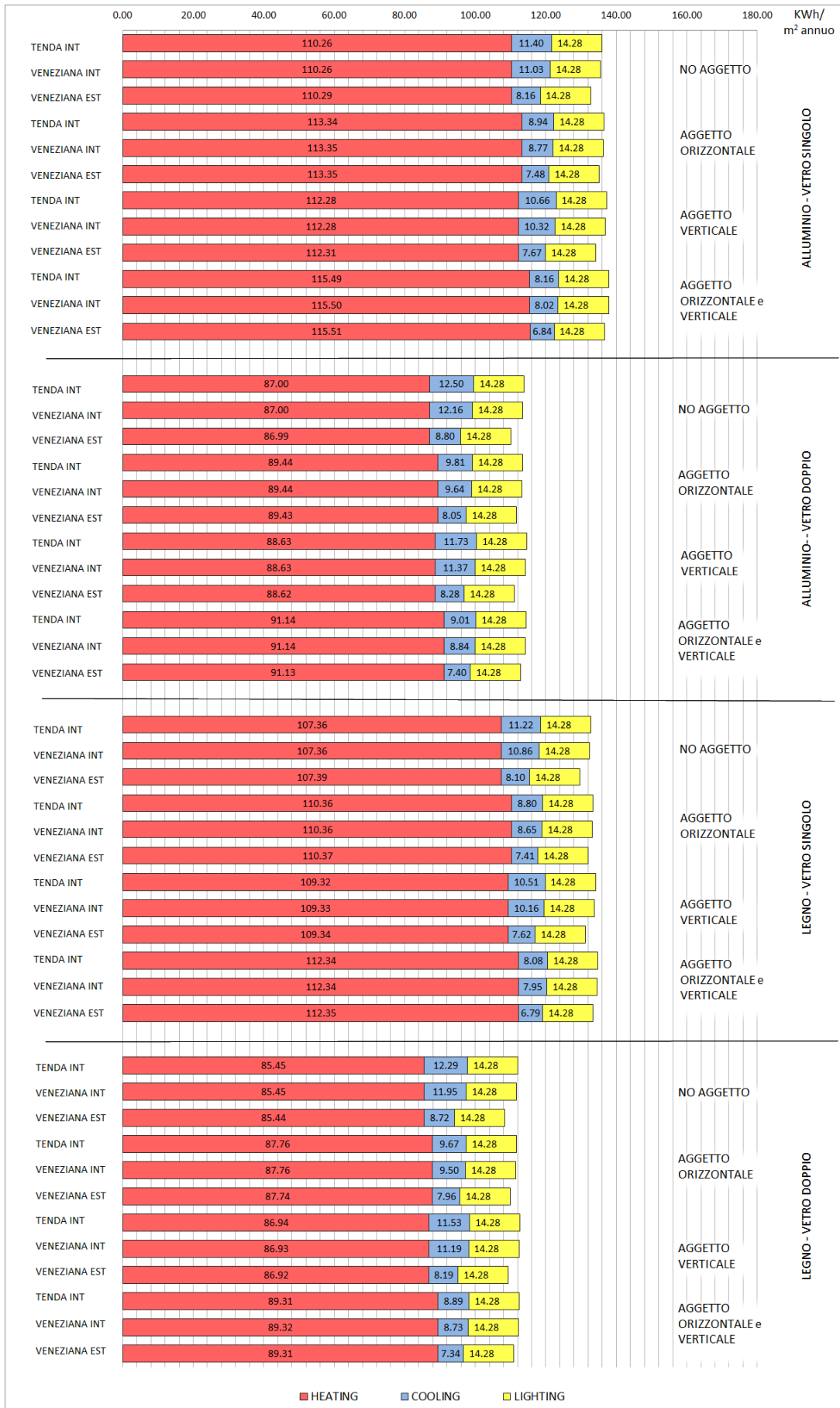
12.5 Risultati delle simulazioni

Di seguito a titolo di esempio si riportano i grafici dei risultati ottenuti sia in termini di fabbisogni che di temperatura operante massima interna per le simulazioni relative al locale 5x5 con trasmittanza della parete esposta pari a $1,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

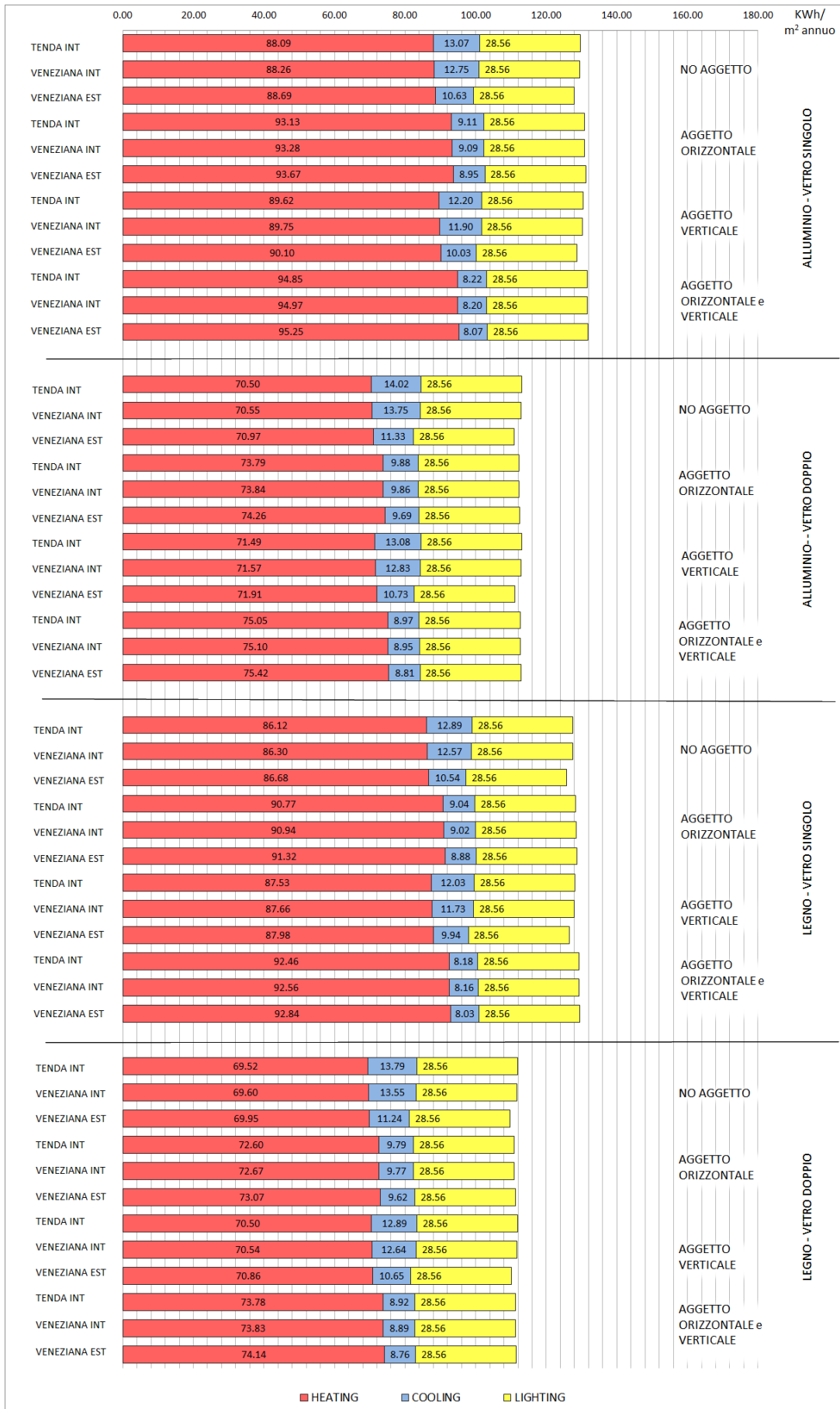
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



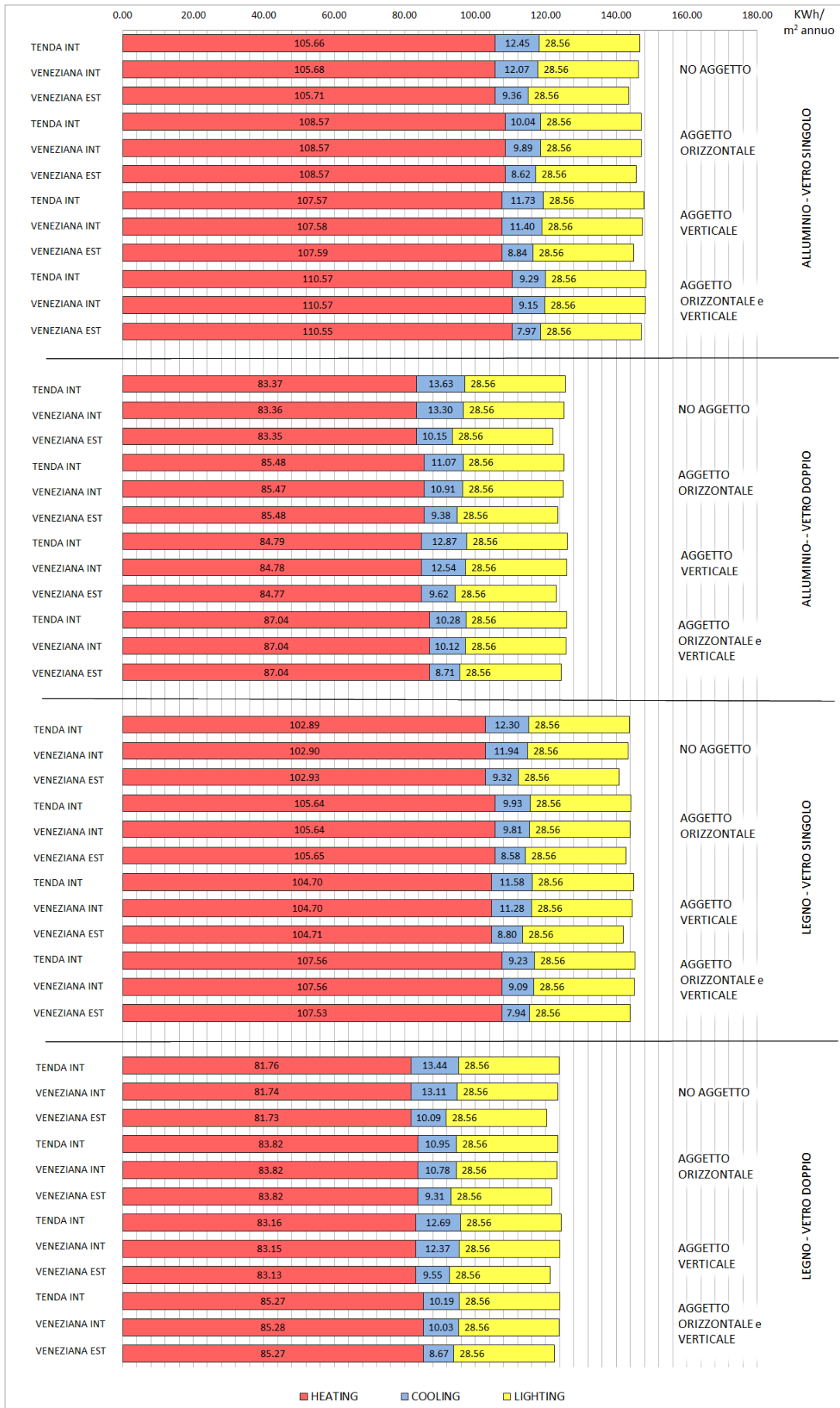
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



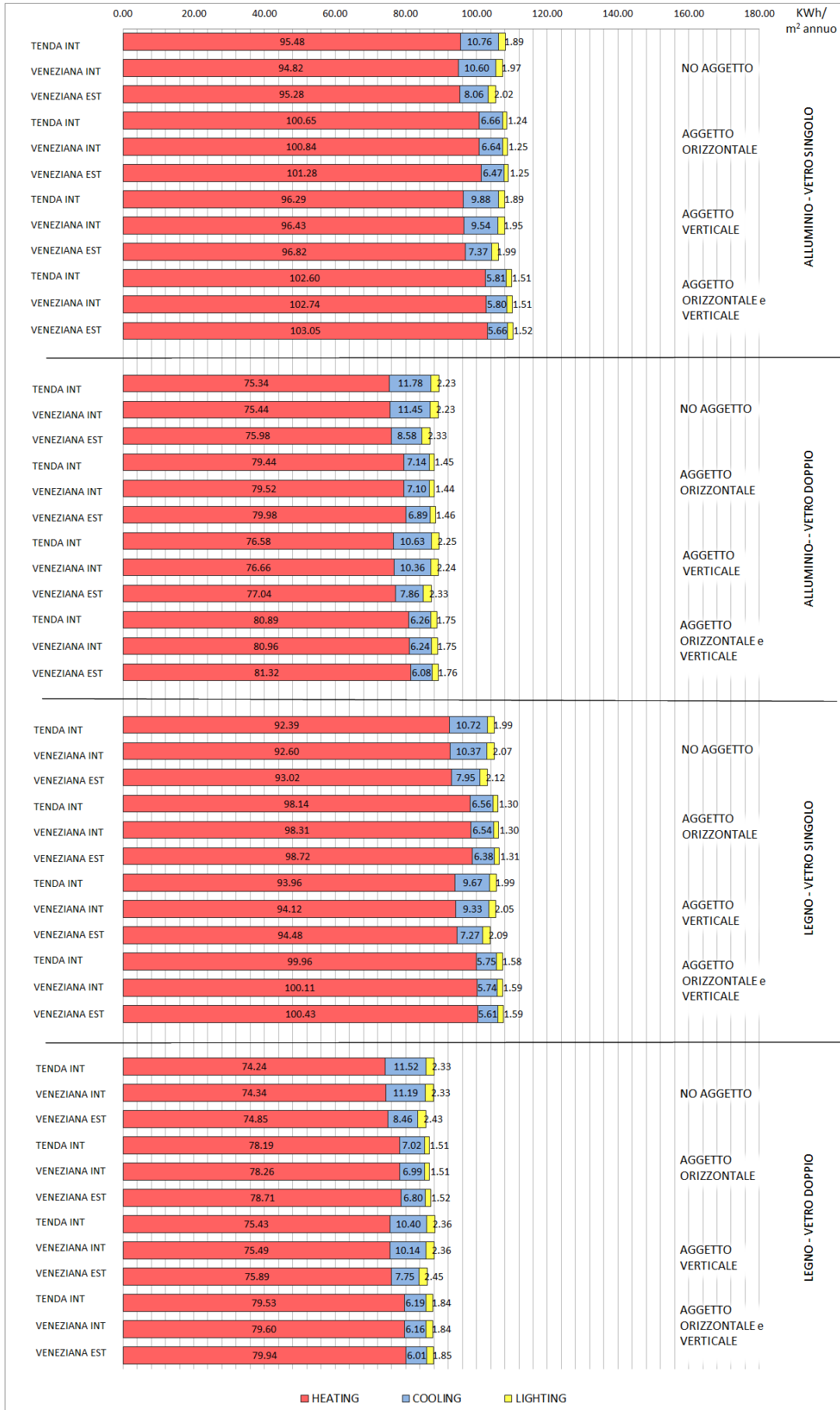
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



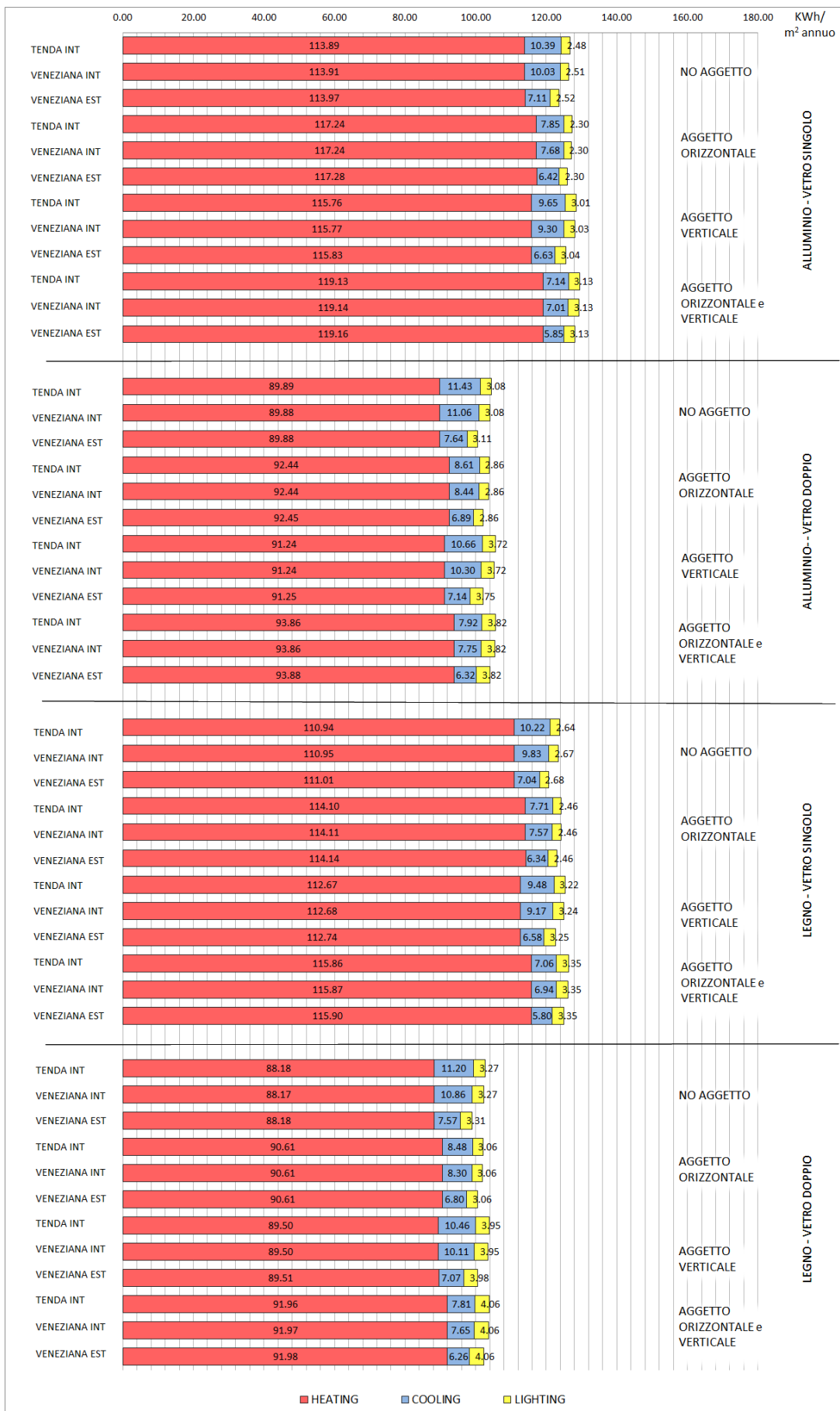
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



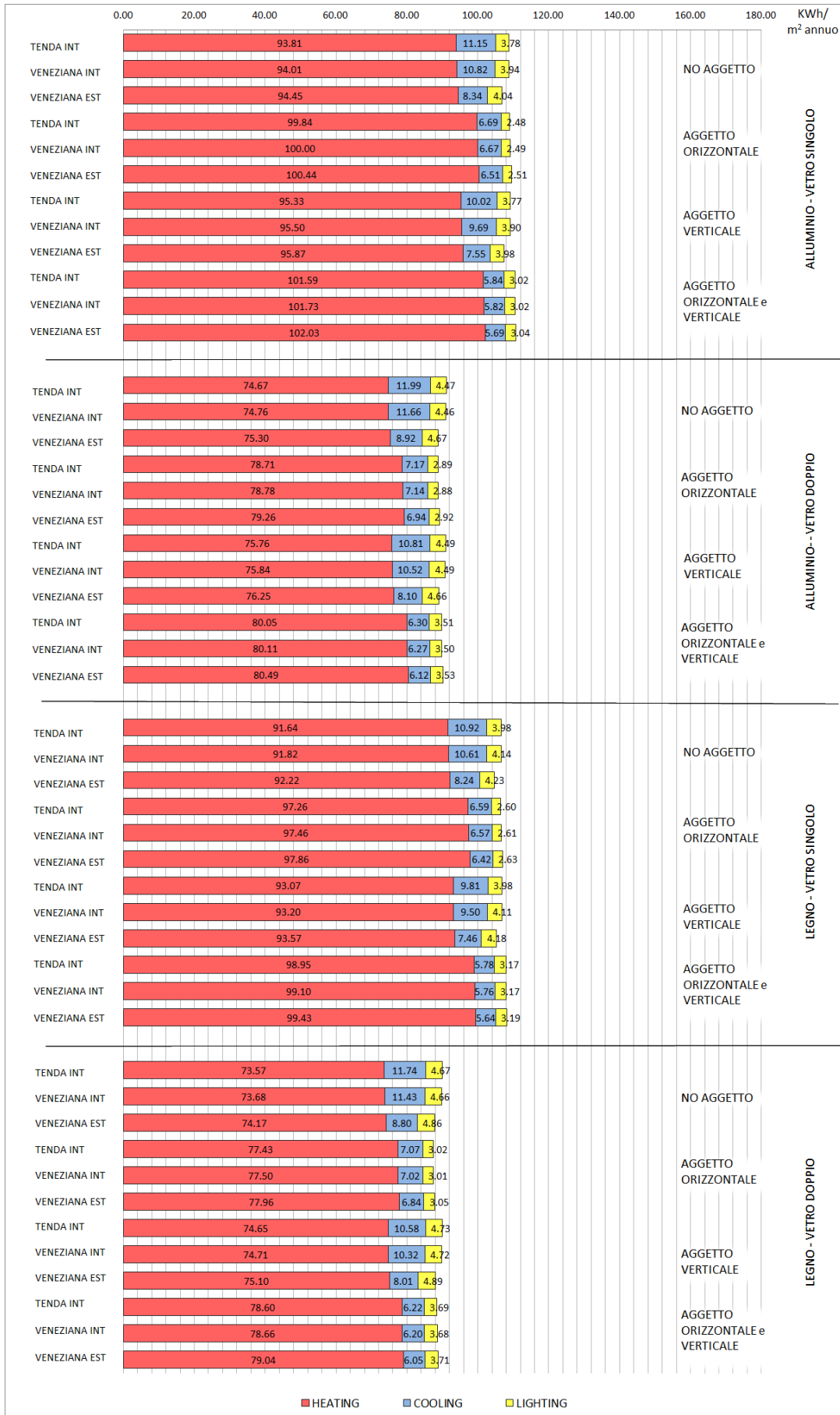
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m²K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



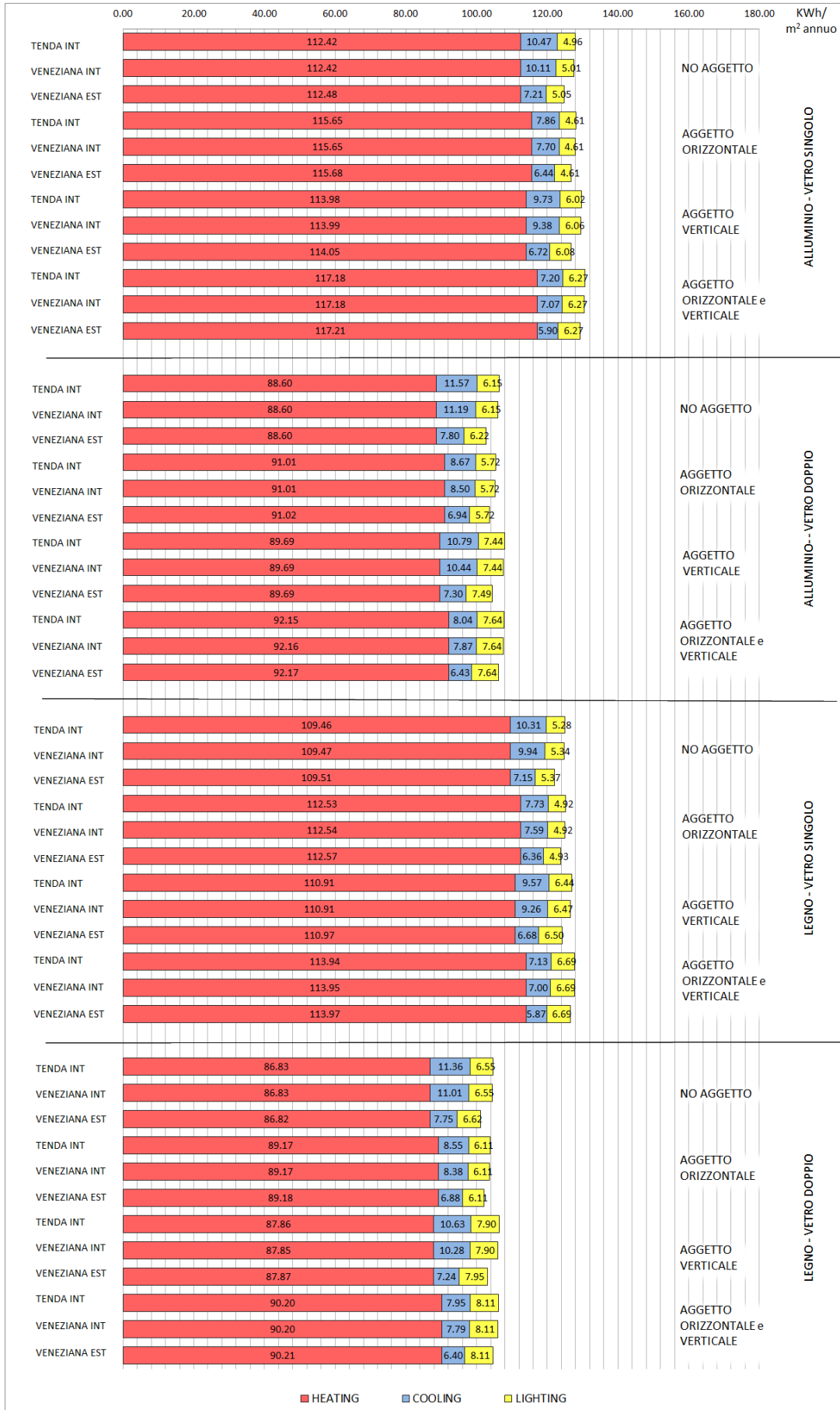
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



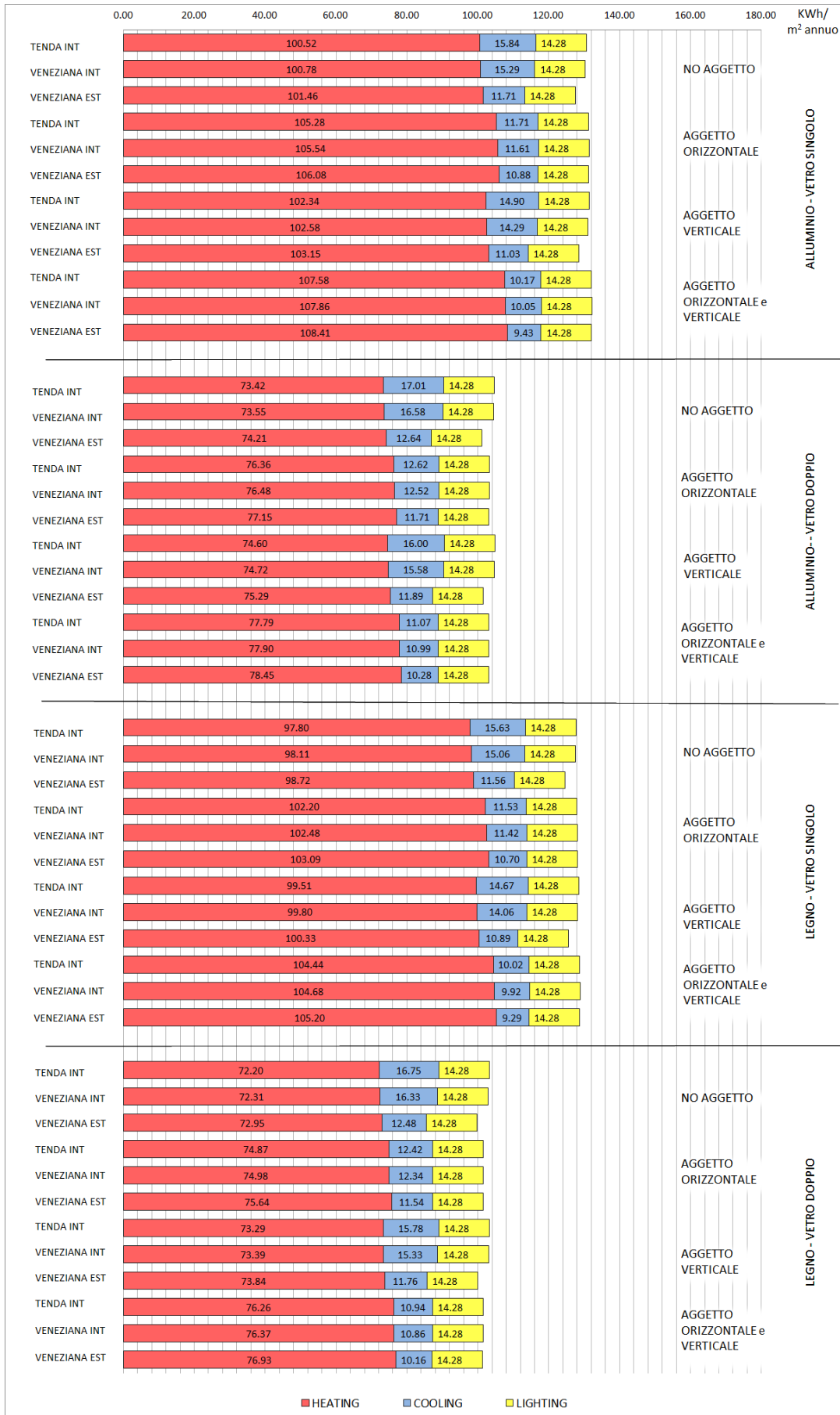
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



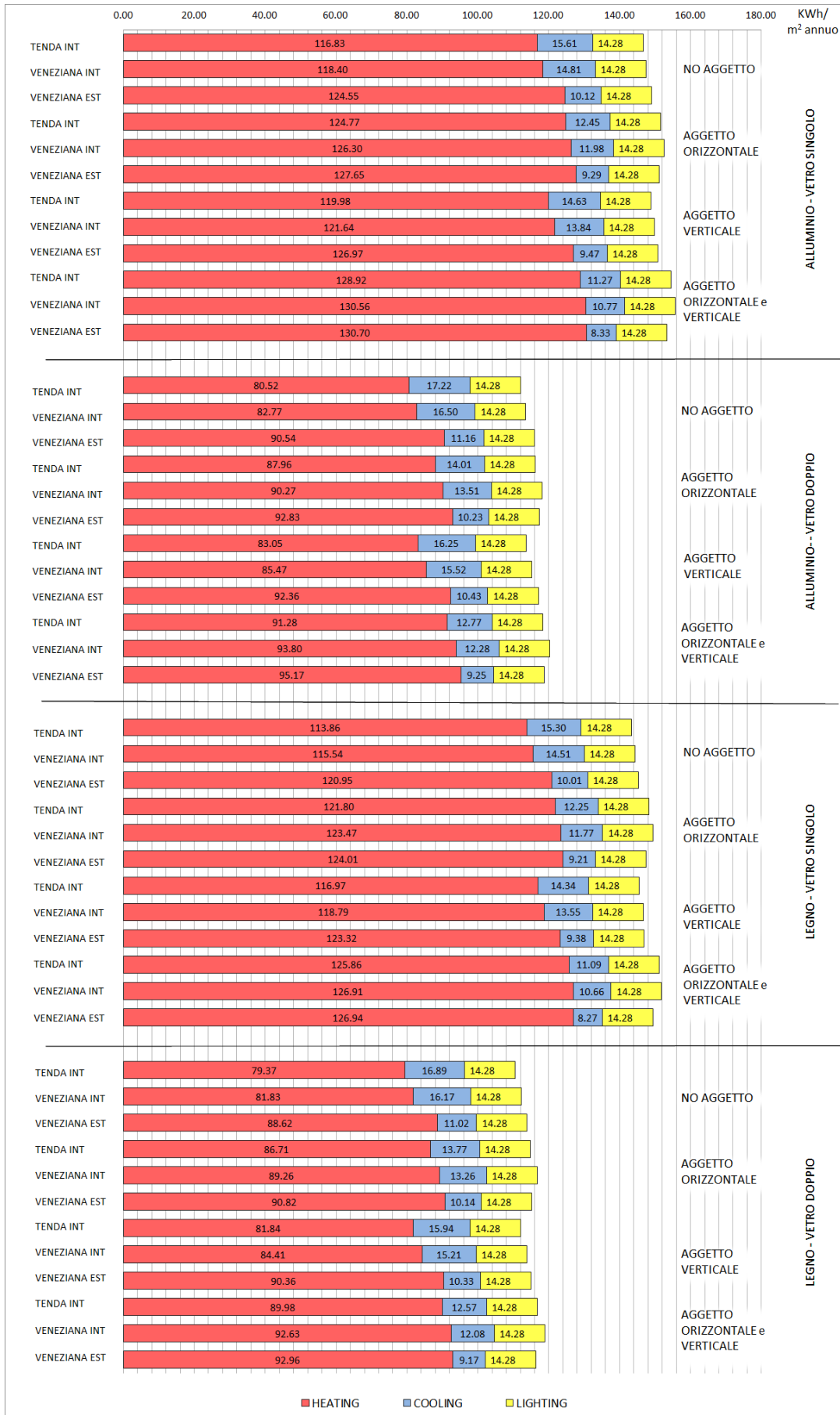
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



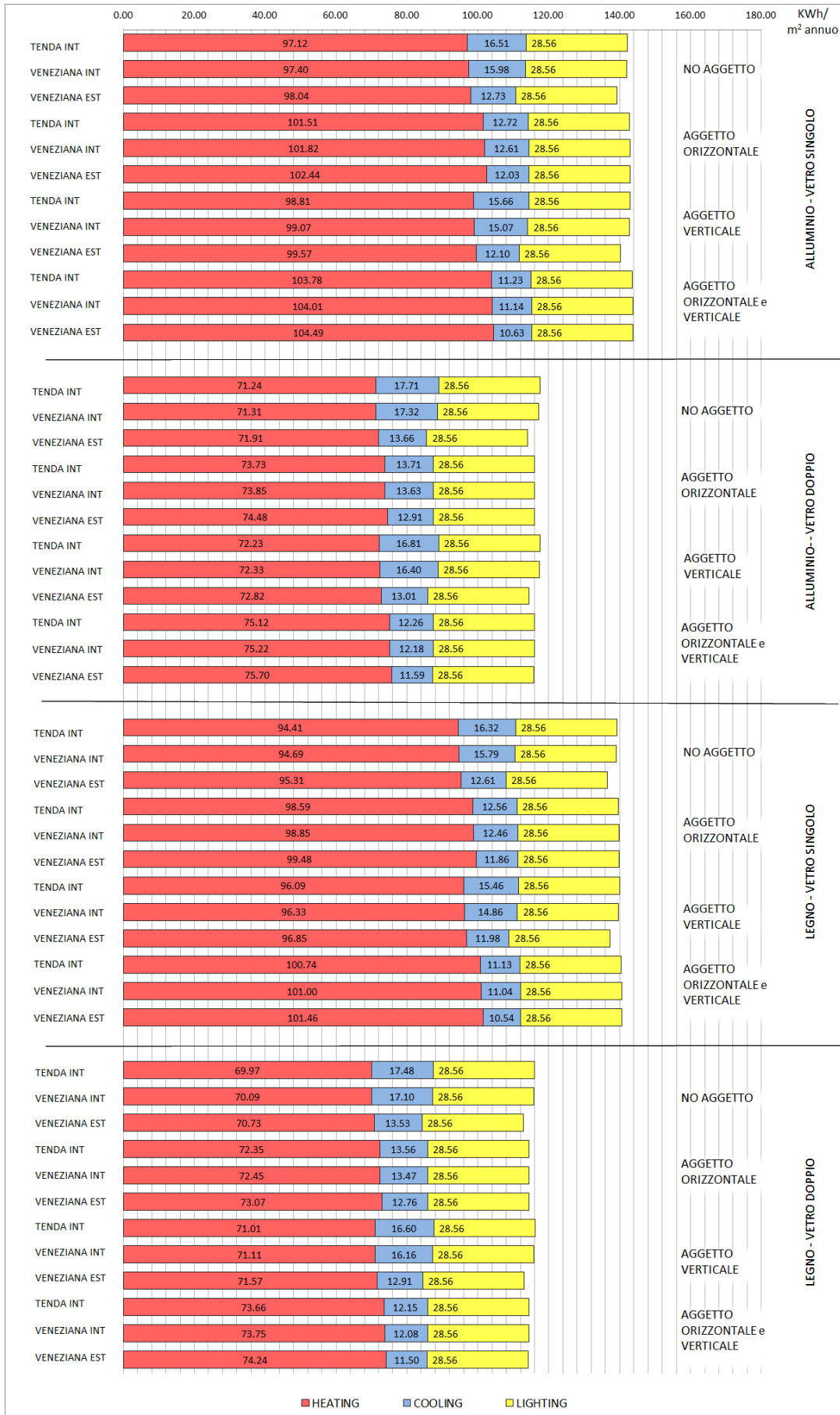
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



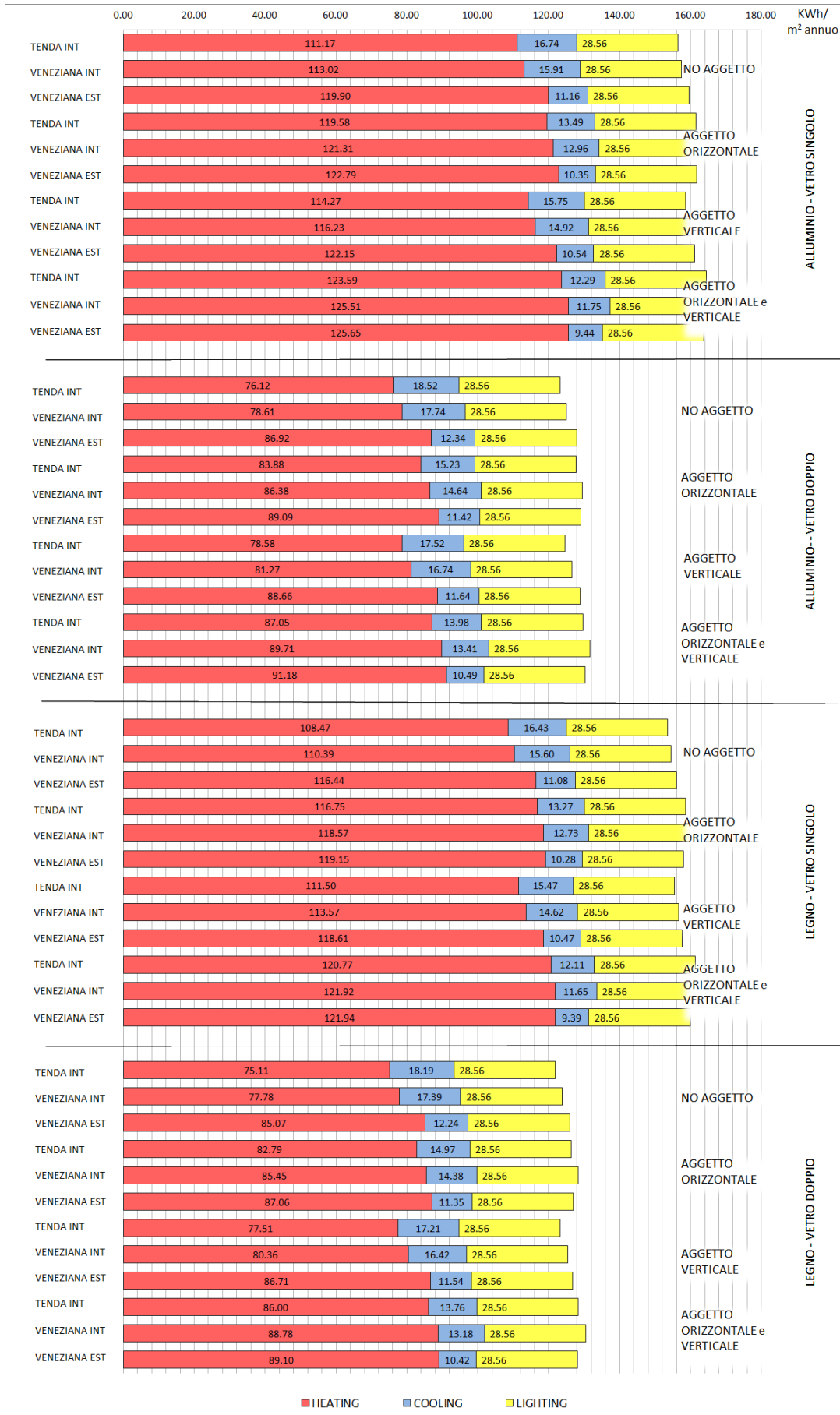
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



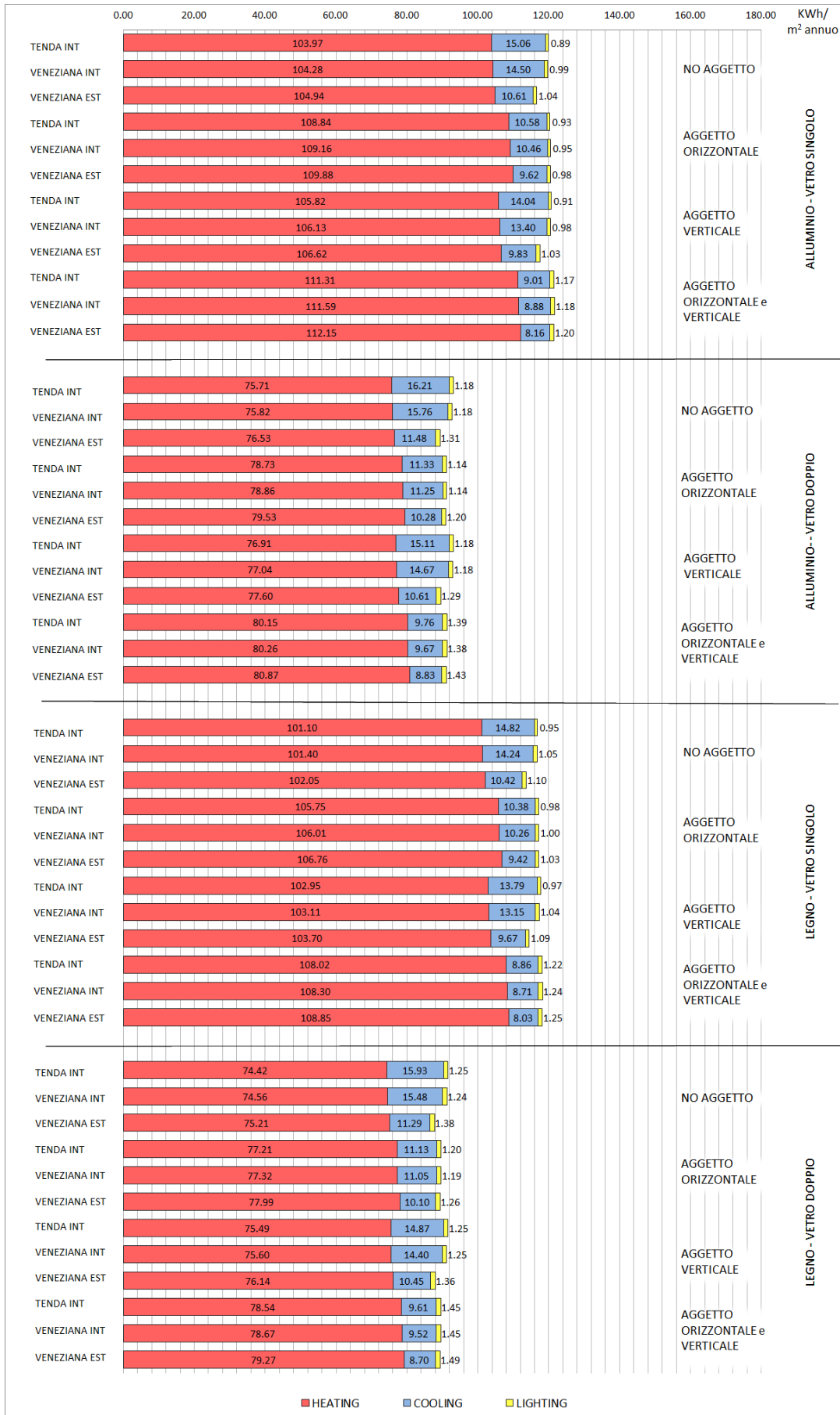
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



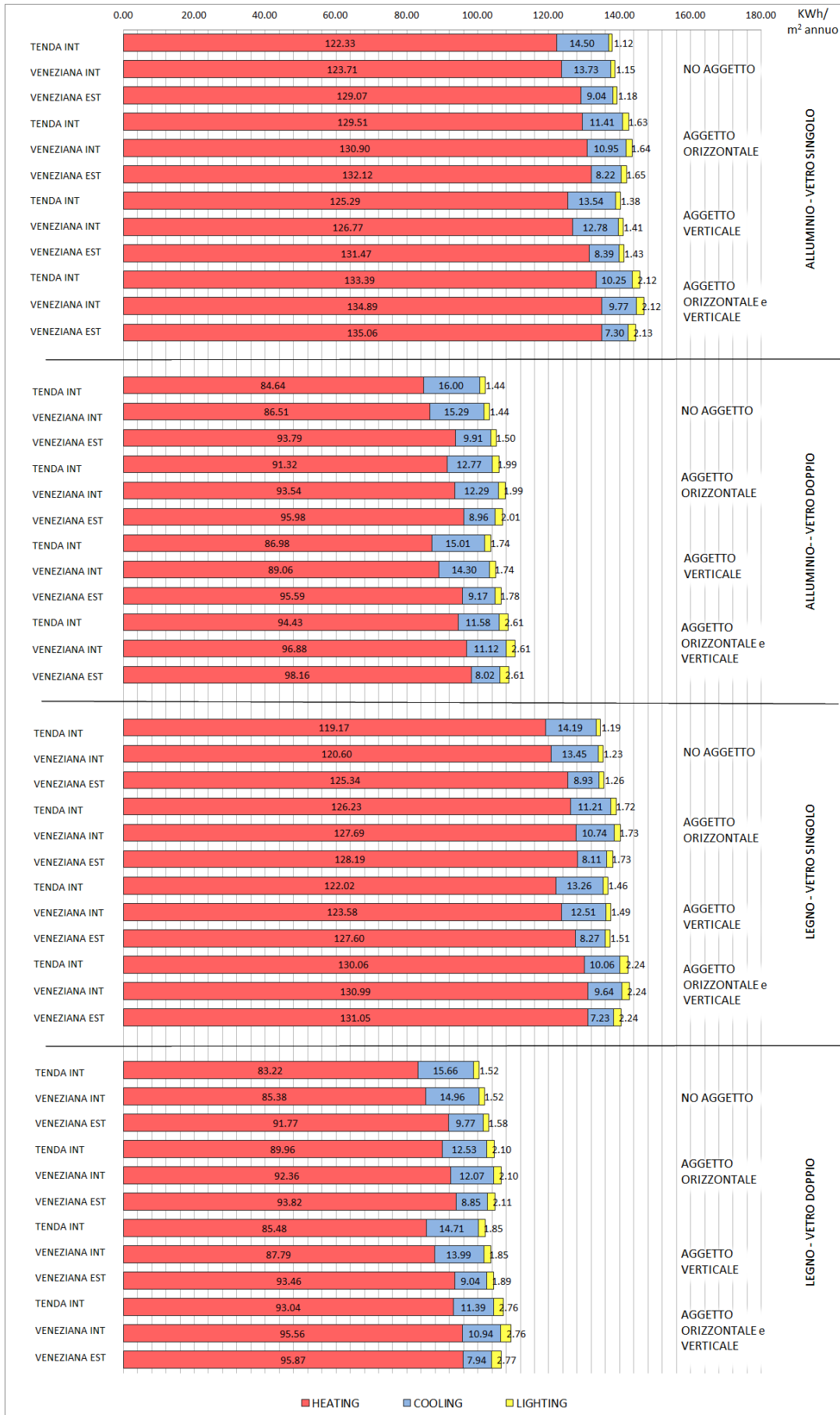
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



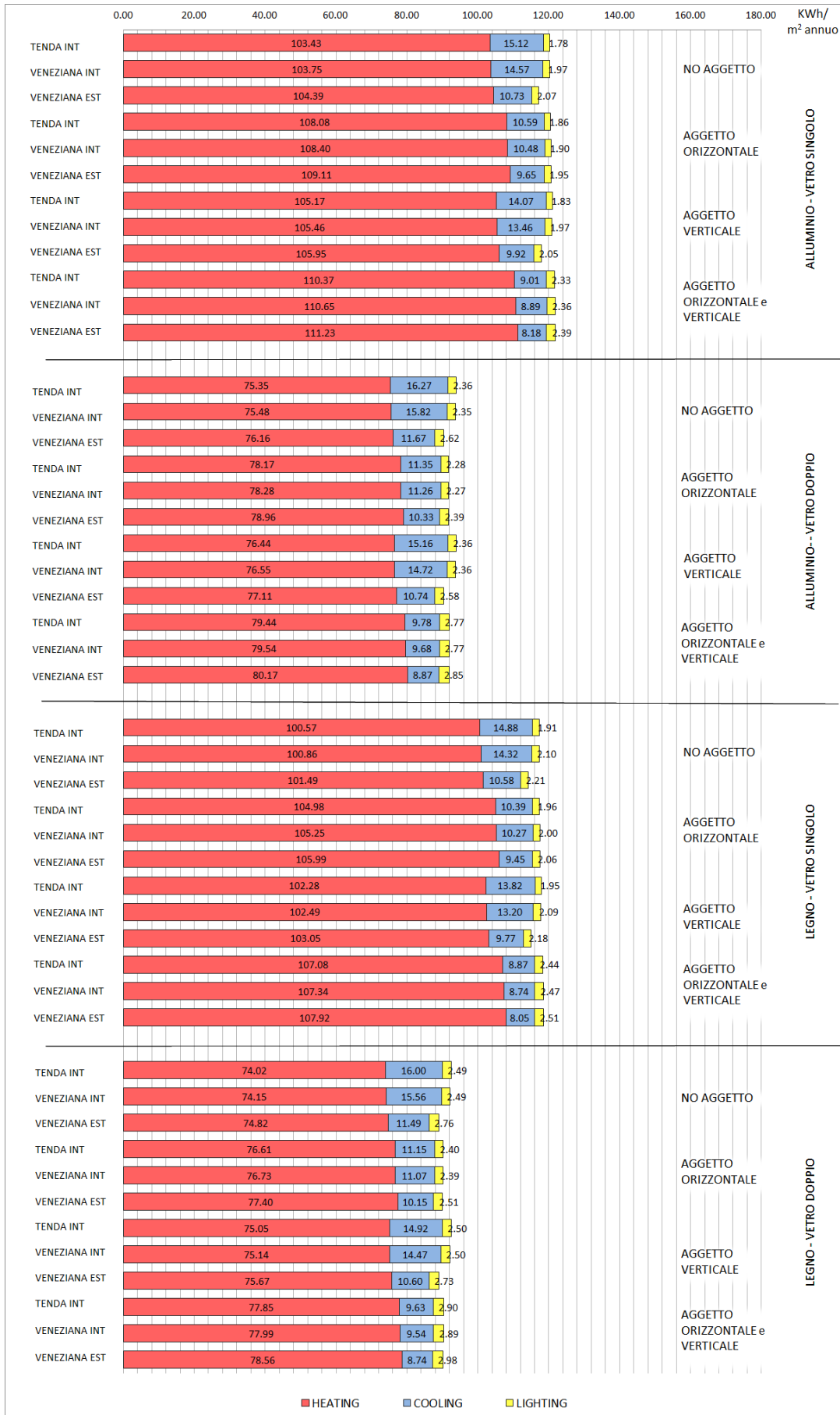
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



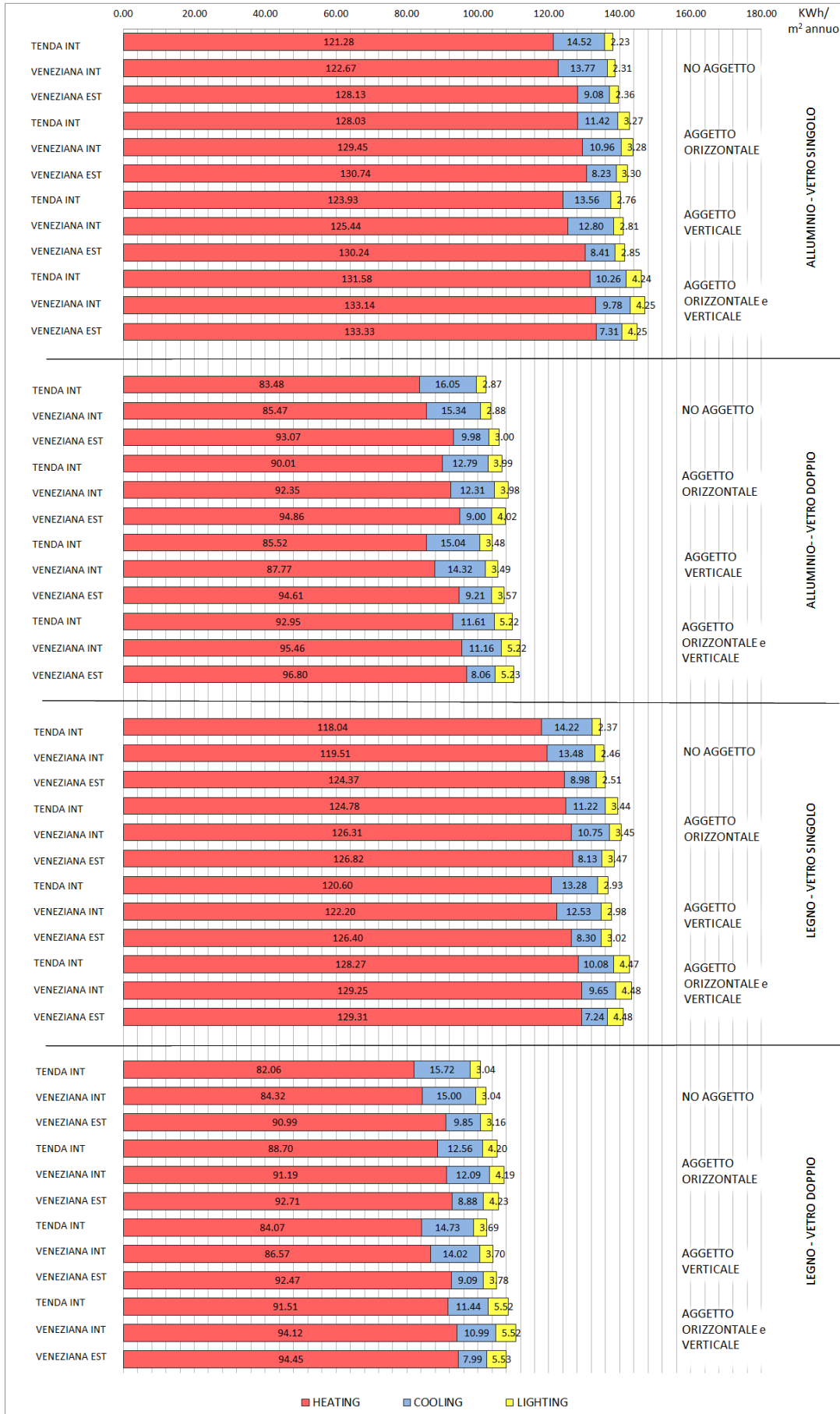
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



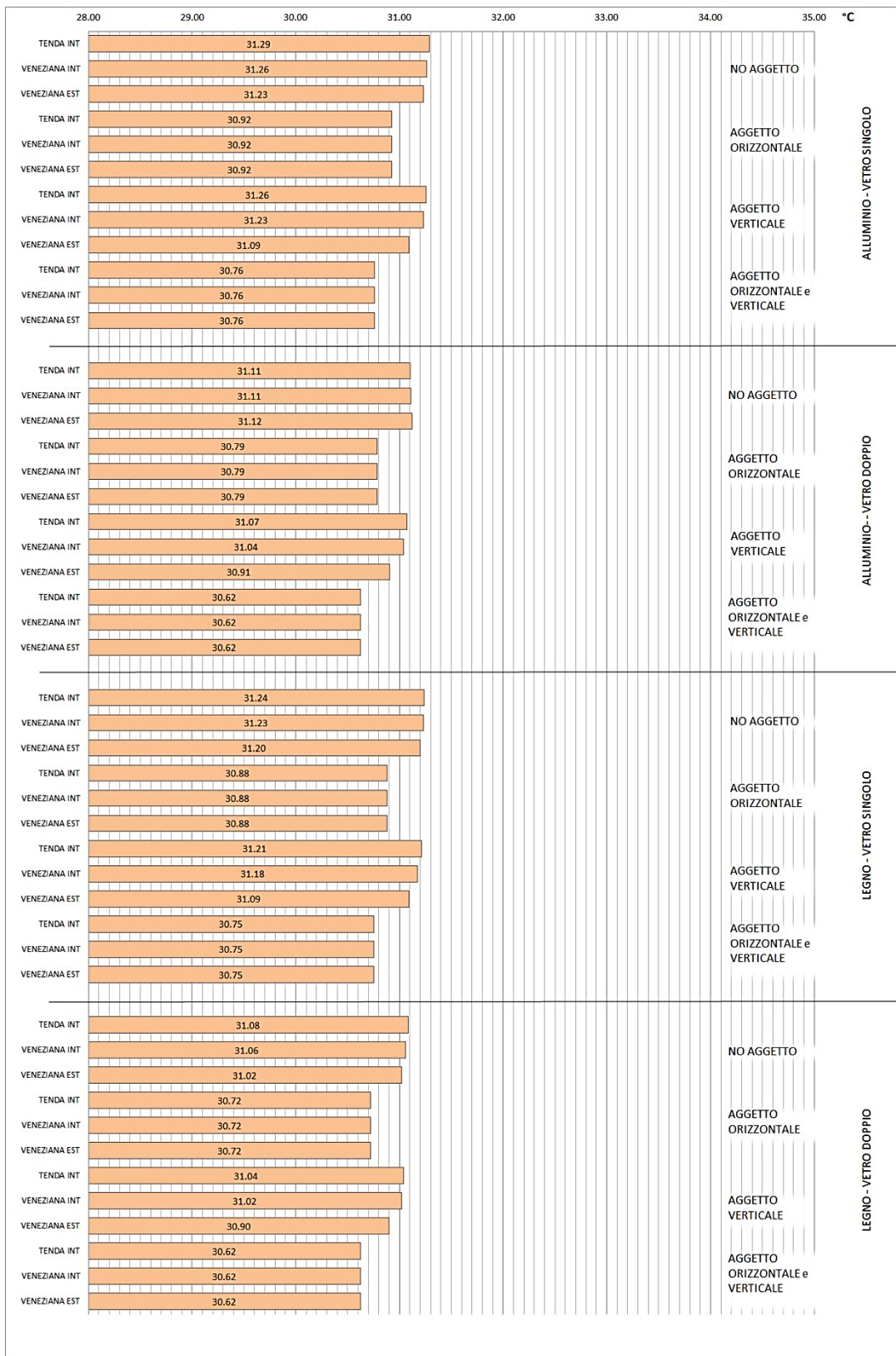
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



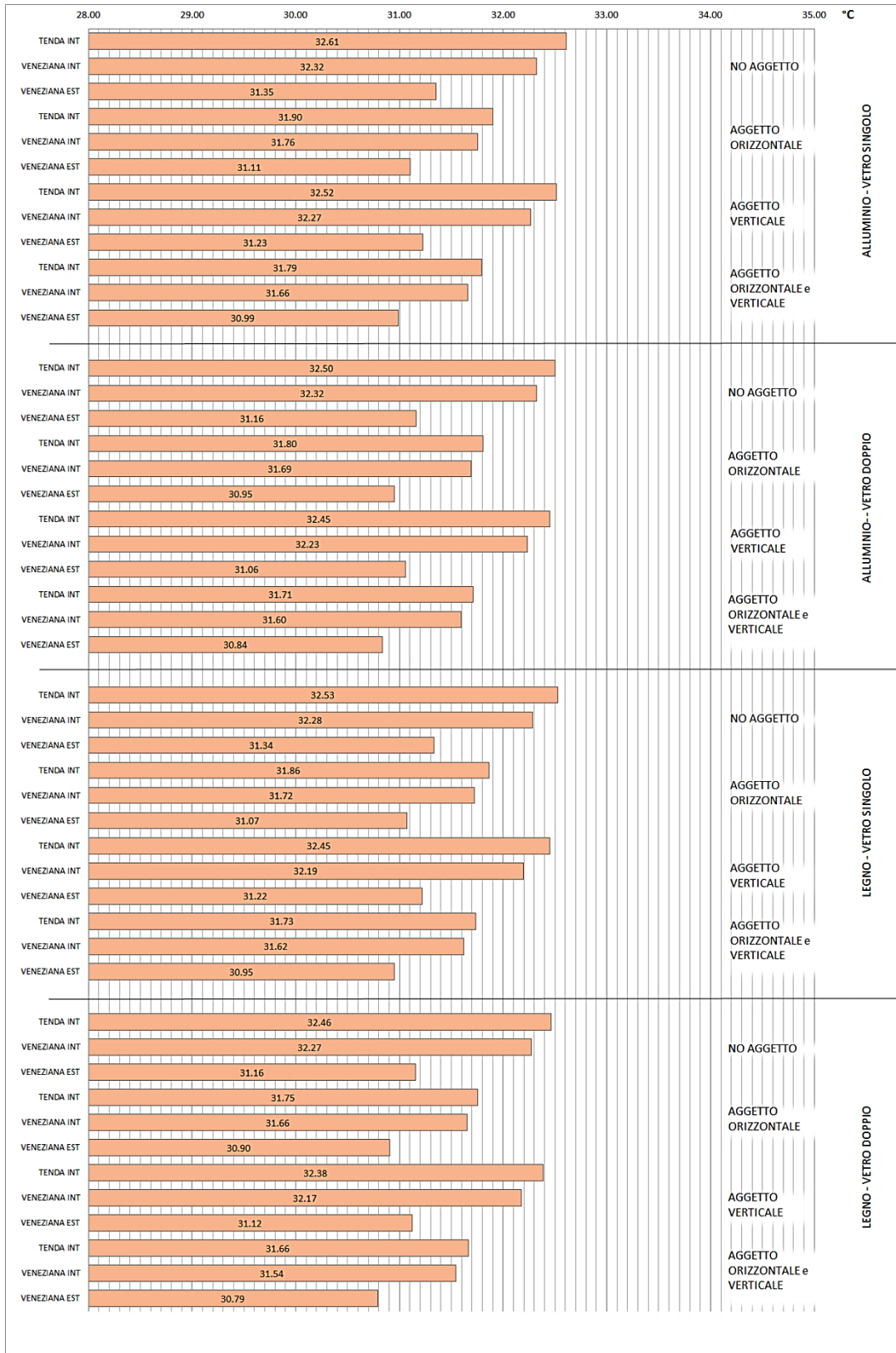
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



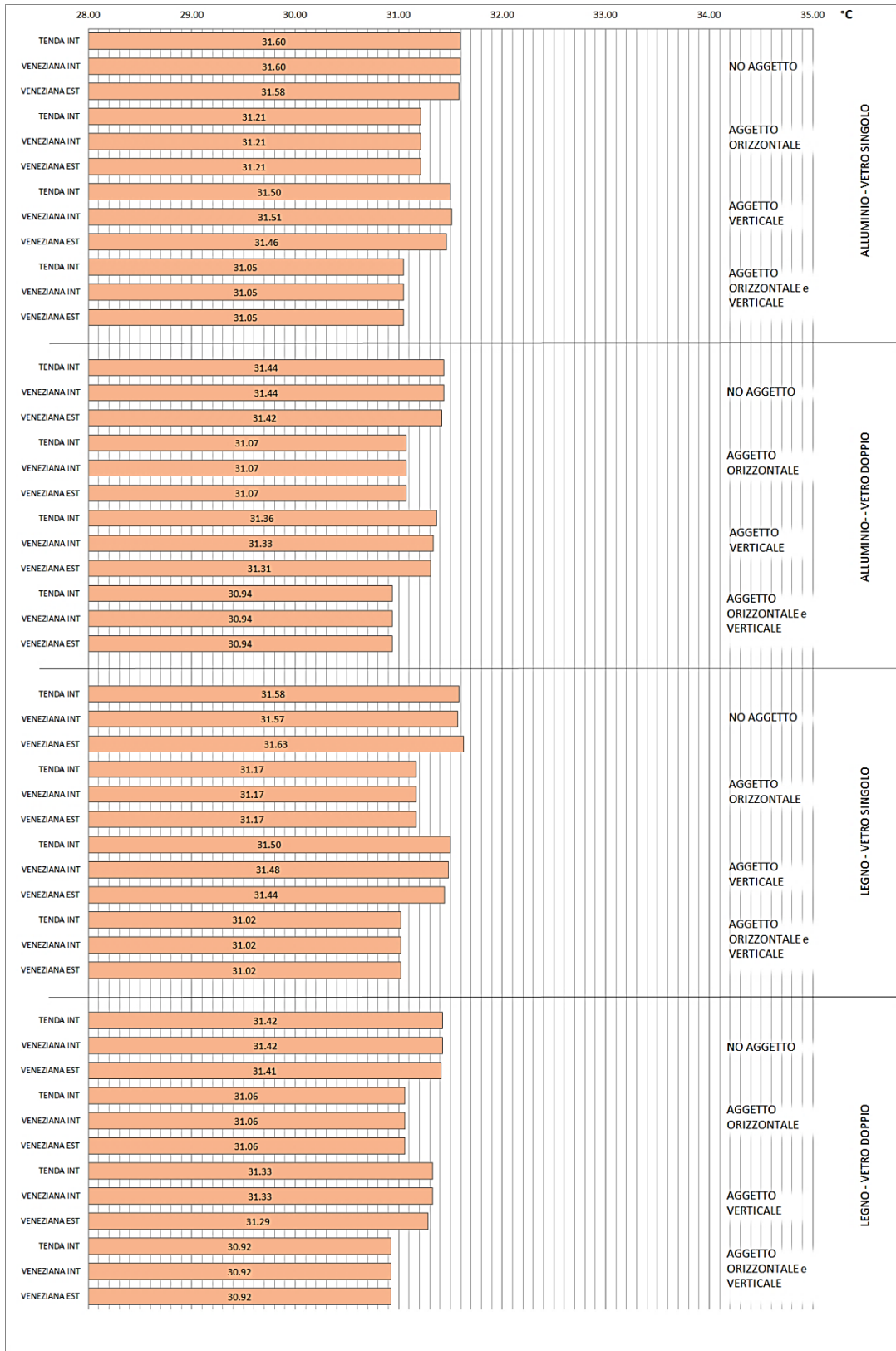
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



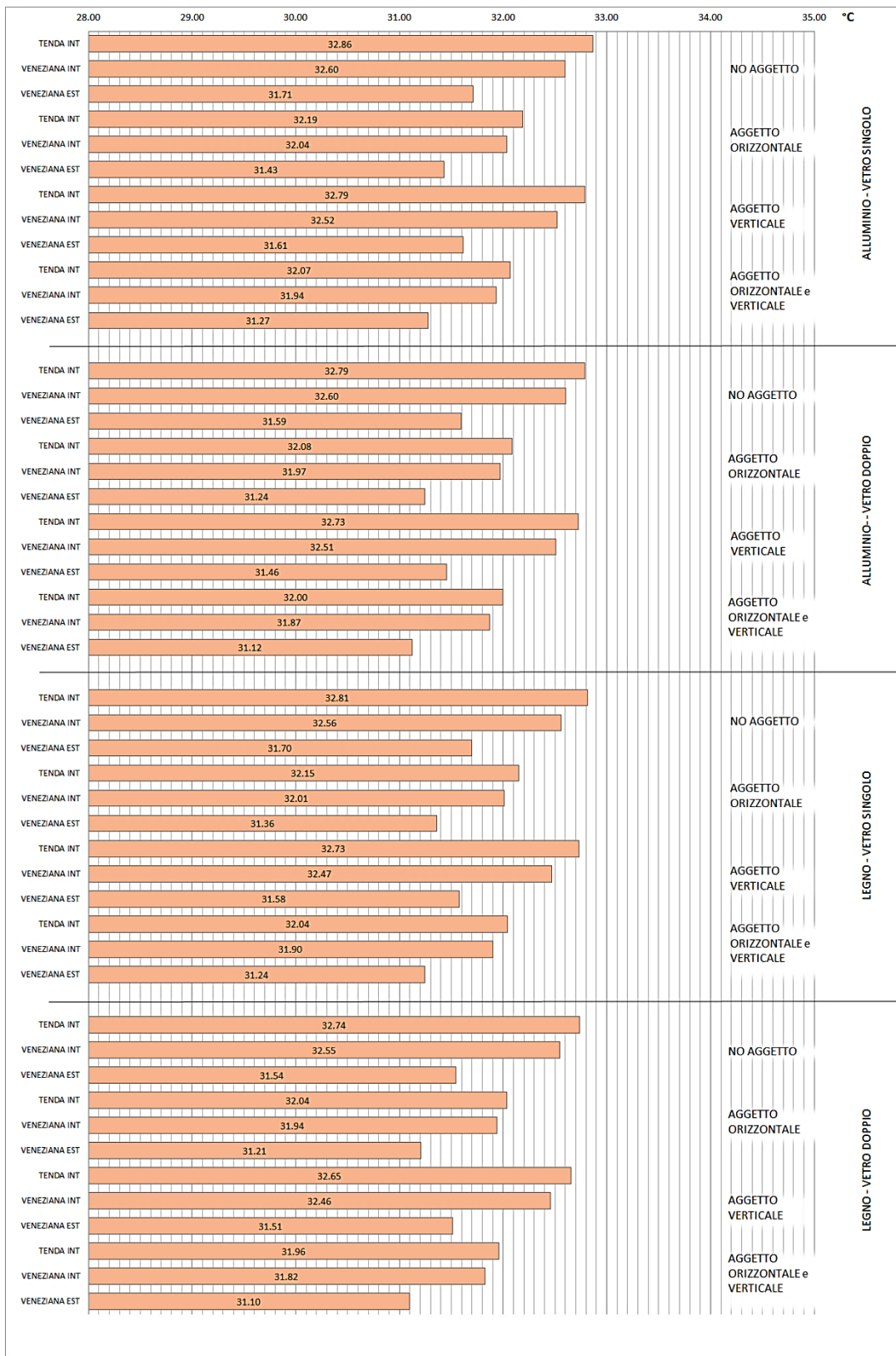
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



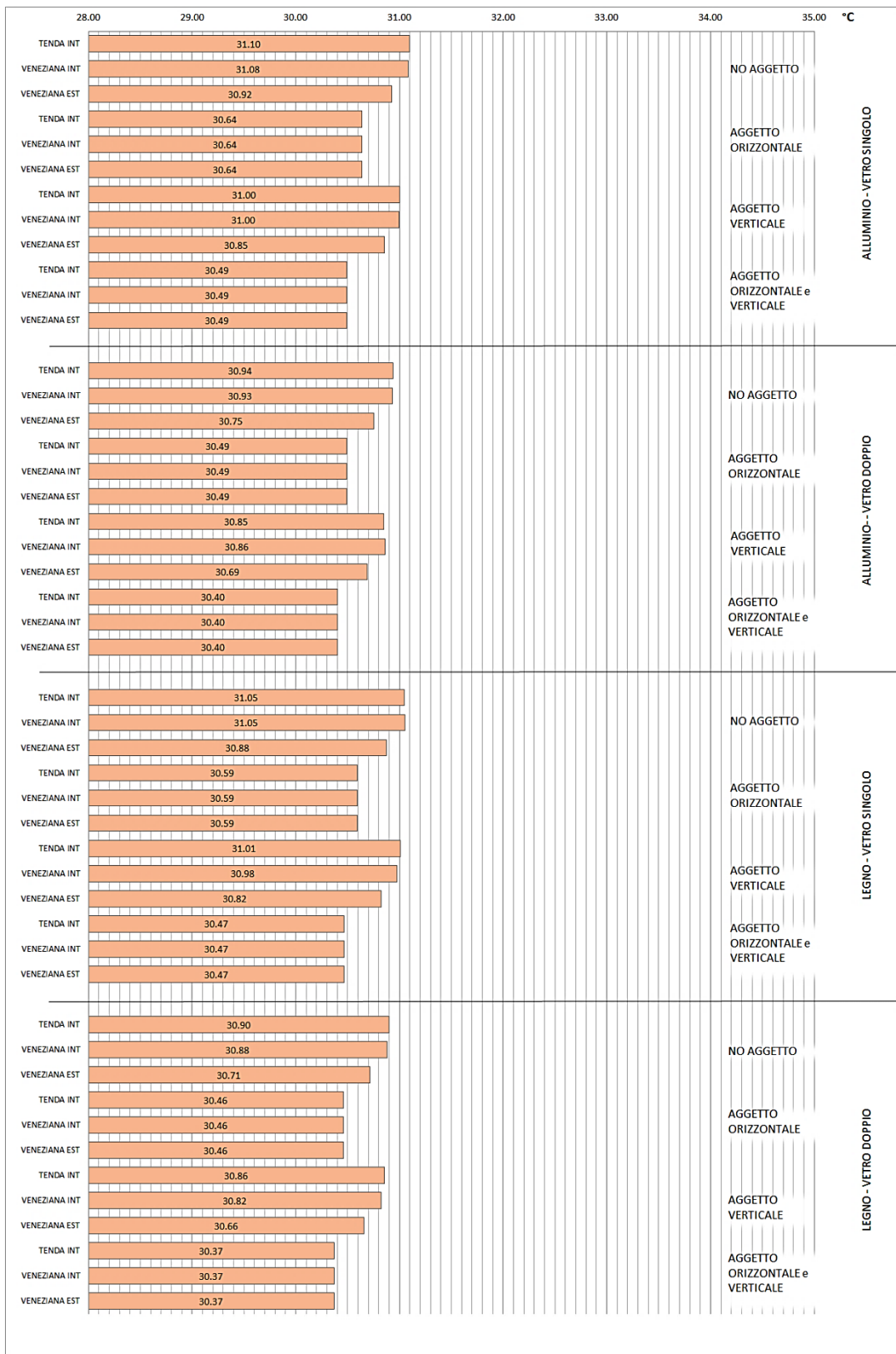
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



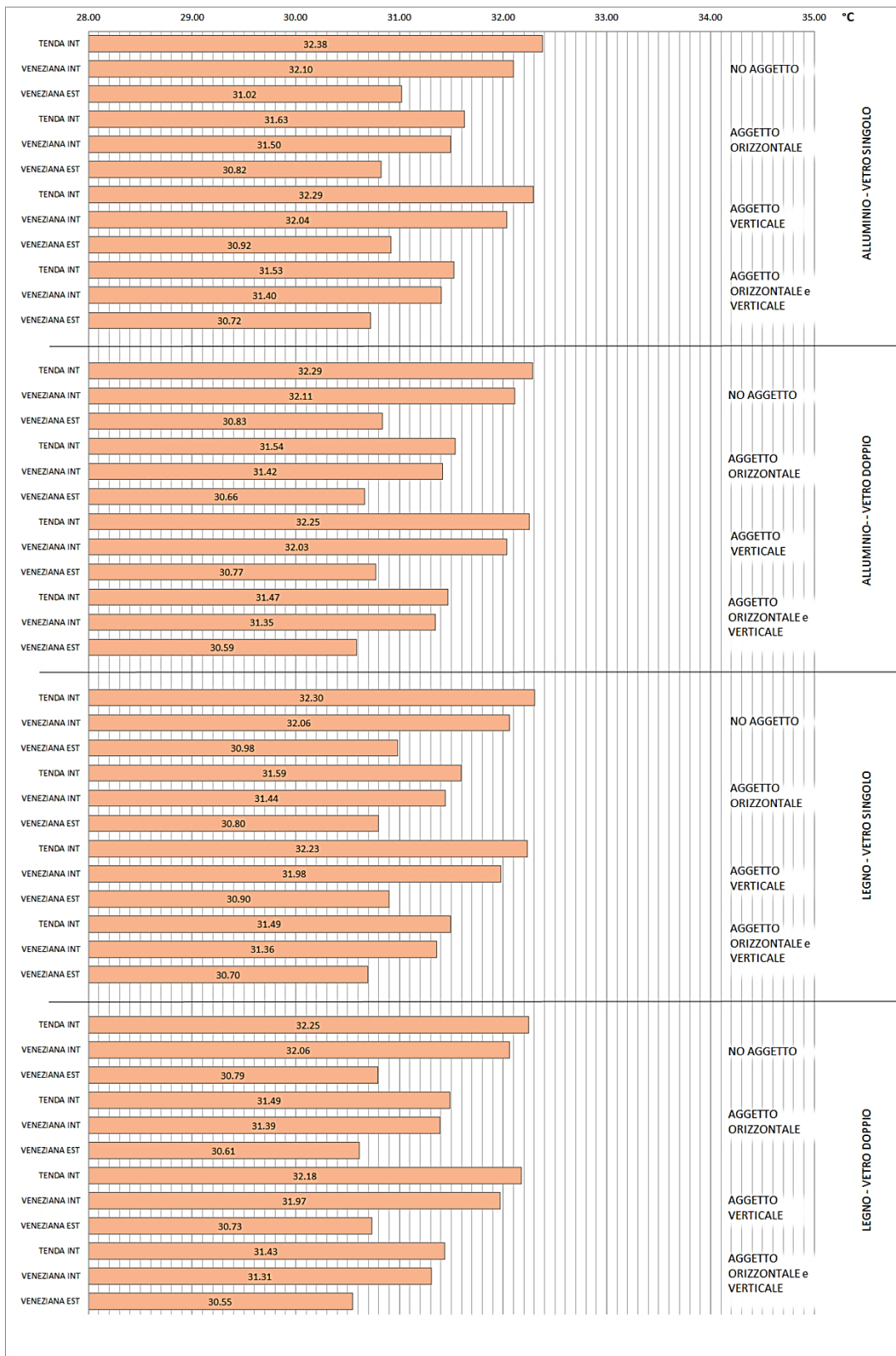
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



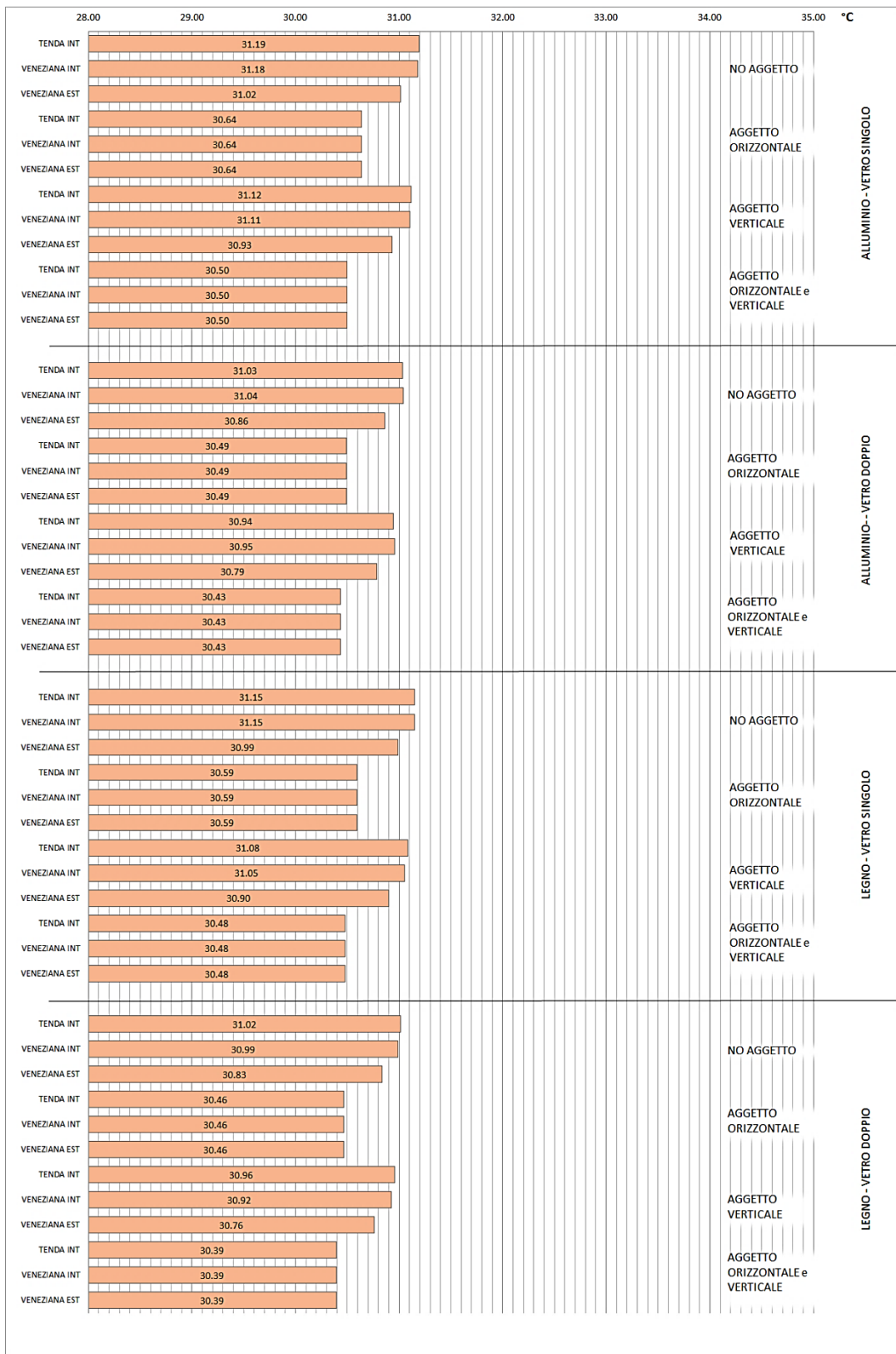
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



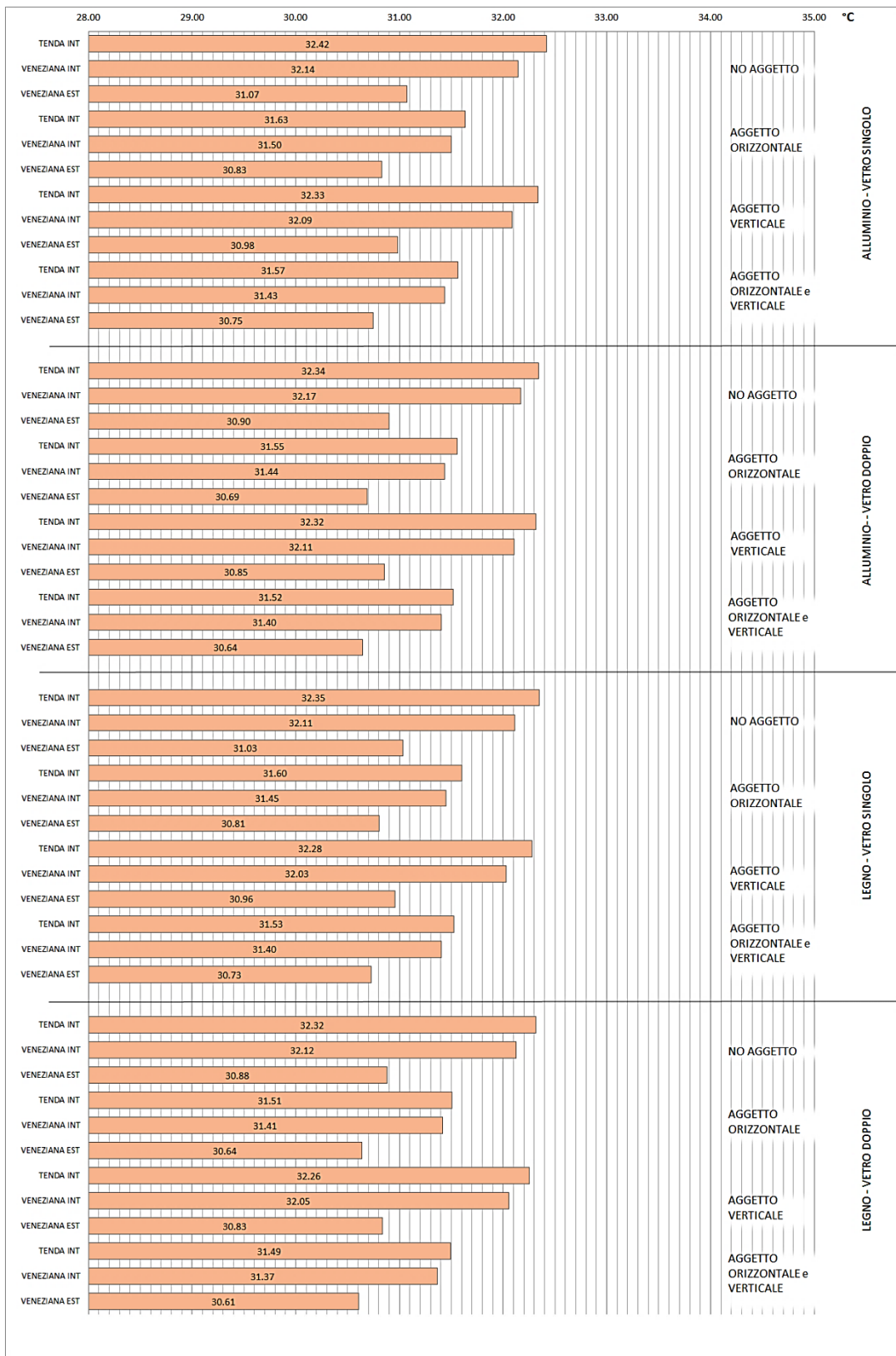
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



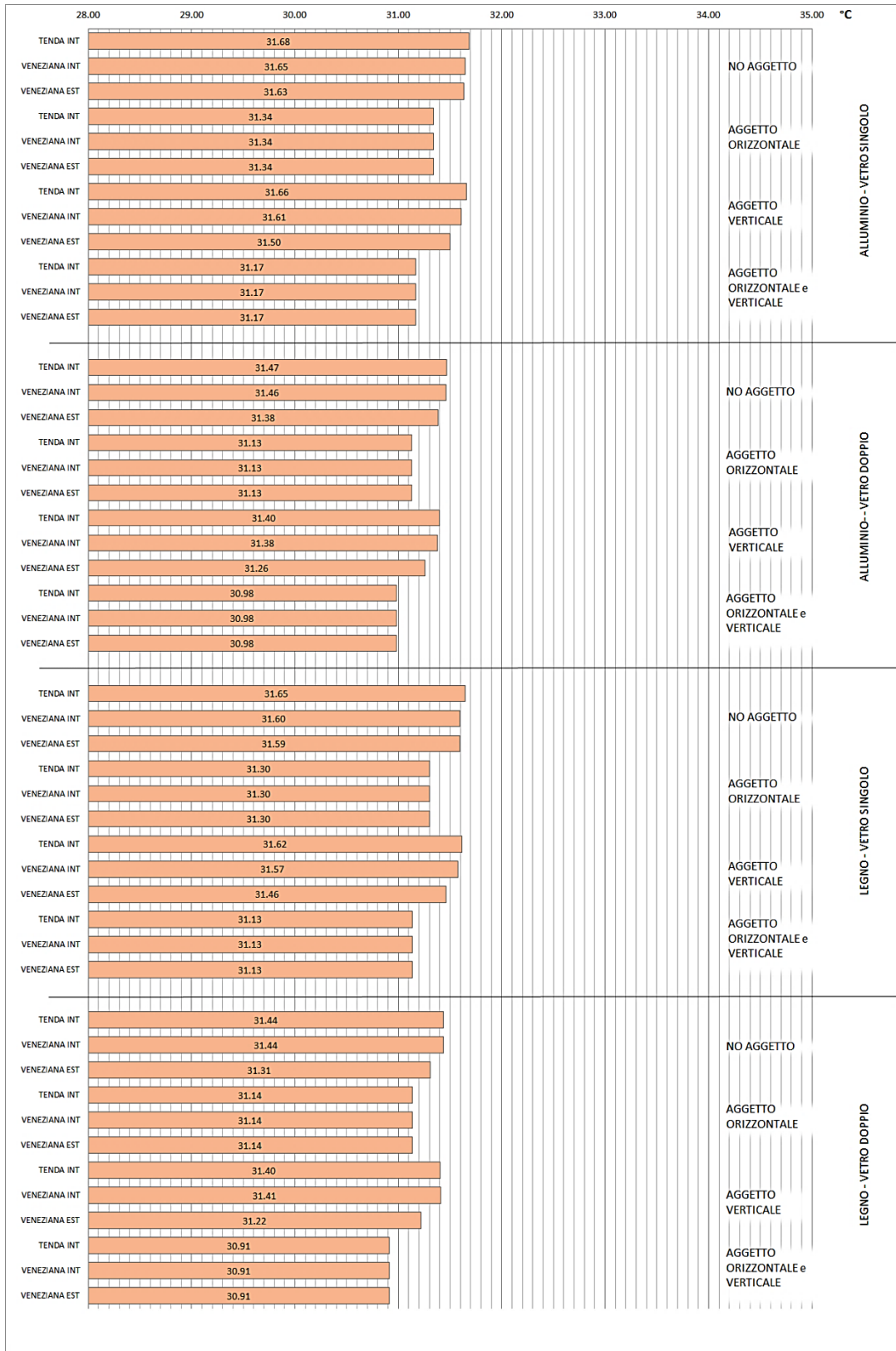
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



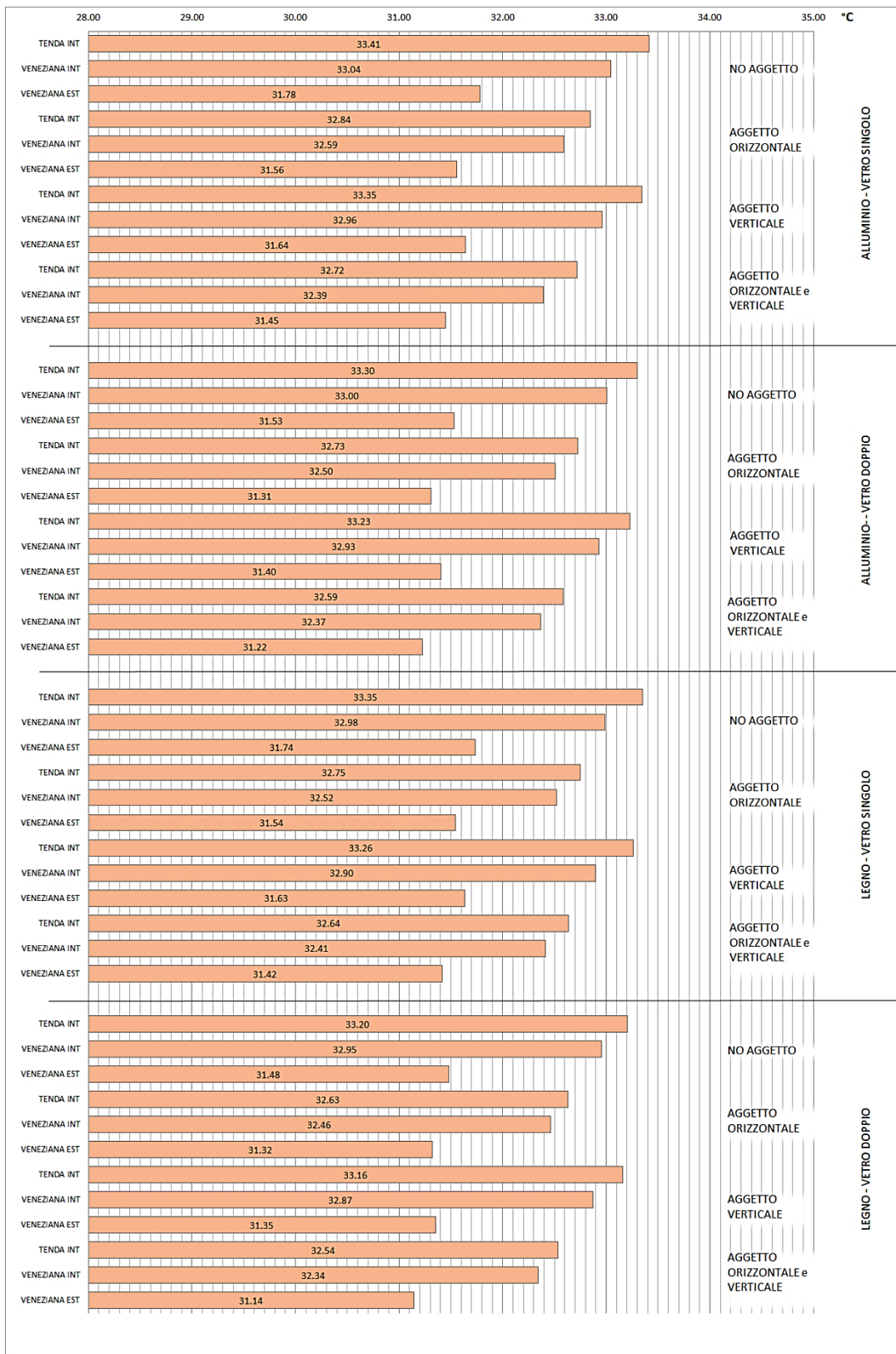
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



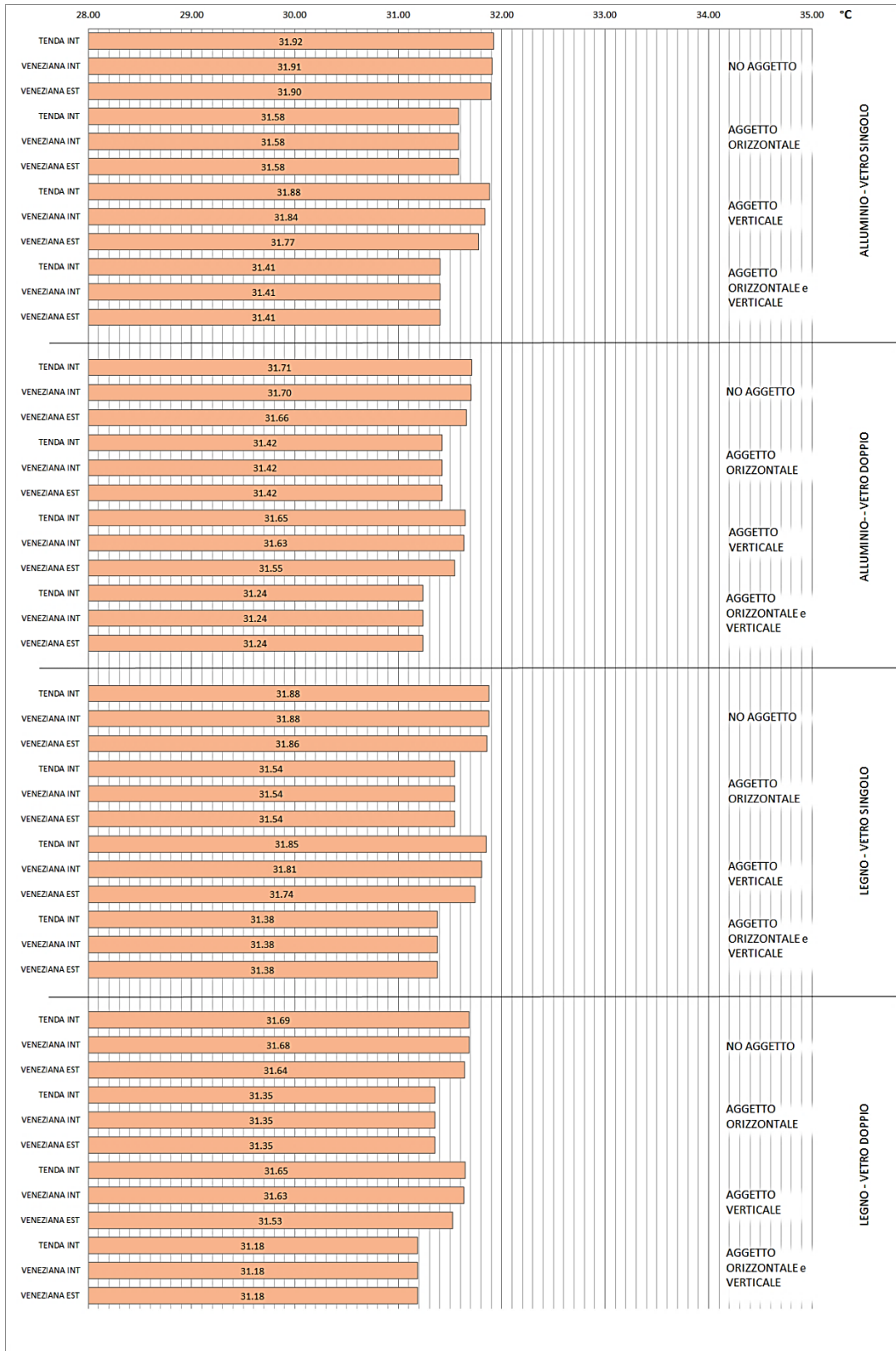
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



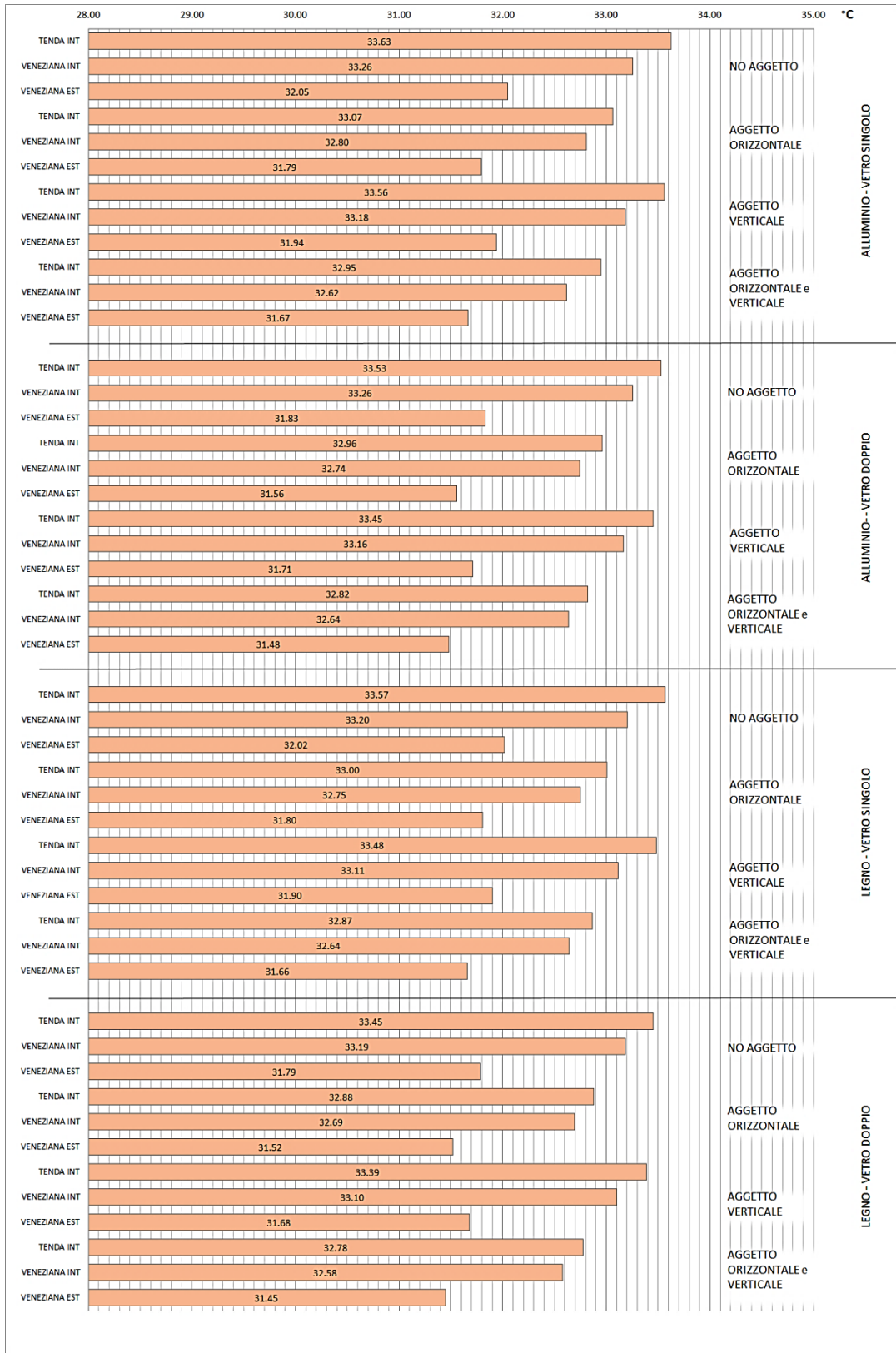
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



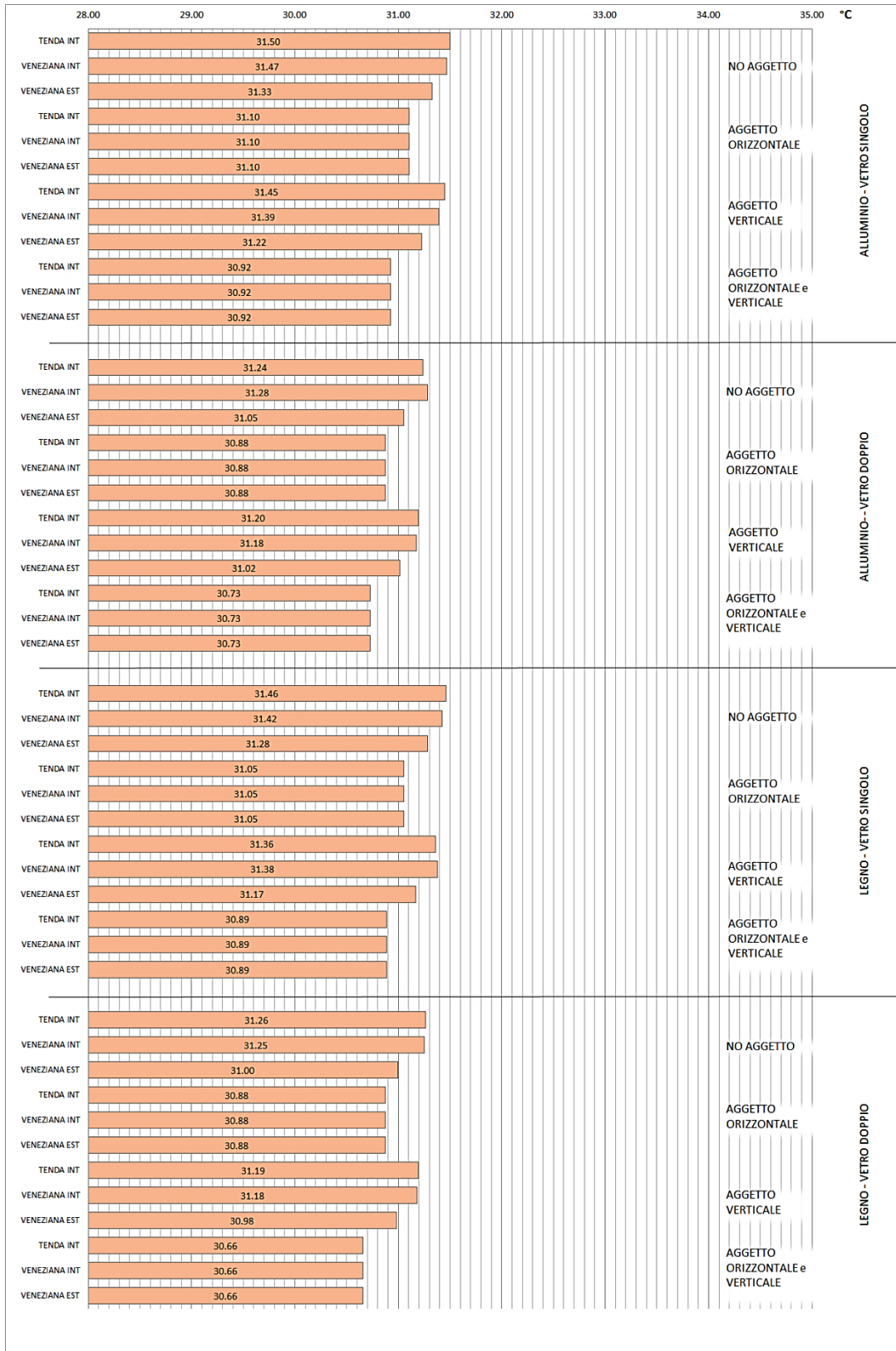
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



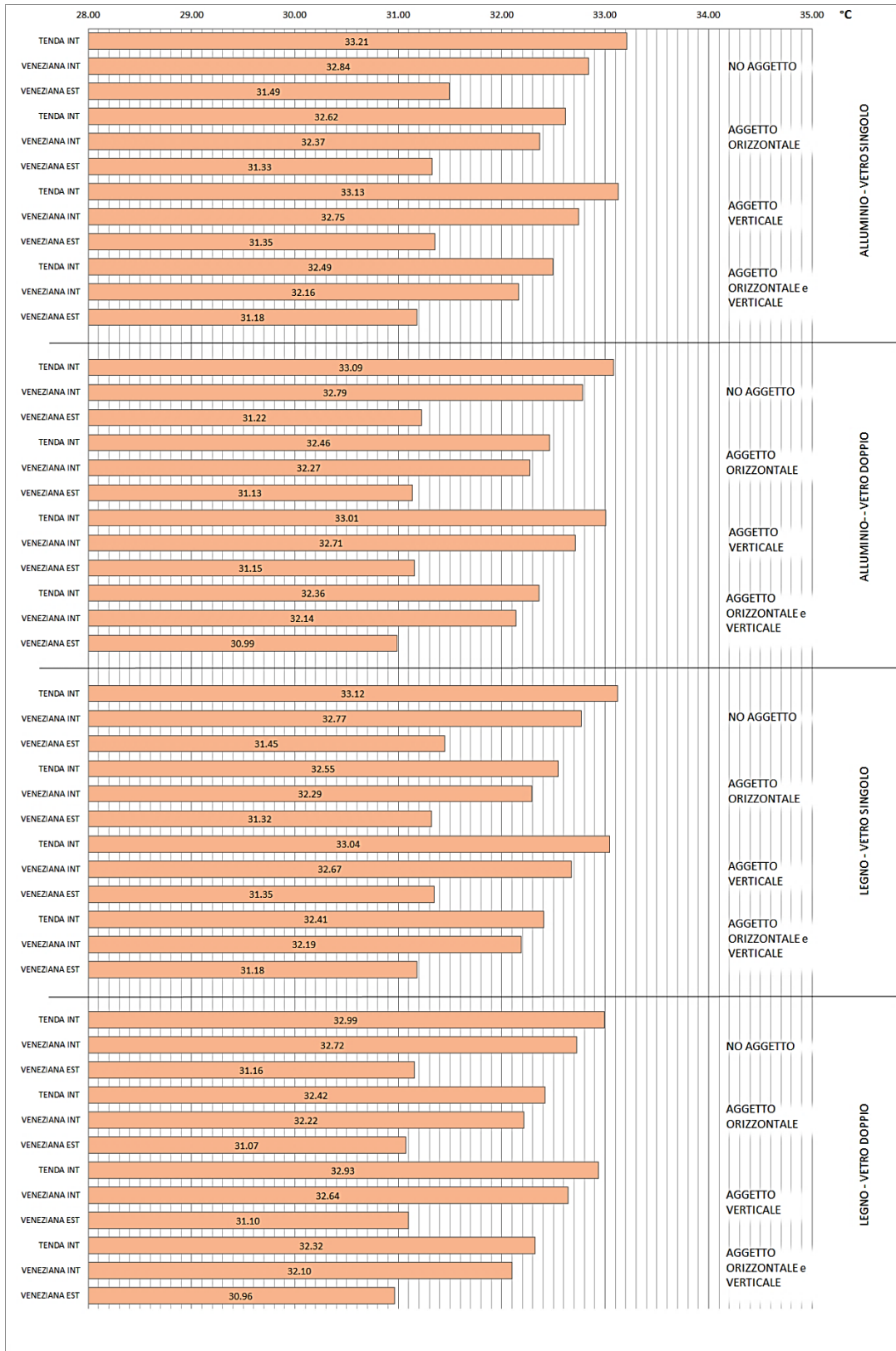
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



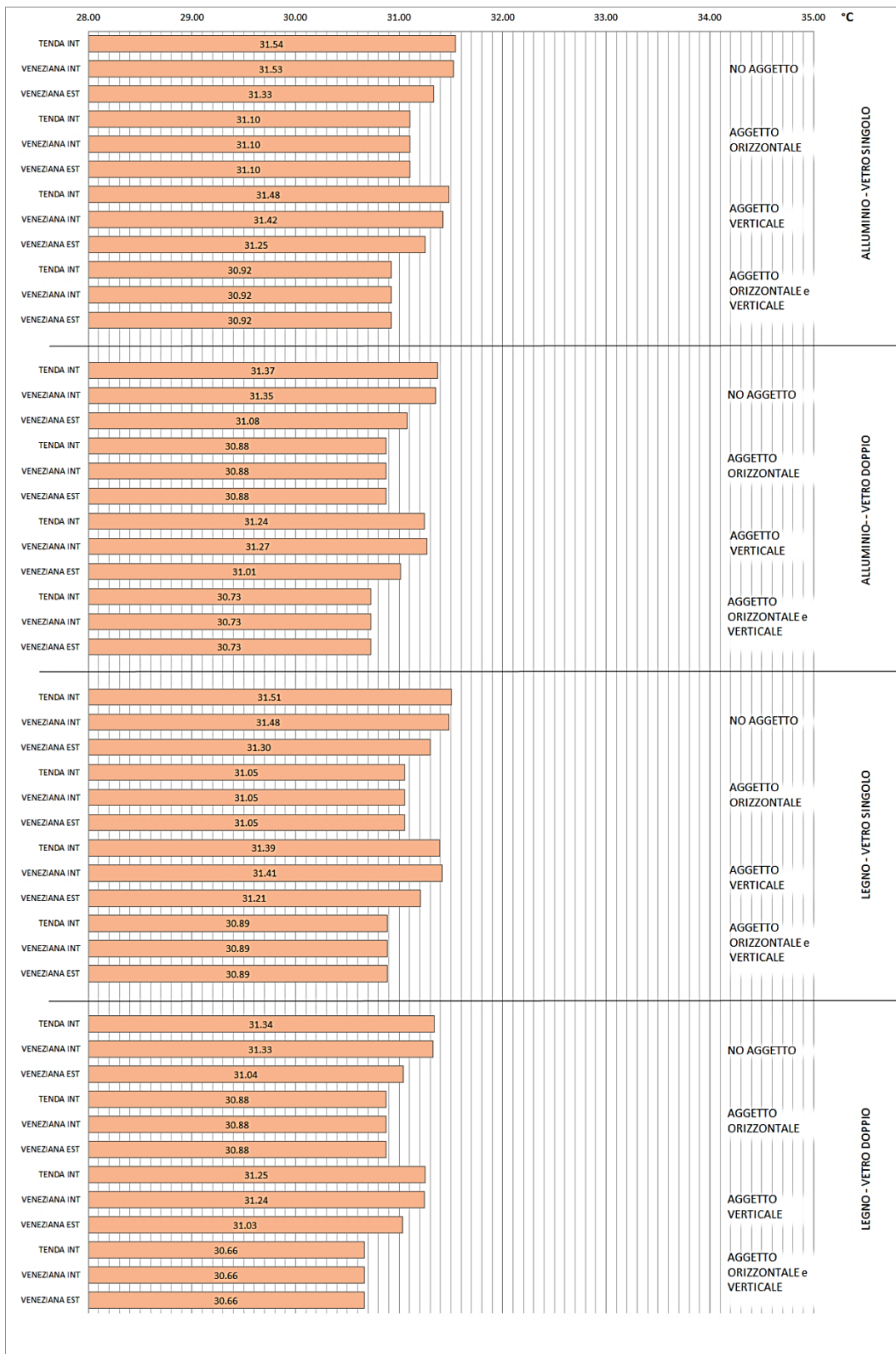
Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					



Geometria	Esposizione	Potenza elett	Controllo luci	Area finestrata	U (W/m ² K)
5x5	Sud	10	Nessuno	30%	1,19
7x7	Ovest	20	Continuo/off	50%	0,31
9x5					

