



**POLITECNICO DI MILANO**  
**SCUOLA DI INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA**  
**CORSO DI STUDIO IN INGEGNERIA DEI SISTEMI EDILIZI**

**DEFINIZIONE DEI LIMITI DI ENERGIA PER**  
**EDIFICI AD USO UFFICIO CON LA**  
**METODOLOGIA COST OPTIMALITY**

Relatore: Prof. Ing. Livio Mazzarella

Correlatore: Ing. Andrea Alongi

Autore: Davide Nicoli

Matricola: 787275

Anno accademico: 2013-2014

**Dedicato alla mia famiglia ed a tutte le persone  
che mi sono state vicine in questo percorso**

## INDICE DEL TESTO

<b>SOMMARIO</b> .....	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>14</b>
<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>15</b>
<b>CAPITOLO 1 - COST OPTIMALITY</b> .....	<b>18</b>
1.1 <i>Contesto storico</i> .....	18
1.2 <i>La nuova direttiva</i> .....	19
1.3 <i>Descrizione della procedura</i> .....	20
<b>CAPITOLO 2 - ARCHETIPI MORFOLOGICI</b> .....	<b>23</b>
2.1 <i>Fonti utilizzate</i> .....	23
2.2 <i>Criteri di analisi</i> .....	25
2.3 <i>Definizione degli archetipi morfologici</i> .....	32
<b>CAPITOLO 3 - ARCHETIPI TECNOLOGICI</b> .....	<b>40</b>
3.1 <i>Fonti utilizzate</i> .....	40
3.2 <i>Criterio di analisi</i> .....	41
3.2.1 <i>Chiusura verticale opaca</i> .....	43
3.2.1.1 <i>Chiusura verticale opaca a secco</i> .....	43
3.2.1.2 <i>Chiusura verticale opaca tradizionale</i> .....	45
3.2.2 <i>Chiusura orizzontale di copertura</i> .....	46
3.2.3 <i>Chiusura orizzontale controterra</i> .....	48
3.2.4 <i>Chiusura verticale trasparente</i> .....	50
3.2.5 <i>Schermature solari</i> .....	51
3.3 <i>Definizione delle misure di efficienza energetica e dei parametri</i> .....	54

<b>CAPITOLO 4 - ARCHETIPI IMPIANTISTICI.....</b>	<b>56</b>
4.1 Fonti utilizzate .....	57
4.2 Criterio di analisi.....	58
4.2.1 Sistema di generazione .....	58
4.2.1.1 Caldaia a condensazione .....	60
4.2.1.2 Pompa di calore e chiller.....	61
4.2.1.3 Chiller ad assorbimento.....	64
4.2.2 Sistema di emissione.....	66
4.2.3 Sistema di regolazione.....	68
4.2.4 Sistema di distribuzione.....	69
4.2.5 Ventilazione meccanica.....	70
4.2.6 Acqua calda sanitaria.....	71
4.2.7 Impianto solare fotovoltaico.....	72
4.3 Definizione delle misure di efficienza energetica e dei parametri .....	73
<b>CAPITOLO 5 - MODELLAZIONE ENERGETICA.....</b>	<b>75</b>
5.1 Software Trnsys.....	76
5.1.1 Sistema edificio-impianto .....	76
5.1.2 Modello dell'edificio .....	79
5.1.3 Simulazioni .....	81
5.2 Modellazione degli impianti .....	82
5.2.1 Caldaia a condensazione.....	82
5.2.2 Pompa di calore e chiller .....	84
5.2.3 Chiller ad assorbimento .....	87
5.2.4 Ventilazione meccanica.....	89
5.2.5 Acqua calda sanitaria.....	91
5.2.6 Impianto solare fotovoltaico.....	92

5.3. Definizione del fabbisogno di energia primaria.....	93
<b>CAPITOLO 6 - METODOLOGIA VAN .....</b>	<b>94</b>
6.1 Investimento iniziale .....	96
6.1.1 Valore residuo .....	100
6.1.2 Costo di sostituzione.....	101
6.2 Flussi di cassa.....	102
6.2.1 Costi energetici.....	102
6.2.1.1 Energia elettrica.....	102
6.2.1.2 Gas naturale .....	103
6.2.1.3 Evoluzione dei costi.....	103
6.2.2 Costi di manutenzione .....	104
6.2.3 Costi di smaltimento della CO <sub>2</sub> .....	104
<b>CAPITOLO 7 - OTTIMI GLOBALI, CURVE ED INTERVALLI OTTIMALI DI PRESTAZIONE .....</b>	<b>105</b>
7.1 Scelta delle combinazioni .....	106
7.1.1 Combinazioni di archetipi morfologici e tecnologie d'involucro .....	106
7.1.2 Combinazioni di impianto .....	108
7.2 Ottimi globali.....	109
7.2.1 Procedimento iterativo ed ottimi globali.....	109
7.2.2 Grafici delle iterazioni e tabelle delle misure di efficienza energetica.....	114
7.3 Curve ed intervalli ottimali di prestazione .....	141
7.3.1 Costruzione delle curve ed individuazione degli intervalli.....	141
7.3.2 Grafici delle curve e degli intervalli ottimali di prestazione .....	144
7.4 Confronto con la normativa e commenti .....	157
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>166</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>170</b>

## INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1 - Distribuzione del campione di edifici studiato in base alla classificazione energetica.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2 - Distribuzione in frequenza del campione di edifici studiato in base alla superficie lorda.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3 - Distribuzione in frequenza dei campioni studiati in base al volume lordo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4 - Sezione della chiusura verticale opaca a secco.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5 - Sezione della chiusura verticale opaca tradizionale.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 6 - Sezione della chiusura orizzontale di copertura.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 7 - Sezione della chiusura orizzontale controterra.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 8 - (a) Posizionamento delle lamelle sulle superfici vetrate del lato Sud (b) posizionamento delle lamelle sulle superfici vetrate dei lati Est ed Ovest.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 9 - Effetto sulla radiazione solare diretta delle schermature sul lato Sud.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 10 - Distribuzione dei sistemi di generazione per il campione di edifici del CEER, esplodendo il grafico sono evidenziate le categorie maggiormente diffuse, mentre le altre componenti accorpate rappresentano quelle meno utilizzate.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 11 - Ciclo generico di funzionamento di una pompa di calore.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 12 - Valori orari del COP nella stagione di riscaldamento (dal 15 ottobre al 15 luglio) valutati per tre diverse temperatura di mandata, 40°C (nero), 50°C (azzurro) e 60°C (verde).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 13 - Valori orari dell'EER nella stagione di raffrescamento (dal 15 luglio al 15 ottobre) valutati per tre diverse temperatura di mandata, 17°C (nero), 12°C (azzurro) e 7°C (verde).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 14 - Ciclo di funzionamento di un chiller ad assorbimento.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 15 - Type ed i loro collegamenti in Simulation Studio per il calcolo della richiesta di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 16 - Variazione del rendimento della caldaia a condensazione in funzione della percentuale del carico nominale e della temperatura di ritorno dal sistema di emissione.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 17 - Valori del COP (stagione invernale) in funzione della temperatura della sorgente esterna (aria) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 30°C (nero), 40°C (azzurro), 50°C (verde).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 18 - Valori dell'EER (stagione estiva) in funzione della temperatura della sorgente esterna (aria) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 17°C (nero), 12°C (azzurro), 7°C (verde).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 19 - Valori del COP (stagione invernale) in funzione della temperatura della sorgente esterna (acqua) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 30°C (nero), 40°C (azzurro), 50°C (verde).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 20 - Valori dell'EER (stagione estiva) in funzione della temperatura della sorgente esterna (acqua) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 17°C (nero), 12°C (azzurro), 7°C (verde).....</i>	<i>86</i>

<i>Figura 21 - Valore di CCF (a) e HIF (b) in funzione della temperatura media dell'acqua calda in ingresso dal campo collettori (ascisse) e della temperatura dell'acqua di raffreddamento della torre evaporativa (curve rosse); valore di FCF (c) in funzione della percentuale del flusso rispetto a quello nominale (ascisse)</i>	88
<i>Figura 22 - Schema di funzionamento dello scambiatore all'interno del sistema di ventilazione</i>	89
<i>Figura 23 - Type ed i loro collegamenti in Simulation Studio per calcolare la produttività dell'impianto solare fotovoltaico</i>	92
<i>Figura 24 - Attualizzazione del valore residuo della misura di efficienza energetica la cui vita utile supera il periodo di calcolo</i>	100
<i>Figura 25 - Attualizzazione del valore finale e costo di sostituzione della misura di efficienza energetica la cui vita utile è inferiore al periodo di calcolo</i>	101
<i>Figura 26 - Percorsi alla fine del processo iterativo, sono evidenziati i punti di partenza, l'ottimo globale ed i parziali</i>	110
<i>Figura 27 - Processo iterativo, II corrisponde all'inizio dell'iterazione, mentre OP all'ottimo parziale; l'ottimo parziale che si ricava è la partenza dell'iterazione successiva</i>	110
<i>Figura 28 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU1_1a</i>	115
<i>Figura 29 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU1_1b</i>	116
<i>Figura 30 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU2_1a</i>	117
<i>Figura 31 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU2_1b</i>	118
<i>Figura 32 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU3_1a</i>	119
<i>Figura 33 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU3_1b</i>	120
<i>Figura 34 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4_1a</i>	121
<i>Figura 35 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4_1b</i>	122
<i>Figura 36 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4_2a</i>	123
<i>Figura 37 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4_2b</i>	124
<i>Figura 38 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU5_1a</i>	125

<i>Figura 39 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU5_1b.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 40 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU6_1a.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 41 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU6_1b.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 42 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU7_1a.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 43 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU7_1b.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 44 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8_1a.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 45 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8_1b.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 46 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8_2a.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 47 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8_2b.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 48 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9_1a.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 49 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9_1b.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 50 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9_2a.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 51 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9_2b.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 52 - Esempio della nuvola di valori energetici ed economici in cui sono evidenziati i minimi .....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 53 - Scelta dei minimi interessanti sulla base della pendenza dell'interpolante.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 54 - Definizione dell'intervallo di prestazione energetica ottimale partendo dal punto della nuvola che presenta il valore globale minimo .....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 55 - Combinazione IU1_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1</math>, <math>p_2</math>, <math>p_3</math>, <math>p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 56 - Combinazione IU1_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1</math>, <math>p_2</math>, <math>p_3</math>, <math>p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>144</i>



<i>Figura 57 - Combinazione IU2_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 58 - Combinazione IU2_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 59 - Combinazione IU3_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 60 - Combinazione IU3_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 61 - Combinazione IU4_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 62 - Combinazione IU4_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 63 - Combinazione IU4_2a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 64 - Combinazione IU4_2b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 65 - Combinazione IU5_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 66 - Combinazione IU5_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 67 - Combinazione IU6_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 68 - Combinazione IU6_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>150</i>

<i>Figura 69 - Combinazione IU7_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 70 - Combinazione IU7_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 71 - Combinazione IU8_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 72 - Combinazione IU8_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 73 - Combinazione IU8_2a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 74 - Combinazione IU8_2b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 75 - Combinazione IU9_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 76 - Combinazione IU9_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 77 - Combinazione IU9_2a: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 78 - Combinazione IU9_2b: punti, curva (con i relativi coefficienti <math>p_1, p_2, p_3, p_4</math>) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%.....</i>	<i>155</i>

## INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1 - Elenco dei dati disponibili nel database CEER in cui sono evidenziati i parametri analizzati....</i>	24
<i>Tabella 2 - Confronto fra le categorie edilizie catastali e quelle proposte dal DPR 412/93.....</i>	26
<i>Tabella 3 - Limiti delle classi energetiche in funzione della zona climatica, definiti dal valore di <math>EP_H</math> (<math>kWh/m^3</math> annuo).....</i>	28
<i>Tabella 4 - Superfici lorde [<math>m^2</math>] dei modelli di edifici presentati nella ricerca [16].....</i>	30
<i>Tabella 5 - Volumi lordi [<math>m^3</math>] dei modelli di edifici presentati nella ricerca [16].....</i>	31
<i>Tabella 6 - Archetipi morfologici e loro breve descrizione.....</i>	33
<i>Tabella 7 - Limiti di prestazione energetica delle chiusure secondo DGR VIII/8745 del 2008 [3], espressi in <math>W/m^2K</math>.....</i>	il 41
<i>Tabella 8 - Valori delle resistenze liminari in funzione della direzione del flusso termico, espresse in <math>m^2K/W</math> .....</i>	42
<i>Tabella 9 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura verticale opaca a secco .....</i>	44
<i>Tabella 10 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura verticale opaca tradizionale .....</i>	45
<i>Tabella 11 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura orizzontale di copertura .....</i>	47
<i>Tabella 12 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura orizzontale controterra.....</i>	49
<i>Tabella 13 - Fattori di oscuramento delle schermature, in funzione dell'interasse e della stagione .....</i>	52
<i>Tabella 14 - Definizione delle misure di efficienza energetica e loro descrizione.....</i>	54
<i>Tabella 15 - Parametri delle misure di efficienza energetica e valori base con ipotesi migliorativi.....</i>	54
<i>Tabella 16 - Campioni studiati suddivisi in base all'altezza netta.....</i>	66
<i>Tabella 17 - Rendimenti dei terminali di erogazione in funzione del carico specifico .....</i>	67
<i>Tabella 18 - Rendimenti di regolazione in funzione del sistema di emissione .....</i>	68
<i>Tabella 19 - Rendimento di distribuzione in funzione del numero di piani.....</i>	69
<i>Tabella 20 - Misure di efficienza energetica per i sistemi di generazione, emissione, regolazione e distribuzione .....</i>	73
<i>Tabella 21 - Misure di efficienza energetica legate a ventilazione, fotovoltaico ed acqua calda sanitaria con i rispettivi parametri.....</i>	74
<i>Tabella 22 - Vita utile delle misure di efficienza energetica.....</i>	96
<i>Tabella 23 - Elenco riassuntivo dei costi considerati per le misure di efficienza energetica .....</i>	98
<i>Tabella 24 - Costo per tonnellata di <math>CO_2</math> emessa in funzione dell'anno considerato.....</i>	104
<i>Tabella 25 - Caratteristiche delle combinazioni scelte .....</i>	106
<i>Tabella 26 - Valori in termini energetici ed economici degli ottimi parziali finali ricavati dai percorsi iterativi .....</i>	111
<i>Tabella 27 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU1_1a.....</i>	115
<i>Tabella 28 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU1_1b.....</i>	116

<i>Tabella 29 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU2_1a.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabella 30 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU2_1b.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabella 31 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU3_1a.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabella 32 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU3_1b.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabella 33 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4_1a.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabella 34 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4_1b.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabella 35 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4_2a.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabella 36 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4_2b.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabella 37 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU5_1a.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabella 38 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU5_1b.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabella 39 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU6_1a.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabella 40 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU6_1b.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabella 41 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU7_1a.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabella 42 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU7_1b.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabella 43 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8_1a.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabella 44 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8_1b.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabella 45 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8_2a.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabella 46 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8_2b.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabella 47 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9_1a.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabella 48 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9_1b.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabella 49 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9_2a.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabella 50 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9_2b.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabella 51 - Valori di EP e costo in funzione della tipologia di generazione riferiti alla prima iterazione del percorso 1 dell'archetipo IU1_1a.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabella 52 - Valori di EP e costo per i punti di partenza, gli ottmi globali e l'installazione di uno scambiatore più efficiente, riferiti alle prime tre iterazione del percorso 1 dell'archetipo IU1_1a.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabella 53 - Dati ricavati dalle curve ottimali di prestazione, che definiscono il range di consumo energetico al costo minimo, i valori economici e di performance in corrispondenza di una diminuzione del 10% e del 20% del fabbisogno.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabella 54 - Media del costo globale minimo (media CGM) rispetto al rapporto superficie/volume (S/V [m<sup>1</sup>]).....</i>	<i>159</i>
<i>Tabella 55 - Limiti dei consumi energetici per la zona climatica E in kWh/m<sup>2</sup> annuo, in funzione del rapporto superficie/volume e dei gradi giorno (GG).....</i>	<i>160</i>
<i>Tabella 56 - Confronto tra i limiti di consumo per la climatizzazione invernale espressi in kWh/m<sup>2</sup> annuo di energia primaria, calcolati in funzione del rapporto superficie/volume, con il fabbisogno delle 24 combinazioni studiate.....</i>	<i>160</i>

<i>Tabella 57 - Classificazione energetica in termini di <math>EP_H</math> per la regione Lombardia, espressi in kWh/m<sup>2</sup> annuo</i> .....	162
<i>Tabella 58 - Aumento percentuale del costo globale corrispondente ad una diminuzione del fabbisogno energetico del 10% e del 20%.</i> .....	164
<i>Tabella 59 - Percentuale di incremento del costo con la diminuzione del fabbisogno energetico in funzione della tipologia di chiusure trasparenti</i> .....	165

## SOMMARIO

Questa trattazione si inserisce nell'ambito dello studio del comportamento energetico del patrimonio edilizio della Regione Lombardia, con particolare attenzione rivolta agli edifici ad uso ufficio. L'obiettivo è la definizione dei limiti di prestazione energetica sulla base della metodologia cost optimality, proposta dalla Direttiva Comunitaria 2012/31 (EPBD recast) dell'Unione Europea.

Il metodo utilizzato consiste nel ricavare una serie di valori combinati di prestazione energetica (fabbisogno di energia primaria in termini di kWh/m<sup>2</sup> annuo) ed economica (costo globale espresso come €/m<sup>2</sup>) nei casi oggetto di studio e nel definire opportunamente una condizione di ottimo globale ed i limiti, studiando i grafici ottenuti.

Il lavoro si basa su una prima fase di ricerca, al fine di stabilire quali siano i modelli di partenza su cui applicare la metodologia. Vengono utilizzate come fonti una ricerca sui modelli dimensionali e tecnologici dei fabbricati per la categoria considerata ed i dati ricavati dall'analisi del Catasto Energetico della Regione Lombardia. Si prosegue definendo le misure di efficienza energetica applicate agli edifici, ovvero le scelte tecniche e progettuali che influiscono sul fabbisogno in termini di energia primaria. Vengono considerate le tecnologie utilizzate nell'involucro ed il sistema impiantistico, si descrivono le loro caratteristiche, i parametri connotanti ed il modo in cui se ne calcolano le prestazioni.

Con questa parte è stato studiato l'indicatore di energia primaria, il lavoro prosegue con la definizione dei parametri economici in termini di €/m<sup>2</sup>. La cost optimality viene considerata calcolando il valore attuale netto (VAN) che definisce il costo globale delle misure energetiche. Le configurazioni del sistema edificio-impianto più vantaggiose saranno quelle che presentano il VAN minore.

Seguendo quindi gli indicatori economici ed energetici delle varie configurazioni del sistema edificio-impianto simulate, si ricava una serie di valori combinati. Questi, opportunamente analizzati, consentono di individuare la condizione di ottimo e fare delle assunzioni riguardo ai limiti di prestazione energetica per la categoria in esame.

## ABSTRACT

This work discusses the study of the energy behavior of the architectural heritage in the Regione Lombardia, with particular attention for office buildings. The aim is to define the limits of performance on the basis of the cost optimality methodology. This proceeding is proposed by the EU Directive 2012/31 (EPBD recast) of the European Union.

The methodology applied is to derive a set of combined values of energy performance (primary energy need in terms of kWh/m<sup>2</sup> per year) and cost (total cost expressed as €/m<sup>2</sup>) for the cases evaluated. With these values is it possible to define the global optimum conditions and, studying the graph obtained, the limits.

The work is based on a first phase of research, in order to determine the starting models on which apply the methodology. A research on dimensional and technological models for the chosen category and the data obtained from the analysis of the Catasto Energetico of Regione Lombardia have been used as data sources. The following step is to define the energy efficiency measures applied to buildings. These are all the technical and design choices that affect the requirement in terms of primary energy. Considering the technologies used in the casing and the plant system, describes their characteristics, connoting the parameters and the way in which they bring benefits.

This part describes the indicator of primary energy, the work continues with the definition of the economic parameter in terms of €/m<sup>2</sup>. The cost optimality is considered by calculating the net present value (NPV), which defines the overall cost of energy measures. The more advantageous configurations of the building-plant system will be those that have the lower NPV.

Thus following the economic and energetic indicators of the various configurations of the building-plant system configurations simulated, you can get a series of combined values. These values, properly analyzed, allow to detect the optimal condition and to make assumptions about the limits of energy performance for the examined category.

# INTRODUZIONE

Lo scopo di questa lavoro è la rivalutazione dei limiti sul fabbisogno di energia primaria per edifici ad uso ufficio, utilizzando la metodologia cost optimality.

Il problema considerato è l'applicazione del procedimento sopracitato allo studio delle prestazioni energetiche, in modo da costruire delle curve che mettano in relazione il costo globale in €/m<sup>2</sup> ed il fabbisogno di energia in kWh/m<sup>2</sup> annuo.

Quest'ambito di ricerca è tuttora un "work in progress" essendo legato al recepimento da parte dell'Italia di una normativa europea di recente pubblicazione, la Direttiva Comunitaria 2012/31 EPBD recast [1].

Il riferimento legislativo italiano per questi studi è la relazione del Ministero dello Sviluppo Economico "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica" [2].

Il campo di studio è ristretto alla regione lombardia e per questo si fa riferimento ai DGR VIII/8745 del 2008 [3] e DGR VIII/5796 del 2009 [4] per la definizione dei requisiti di base degli elementi d'involucro e di impianto, e per la procedura di calcolo del fabbisogno di energia primaria.

Vengono studiati differenti modelli di edificio, in modo da poterne confrontare le prestazioni ed arrivare a delle conclusioni fondate su una valida base di partenza.

Dopo una breve sintesi sulla situazione del contesto storico ed attuale del panorama normativo (capitolo 1) viene descritta la procedura di calcolo basata sui principi della cost optimality. In particolare, per la sua applicazione, si evidenzia la necessità di costruire sistemi di edificio-impianto virtuali (archetipi), che fungano da riferimento per i calcoli successivamente svolti.



Tali archetipi sono di tre tipologie: morfologici, tecnologici ed impiantistici.

I primi (capitolo 2) vengono identificati confrontando una ricerca modelli dimensionali e tecnologici dei fabbricati [16] ed il Catasto Energetico della Regione Lombardia (CEER) [17], arrivando a riassumerne le caratteristiche connotanti.

Gli archetipi tecnologici (capitolo 3) sono ideati partendo dai limiti di prestazione richiesti dalla normativa regionale e basandosi sulle stratigrafie e soluzioni tecniche proposte nella ricerca [16] sopracitata; per ognuno si stabilisce l'elemento che ne caratterizza la prestazione energetica e le relative possibili migliorie.

Per la definizione degli impianti (capitolo 4) studiando i dati del CEER [17] vengono desunti i sistemi di generazione ed emissione, mentre gli altri componenti nascono da opportune scelte progettuali. Il parametro che ne caratterizza il funzionamento è il rendimento, per il quale si fissano i valori base e gli eventuali incrementi.

Viene descritta la modellazione (capitolo 5) dei sistemi finora esposti, la quale si divide in due parti: la prima dedicata al calcolo del fabbisogno energetico, mentre la seconda alle metodologie di calcolo dei rendimenti. Lo strumento utilizzato è Trnsys, tramite il quale è possibile simulare il comportamento dell'involucro, degli impianti ed il loro funzionamento combinato.

Concluse le sezioni dedicate agli archetipi ed alla loro modellazione, si passa (capitolo 6) allo studio economico. All'interno della metodologia cost optimality per il calcolo del costo globale si utilizza il Valore Attuale Netto (VAN). Questo procedimento si basa sull'attualizzazione di flussi di cassa distanti nel tempo, che in altro modo non sarebbero confrontabili.

Stabiliti i criteri e le metodologie per il calcolo costo globale e del fabbisogno di energia con un processo iterativo si arriva alla definizione dell'ottimo globale (capitolo 7). Questo procedimento prevede di valutare una serie di combinazioni ottenute variando i parametri degli archetipi tecnologici e d'impianto, scegliendo quella che presenta il minor costo globale, la quale sarà il punto di partenza della successiva iterazione. In questo modo si ricavano gli ottimi globali, definiti dal costo globale minimo. Studiando i valori dei punti ricavati in questo processo sono costruite delle curve di involuppo e definiti gli intervalli ottimali di prestazione energetica, sulla base dei quali si andranno a studiare i limiti vigenti.

# CAPITOLO 1

## COST OPTIMALITY

Una delle sfide più complesse che la comunità internazionale si trova ad affrontare è quella di riuscire a contrastare i cambiamenti climatici. Questo si concretizza nel testo di riferimento della Convenzione quadro delle Nazioni Unite (UNFCCC) [5] adottata a Rio De Janeiro durante il primo Earth Summit, nella quale si è sancito che: “l’obiettivo ultimo è la stabilizzazione della concentrazione in atmosfera dei gas serra ad un livello che prevenga una dannosa interferenza antropogenica con il sistema climatico“. I paesi aderenti, tra cui l’Italia, si sono incontrati negli anni successivi al fine di stabilire le modalità di attuazione dell’UNFCCC finchè, con il Protocollo di Kyoto [6] del dicembre 1997, sono stati fissati alcuni principi per rendere effettivo l’impegno contro i cambiamenti climatici. Uno dei punti cardine stabiliti è la riduzione delle emissioni dei gas effetto serra.

### 1.1 Contesto storico

A livello europeo il protocollo di Kyoto [6] è stato recepito con la Direttiva Comunitaria 2002/91 “Energy Performance of Buildings Directive“ (EPBD) [7]. Questa norma contiene le disposizioni riguardanti il quadro generale di una metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici e l’applicazione di requisiti minimi di prestazione dei fabbricati di nuova costruzione.

Nel contesto italiano la prima legge sul risparmio energetico è stata la 373/76 [8], emanata a seguito della crisi degli anni ’70, ma la pietra miliare di questo settore legislativo è la legge 10/91 [9]. Viene di fatto introdotta una nuova procedura per la verifica dei consumi degli edifici e compiuto un primo passo verso la certificazione energetica. In questa situazione normativa nazionale la Direttiva Comunitaria 2002/91 [7] è stata recepita con il Decreto Legislativo 192/2005 [10], che modifica la legge 10/91 [9]. Si stabiliscono

infatti i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare la prestazione energetica degli edifici e vengono definite le metodologie di calcolo ed i requisiti minimi per il contenimento dei consumi energetici. All'articolo n. 17 del Decreto Legislativo 192/2005 [10] si afferma che la normativa italiana è da applicarsi solo alle regioni ed alle province autonome che non hanno ancora provveduto al recepimento della Direttiva Comunitaria 2002/91 [7].

La regione Lombardia con la LR 24/2006 [11], recepisce le direttive europee e le indicazioni della normativa nazionale in materia di efficienza energetica. Alla Giunta Regionale è attribuito il potere di dettare norme per ridurre il consumo degli edifici esistenti, da ristrutturare e di nuova costruzione, stabilendo i requisiti di prestazione energetica dell'involucro edilizio, degli impianti termici e dei generatori di calore. Questa legge viene integrata con i successivi Decreti di Giunta Regionale, il DGR VIII/5018 del 2007 [12], il DGR VIII/5773 del 2007 [13], il DGR VIII/8745 del 2008 [3] ed il DGR VIII/5796 del 2009 [4]. In particolare nel DGR VIII/8745 del 2008 [3] vengono definiti i requisiti di prestazione sopracitati ed i limiti di consumo di energia primaria per la classificazione degli edifici, mentre il DGR VIII/5796 del 2009 [4] stabilisce la procedura di calcolo utilizzata.

## 1.2 La nuova direttiva

La Direttiva Comunitaria 2002/91 EPDB [7] è stata riformulata dalla Direttiva Comunitaria 2012/31 EPBD recast [1], la quale introduce alcune novità, tra cui la definizione di “edifici ad energia quasi zero”. Con questo termine si intendono quei fabbricati il cui fabbisogno energetico, molto basso o quasi nullo, dovrebbe essere coperto in misura significativa da fonti rinnovabili. L'articolo n. 9 in particolare prevede che gli stati membri emanino una normativa atta a far sì che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano ad energia quasi zero, richiedendo che questi requisiti siano raggiunti in un'ottica di livelli ottimali di costo.

Con il Regolamento Delegato 244/2012 [14] e le successive Linee Guida [15] che accompagnano il regolamento viene definito il quadro metodologico per la determinazione

dei requisiti energetici ottimali degli edifici, dal punto di vista sia tecnico che economico. Detto quadro costituisce la base per le elaborazioni a cura dei paesi membri.

L'Italia ha recepito il Regolamento Delegato 244/2012 [14] e le successive Linee Guida [15] con la relazione del Ministero dello Sviluppo Economico "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica" [2] sviluppando l'applicazione italiana del quadro metodologico proposto dalla comunità europea.

### 1.3 Descrizione della procedura

Viene descritta la procedura proposta dall'applicazione italiana delle Linee Guida [15] la quale ha come punto di riferimento la relazione del Ministero dello Sviluppo Economico "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica" [2].

L'obiettivo è quello di arrivare a costruire delle curve che siano in grado di definire le prestazioni ottimali energetiche ed economiche. Queste curve si realizzano sulla base di due indicatori, costo globale ( $\text{€}/\text{m}^2$ ) ed il fabbisogno di energia primaria ( $\text{kWh}/\text{m}^2$  annuo).

Con il termine primaria si intende una fonte presente in natura e quindi non derivante da trasformazioni. Rientrano in questa classificazione sia le fonti rinnovabili (solare) che quelle esauribili, come i combustibili direttamente utilizzabili (gas naturale). Si differenziano dalle secondarie in quanto queste ultime possono essere utilizzate soltanto a valle di una trasformazione (energia elettrica).

La procedura prevede come punto di partenza la creazione dei modelli di edifici da studiare (archetipi morfologici). Per archetipo si intende un modello che riassume le principali caratteristiche di un insieme di elementi, mentre la parola morfologico si riferisce ai parametri scelti per descrivere i modelli. Su questi modelli vengono studiate le caratteristiche dell'involucro (archetipi tecnologici), scegliendo quindi le stratigrafie utilizzate per le chiusure, i serramenti, le schermature solari e le partizioni interne, ovvero

tutti quegli elementi del fabbricato che incidono sul fabbisogno energetico che il sistema impiantistico dovrà soddisfare. In particolare, saranno evidenziate le caratteristiche che influiscono direttamente sulla prestazione energetica, come ad esempio lo spessore dello strato di isolante termico.

Viene poi definito il sistema impiantistico (archetipi impiantistici) in termini di climatizzazione invernale ed estiva, di produzione dell'acqua calda sanitaria, del sistema di ventilazione e tutti i sottosistemi che definiscono il comportamento dell'impianto nella sua globalità. Si studiano poi i parametri fondamentali di questi sistemi, come ad esempio il rendimento del sistema di generazione.

Quanto descritto finora rientra nella definizione del livello di prestazione energetica dell'edificio in termini di kWh/m<sup>2</sup> annuo, il passo successivo è il calcolo del corrispondente costo globale espresso in €/m<sup>2</sup>.

Il costo globale viene calcolato con la metodologia del Valore Attuale Netto (VAN). Si tratta di una tecnica per la valutazione finanziaria dei progetti a medio/lungo termine, tramite cui si definisce il valore attuale di una serie attesa di flussi di cassa, non solo sommandoli contabilmente, ma attualizzandoli sulla base del tasso di attualizzazione. Confrontando il VAN di due o più investimenti alternativi si riesce a valutare l'opzione più vantaggiosa attraverso il meccanismo dell'attualizzazione dei costi, che prevede di ricondurre al medesimo orizzonte temporale i flussi di cassa che si manifesterebbero in momenti diversi e non sarebbero direttamente confrontabili.

I costi considerati sono quelli legati ai sistemi che influenzano direttamente la prestazione energetica del sistema edificio-impianto, non ci si riferisce al costo totale di costruzione del fabbricato. Ad esempio, nel caso delle chiusure d'involucro, sarà considerato soltanto il costo per l'isolante termico e non tutte le altre voci, mentre sarà tenuta in conto la totalità dell'esborso economico legato agli impianti, ai costi energetici e di manutenzione. In questo modo si definisce il costo globale in termini di €/m<sup>2</sup> per la corrispettiva prestazione energetica espressa in kWh/m<sup>2</sup> annuo.

Una volta definita la procedura di calcolo per entrambi gli indicatori si procede, mediante un calcolo iterativo, alla definizione del pacchetto di interventi che garantisce per un dato archetipo morfologico il livello ottimale di costo. Alla fine delle iterazioni saranno state ricavate diverse combinazioni di costo globale e prestazione energetica, ognuna delle quali viene riportata su di un grafico a dispersione avente sulle ascisse valori espressi in kWh/m<sup>2</sup> annuo e sulle ordinate €/m<sup>2</sup>. Utilizzando questi punti è possibile costruire le curve di involuppo per individuare i livelli ottimali di prestazioni energetiche e di costo.

Nel capitolo seguente si espone il primo passo della procedura, ovvero la definizione degli archetipi morfologici.

## **CAPITOLO 2**

### **ARCHETIPI MORFOLOGICI**

In accordo con la relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica“ [2] occorre definire degli edifici di riferimento che siano rappresentativi del parco immobiliare oggetto di studio.

Vengono proposte due strade per la definizione di questi modelli: la prima è che siano reali (esempi di edifici più diffusi all'interno di una data categoria) mentre la seconda prevede di creare dei fabbricati virtuali (archetipi), vale a dire rappresentativi di una data categoria ma non comunque realmente esistenti. La possibilità di studiare i dati di un alto numero di fabbricati porta alla scelta del secondo metodo.

Questi modelli sono detti archetipi morfologici (per la cui definizione si rimanda al capitolo 1) e la classe di edifici rappresentati è quella ad uso ufficio.

#### **2.1 Fonti utilizzate**

Le informazioni utilizzate nella creazione degli archetipi sono state ricavate dall'analisi di una ricerca sugli edifici ad uso ufficio prodotta dal Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16] e dal Catasto Energetico Edifici Regionale per la regione Lombardia (CEER) [17].

La ricerca [16] sopra citata è uno studio sulle caratteristiche di edifici del terziario ad uso ufficio, alberghiero o commerciale. In questa prima fonte vengono presentate delle famiglie di edifici relativi alla categoria considerata, con riferimento al patrimonio edilizio esistente nella regione Lombardia. Le caratteristiche dimensionali di queste famiglie sono state utilizzate nella definizione degli archetipi.



La seconda fonte, il CEER [17], è un servizio che consente l'archiviazione e la consultazione informatizzata degli Attestati di Prestazione Energetica (APE) redatti dai soggetti certificatori nella Regione Lombardia, mediante il portale OpenData. Gli APE, definiti dal DGR VIII/8745 del 2008 [3], riportano il comportamento energetico ed alcuni parametri del sistema edificio-impianto. Sono state considerati quelli relativi ad edifici di nuova costruzione nella regione Lombardia dal 2007. I dati del database CEER [17] sono di libero accesso sull'apposita sezione del sito di Finlombarda dedicato alla certificazione energetica; alla tabella 1 si riporta l'elenco delle voci disponibili.

*Tabella 1 - Elenco dei dati disponibili nel database CEER in cui sono evidenziati i parametri analizzati*

Codice identificativo	ETC
Provincia	EFER
Comune	EMISSIONI DI CO2
Edificio pubblico	EPW
<b>Destinazione d'uso</b>	EPT
Anno di costruzione	Efficienza globale media riscaldamento
<b>Motivazione ACE</b>	Efficienza globale media acqua calda sanitaria
<b>Superficie lorda</b>	EGHW
<b>Superficie netta</b>	Tipologia ventilazione
<b>Volume lordo</b>	Numero di ricambi orari
<b>Volume netto</b>	Tipologia pannello ST
Superficie disperdente	Tipologia pannello FV
<b>Superficie vetrata opaca</b>	Superficie captante FV
Trasmittanza media involucro	Superficie apertura ST
Trasmittanza media copertura	Superficie pannello FV superficie utile
Trasmittanza media basamento	Superficie pannello ST superficie utile
Trasmittanza media serramento	<b>Tipologia combustibile</b>
<b>Classe energetica</b>	<b>Tipologia di generatore</b>
<b>EPH</b>	<b>Potenza del generatore</b>
ETH	

Di seguito si elencano le codifiche della tabella 1:

- 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;

- EFER, contributo energetico degli impianti a fonti energetiche rinnovabili (solare termico e solare fotovoltaico);
- EPW, fabbisogno annuo di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria dell'edificio;
- EPT, fabbisogno annuo di energia primaria totale dell'edificio;
- EGHW, efficienza globale media annuale dell'impianto termico per il servizio di riscaldamento o climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria.

Le informazioni disponibili riguardano innanzitutto le caratteristiche generali dell'edificio (ubicazione, anno di costruzione), dimensionali (superfici, volumi), costruttive (trasmittanza), energetiche (indicatori di prestazione, energie rinnovabili, generazione). I parametri evidenziati rappresentano quelli considerati nella definizione degli archetipi morfologici e degli elementi impiantistici.

## 2.2 Criteri di analisi

Il metodo di analisi usato è stato quello di confrontare le caratteristiche delle famiglie riportate nella prima fonte [16] con i dati estrapolati dal CEER [17]. Le informazioni sulle classi riportate nella prima fonte fanno riferimento al patrimonio edilizio di recente costruzione, le cui caratteristiche sono state confrontate con quelle estrapolate dal CEER [17].

La classificazione edilizia degli edifici ad uso ufficio è distinta dalle seguenti categorie definite dal catasto [18]:

- A/10: Uffici e/o studi privati;
- B/4: Uffici pubblici;
- D5: Istituti di credito, cambio ed assicurazione.

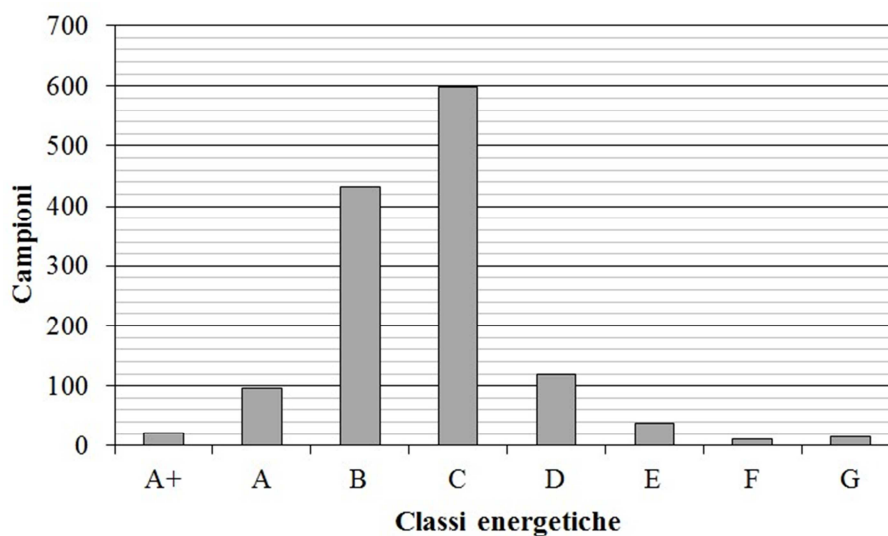
Queste tre categorie all'interno del database CEER sono classificate sulla base del D.P.R. 412/93 [19] come classe E/2. Nella tabella 2 si può vedere il confronto tra le categorie catastali e la classificazione del D.P.R. 412/39 [19].

**Tabella 2 - Confronto fra le categorie edilizie catastali e quelle proposte dal DPR 412/93**

<b>Catasto</b>	<b>DPR 412/93</b>
A/1 Abitazione di tipo signorile	E.1 (1) o E.1 (2)
A/2 Abitazione di tipo civile	E.1 (1) o E.1 (2)
A/3 Abitazione di tipo economico	E.1 (1) o E.1 (2)
A/4 Abitazione di tipo popolare	E.1 (1) o E.1 (2)
A/5 Abitazione di tipo ultrapopolare	E.1 (1) o E.1 (2)
A/6 Abitazione di tipo rurale	E.1 (1) o E.1 (2)
A/7 Abitazione in villini	E.1 (1) o E.1 (2)
A/8 Abitazione in ville	E.1 (1) o E.1 (2)
A/9 Castelli, palazzi di pregio artistico o storico	E.1 (1) o E.1 (2)
<b>A/10 Uffici e/o studi privati</b>	<b>E.2</b>
A/11 Abitazioni o alloggi tipici dei luoghi ( es. rifugi, baite, trulli, ecc. )	E.1 (1) o E.1 (2)
B/1 Collegi, convitti, educandati, ricoveri, orfanotrofi, ospizi, seminari, caserme, conventi	E.1 (1)
B/2 Case di cura e ospedali	E.3
B/3 Riformatori e prigioni	E.1 (1)
<b>B/4 Uffici pubblici</b>	<b>E.2</b>
B/5 Scuole e/o laboratori scientifici	E.7
B/6 Pinacoteche, biblioteche, musei, gallerie d'arte, accademie che non hanno sede nella categoria A/9	E.4 (2)
B/7 Cappelle ed oratori non destinati all'esercizio pubblico del culto	E.4 (2)
B/8 Magazzini sotterranei per depositi di derrate	E.8
C/1 Negozi e botteghe	E.5 o E.4.3
C/2 Magazzini e locali di deposito	E.8
C/3 Laboratori e locali di deposito	E.8
C/4 Fabbricati per arti e mestieri	E.8
C/6 Stalle, scuderie, rimesse ed autorimesse	E.8
D/1 Opifici	E.8
D/2 Alberghi e pensioni	E.1 (3)
D/3 Teatri, cinema, sale per concerti / spettacoli e simili	E.4 (1)
D/4 Case di cura e ospedali	E.3
<b>D/5 Istituti di credito, cambio ed assicurazione</b>	<b>E.2</b>
D/6 Fabbricati e locali per attività sportive	E.6 (1) - E.6 (2) - E.6 (3)
D/7 Fabbricati costruiti o comunque adattati per le speciali esigenze legate ad una attività industriale e non suscettibili di diversa utilizzazione se non con radicali trasformazioni	E.8
D/8 Fabbricati costruiti o comunque adattati per le speciali esigenze legate ad una attività commerciale e non suscettibili di diversa utilizzazione se non con radicali trasformazioni	E.5
D/10 Residence	E.1 (3)
D/11 Scuole e/o laboratori scientifici privati	E.7

Una volta scelta la corretta categoria catastale sono stati estratti i parametri relativi agli interventi edilizi di nuova costruzione. Questi dati riportano le informazioni sugli edifici la cui denuncia di inizio attività o domanda finalizzata all'ottenimento del permesso di costruire è stata presentata a partire dal 1° settembre 2007. Questa data rappresenta l'entrata in vigore dell'obbligo di certificazione energetica per gli edifici di nuova costruzione secondo il DGR VIII/8745 del 2008 [3].

In questo modo è stato estratto un campione di 1,331 edifici sui quali valutare i dati principali, a cominciare dalla distribuzione delle classi energetiche, descritte in figura 1.



*Figura 1 - Distribuzione del campione di edifici studiato in base alla classificazione energetica*

Sono riportate le classi energetiche degli edifici, definite come gli intervalli convenzionali delimitati da soglie di riferimento, volti a rappresentare sinteticamente la prestazione energetica di un edificio sulla base di predefiniti indicatori. L'indicatore considerato è  $EP_H$ , ossia il consumo annuale di energia primaria per la climatizzazione invernale del sistema edificio-impianto in rapporto al volume lordo riscaldato ( $kWh/m^3$ annuo). Si distinguono partendo dalla classe peggiore (ovvero la G) fino ad arrivare all'eccellenza delle classi A ed A+, i cui limiti sono definiti nella tabella 3.

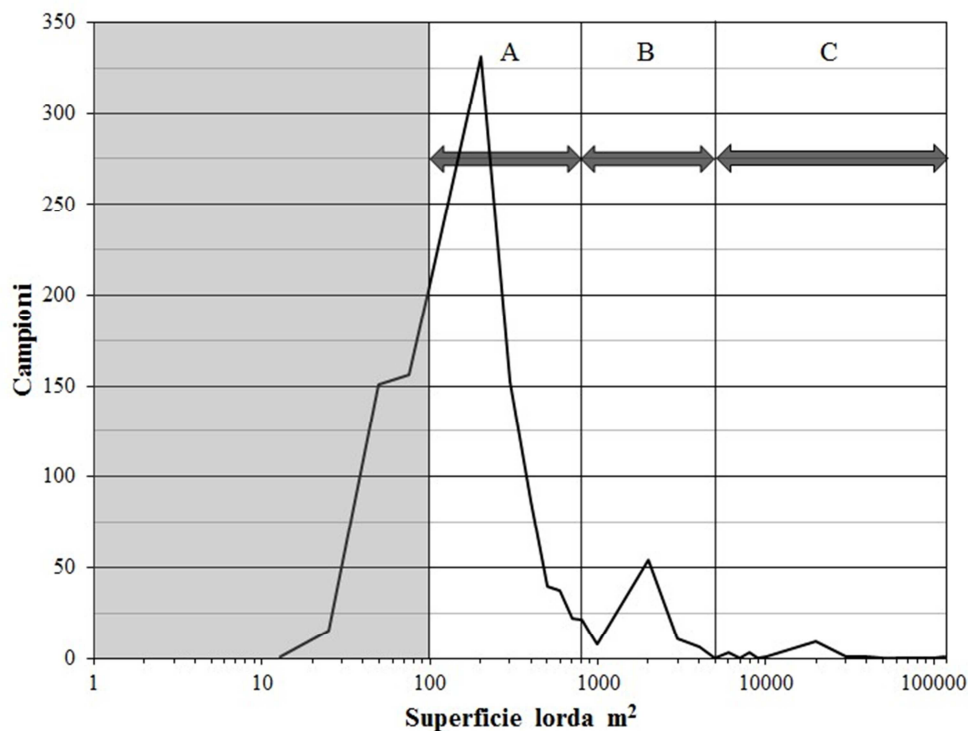
**Tabella 3 - Limiti delle classi energetiche in funzione della zona climatica, definiti dal valore di  $EP_H$  ( $kWh/m^3$  annuo)**

<b>Classe</b>	<b>Zona E</b>	<b>Zona F1</b>	<b>Zona F2</b>
A+	$EP_H < 3$	$EP_H < 4$	$EP_H < 5$
A	$3 \leq EP_H < 6$	$4 \leq EP_H < 7$	$5 \leq EP_H < 9$
B	$6 \leq EP_H < 11$	$7 \leq EP_H < 15$	$9 \leq EP_H < 19$
C	$11 \leq EP_H < 27$	$15 \leq EP_H < 37$	$19 \leq EP_H < 46$
D	$27 \leq EP_H < 43$	$37 \leq EP_H < 58$	$46 \leq EP_H < 74$
E	$43 \leq EP_H < 54$	$58 \leq EP_H < 73$	$74 \leq EP_H < 92$
F	$54 \leq EP_H < 65$	$73 \leq EP_H < 87$	$92 \leq EP_H < 110$
G	$EP_H \geq 65$	$EP_H \geq 87$	$EP_H \geq 110$

Questi limiti di prestazione energetica sono definiti all'interno del DGR VIII/8745 del 2008 [3], dove le zone E, F1 ed F2 rappresentano la suddivisione climatica del territorio della regione in funzione dei gradi giorno, si sceglie di considerare la E in quanto rappresenta la maggior parte del territorio lombardo.

Nella figura 1 si può notare come siano preponderanti le classi B e C rispetto alle altre e che soltanto una parte minima, neanche il 25% del totale, si trova in classe A o A+. Il patrimonio regionale degli edifici ad uso ufficio di nuova costruzione non tende all'eccellenza, ma si trova ad un livello intermedio tra le classi migliori e le peggiori per quanto riguarda i consumi energetici riferiti alla climatizzazione invernale.

Una volta inquadrato il comportamento energetico, si confrontano le caratteristiche dimensionali dei modelli di edificio proposti dalla ricerca del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16] con i dati estrapolati dal CEER [17]. Questa comparazione viene fatto prendendo in considerazione la superficie ed i volumi lordi degli edifici, dei quali viene studiata la distribuzione, come riportato nelle figure 2 e 3.



*Figura 2 - Distribuzione in frequenza del campione di edifici studiato in base alla superficie lorda*

In figura 2 si riporta la distribuzione in frequenza del range di 1,331 edifici analizzato: sull'asse delle ascisse troviamo la superficie lorda in m<sup>2</sup> mentre sulle ordinate il numero di campioni corrispondenti.

Si sceglie di non considerare le aree sotto i 100 m<sup>2</sup>, in quanto fuorvianti. La procedura della certificazione energetica prevede infatti che se in uno stesso fabbricato vi siano unità immobiliari con differenti destinazioni d'uso, esse abbiano APE differenti. Quindi i campioni aventi una piccola superficie potrebbe rappresentare edifici solo in parte adibiti ad ufficio e per questo motivo non sono considerati. In questo modo vengono analizzati solo gli elementi che hanno alte probabilità di rappresentare fabbricati interamente adibiti alla categoria trattata.

Esclusa questa porzione di dati si può vedere come la distribuzione in frequenza sia suddivisa in tre zone, definite dai punti in cui si ha un picco di campioni; questi range possono essere distinti come elencato di seguito.

- A, tra i 100 e gli 800 m<sup>2</sup>;
- B, tra gli 800 ed i 6,000 m<sup>2</sup>;
- C, tra i 6,000 ed i 120,000 m<sup>2</sup>.

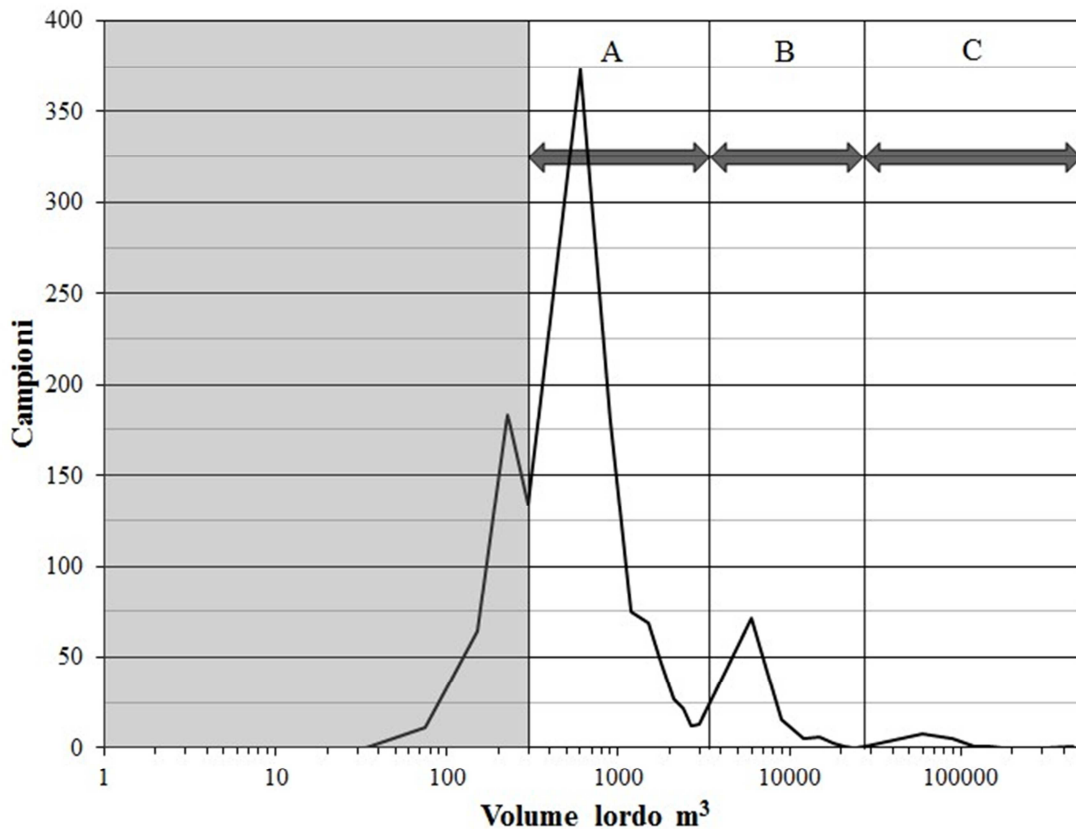
Gli archetipi di edifici della ricerca del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16] presentano delle superfici lorde che si trovano all'interno di questi range, come riportato nella tabella 4.

**Tabella 4 - Superfici lorde [m<sup>2</sup>] dei modelli di edifici presentati nella ricerca [16]**

<b>Tipologia morfologica</b>	<b>Superficie lorde</b>
edifici a forma di parallelepipedo di piccola taglia	528 m <sup>2</sup>
edifici a forma di parallelepipedo di media taglia	2,700 m <sup>2</sup>
edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia	9,720 m <sup>2</sup>
edifici a torre	16,456 m <sup>2</sup>

Si può vedere come il range A è rappresentato dagli edifici a forma di parallelepipedo di piccola taglia, con un valore della superficie lorde che si attesta nell'intorno del picco di frequenza. Discorso analogo può essere fatto per l'ambito B e gli edifici di media taglia, mentre le ultime due tipologie morfologiche riportate rappresentano il range C.

Completata l'analisi delle superfici lorde, uno studio affine viene sviluppato per la distribuzione di frequenza dei volumi lordi, riportata alla figura 3.



*Figura 3 - Distribuzione in frequenza dei campioni studiati in base al volume lordo*

Anche in questo caso si possono identificare tre range in base ai picchi di distribuzione, escludendo gli edifici al di sotto dei 300 m<sup>3</sup> per i motivi citati in precedenza.

- A, tra i 300 ed i 2,400 m<sup>3</sup>;
- B, tra i 2,400 ed i 18,000 m<sup>3</sup>;
- C, tra i 18,000 ed i 450,000 m<sup>3</sup>.

Anche per i volumi lordi è valido quanto stabilito per le superfici, ovvero gli archetipi definiti nella ricerca del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16] si trovano nell'intorno dei picchi di frequenza, come si può vedere dalla tabella 5.

*Tabella 5 - Volumi lordi [m<sup>3</sup>] dei modelli di edifici presentati nella ricerca [16]*

Tipologia morfologica	Volume lordo
edifici a forma di parallelepipedo di piccola taglia	1,698.60 m <sup>3</sup>
edifici a forma di parallelepipedo di media taglia	8,640.00 m <sup>3</sup>
edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia	31,104.00 m <sup>3</sup>
edifici a torre	52,659.00 m <sup>3</sup>



## 2.3 Definizione degli archetipi morfologici

Gli studi descritti in questo capitolo ci hanno portato a definire le seguente tipologie edilizie:

- edifici a torre;
- edifici a forma di parallelepipedo di piccola taglia;
- edifici a forma di parallelepipedo di media taglia;
- edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia.

Trattandosi di edifici virtuali si è scelto di adottare forme a pianta rettangolare. Si ipotizza inoltre che le tipologie sopracitate abbiano le 4 facciate verticali orientate secondo i punti cardinali principali (Nord, Sud, Est, Ovest) e che non presentino aggetti o rientranze. La chiusura di copertura è sempre considerata come piana.

Definite le caratteristiche dimensionali principali degli archetipi (altezza, larghezza e lunghezza) viene stabilita la conformazione delle strutture trasparenti rispetto a quelle opache, secondo tre tipologie:

- a blocchi, la disposizione più classica “a finestra” in cui gli elementi vetrati rappresentano la parte minima dell’involucro;
- a fasce, dove i serramenti si articolano orizzontalmente lungo tutta la facciata;
- tutto vetro, in cui l’intera chiusura verticale è formata da elementi trasparenti.

Questi componenti si presuppongono distribuiti proporzionalmente alla superficie delle facciate verticali, in assenza di lucernari sulle coperture degli edifici. Le superfici vetrate sono state progettate seguendo la ricerca del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16], i dati del CEER [17] non riportano informazioni utili sulla loro distribuzione rispetto alle chiusure opache.

Per quanto riguarda le partizioni interne all’edificio sono state fatte delle ipotesi per calcolare le superfici dei solai e dei vani scale, che con la loro massa significativa hanno impatti notevoli sul bilancio energetico del sistema. Per quanto riguarda i rimanenti elementi non sono stati considerati in quanto non presentano effetti rilevanti sull’inerzia

termica dell'edificio, trattandosi prevalentemente di strutture a secco e quindi poco capacitive.

A completamento della definizione morfologica degli archetipi si prevede l'assenza di locali interrati, ovvero che il fabbricato si sviluppi completamente fuori terra.

Lo studio ci porta a definire 9 modelli, le cui caratteristiche principali sono riassunte nella tabella 6.

*Tabella 6 - Archetipi morfologici e loro breve descrizione*

<b>Cod. Archetipo</b>	<b>Descrizione</b>
IU1	Edifici a torre con chiusura verticale vetrata a blocchi
IU2	Edifici a torre con chiusura verticale vetrata a nastro
IU3	Edifici a torre con chiusura verticale tutto vetro
IU4	Edifici a forma di parallelepipedo di piccola taglia chiusura verticale vetrata a blocchi
IU5	Edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia chiusura verticale vetrata a blocchi
IU6	Edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia chiusura verticale vetrata a nastro
IU7	Edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia chiusura verticale tutto vetro
IU8	Edifici a forma di parallelepipedo di media taglia chiusura verticale vetrata a blocchi
IU9	Edifici a forma di parallelepipedo di media taglia chiusura verticale vetrata a nastro

Gli accoppiamenti tra le dimensioni principali degli edifici e le tipologie di chiusure verticali vetrate sono state definite sulla base di quanto riportato nella ricerca del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16].

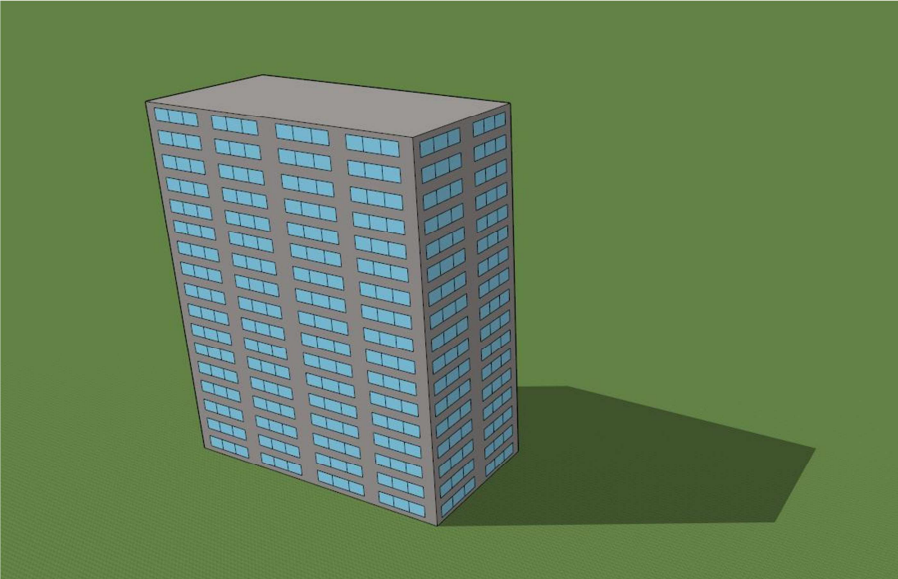
Nelle seguenti schede si riporta la rappresentazione schematica degli archetipi morfologici ed i parametri dimensionali che li definiscono, di seguito elencati.

- larghezza (LA);
- profondità (PR);
- volume lordo (VL);
- volume netto (VN);
- numero di piani (NP);
- altezza (AL);
- superficie lorda (SL);
- superficie in pianta (SP);
- superficie dell'involucro (SI);
- superficie netta (SN);
- rapporto S/V (S/V);
- superfici verticali (SV);
- superfici opache verticali (SOV);
- superfici vetrate verticali (SVV);
- rapporto superficie vetrate / superficie totale (RVT).

---

**IU1 - edifici a torre con chiusura verticale vetrata a blocchi**

---

Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	44.00	
PR [m]	22.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	52,659.20	
VN [m <sup>3</sup> ]	42,127.00	
NP [-]	17.00	
AL [m]	54.40	
SL [m <sup>2</sup> ]	16,456.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	968.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	9,116.80	
SN [m <sup>2</sup> ]	15,962.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.17	
SV [m <sup>2</sup> ]	7,180.80	
SOV [m <sup>2</sup> ]	5,098.37	
SVV [m <sup>2</sup> ]	2,082.43	
RVT [-]	0.23	

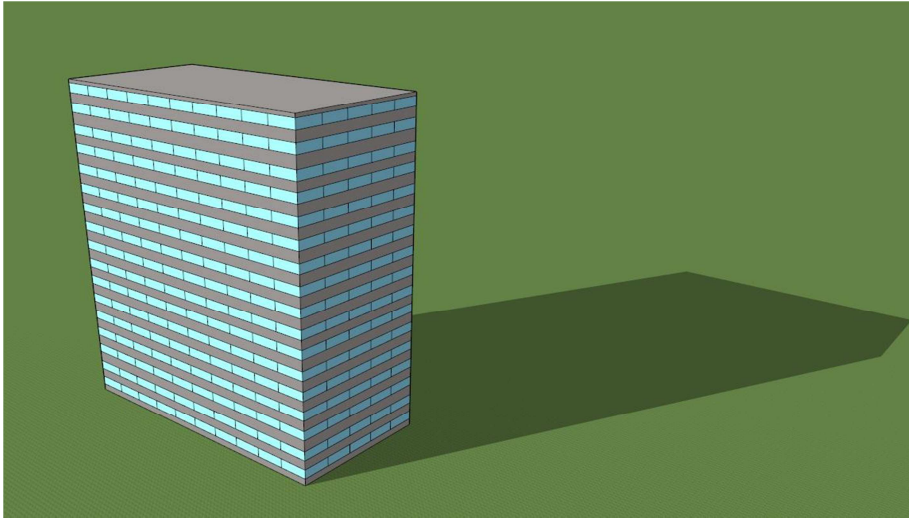
---



---

**IU2 - edifici a torre con chiusura verticale vetrata a nastro**

---

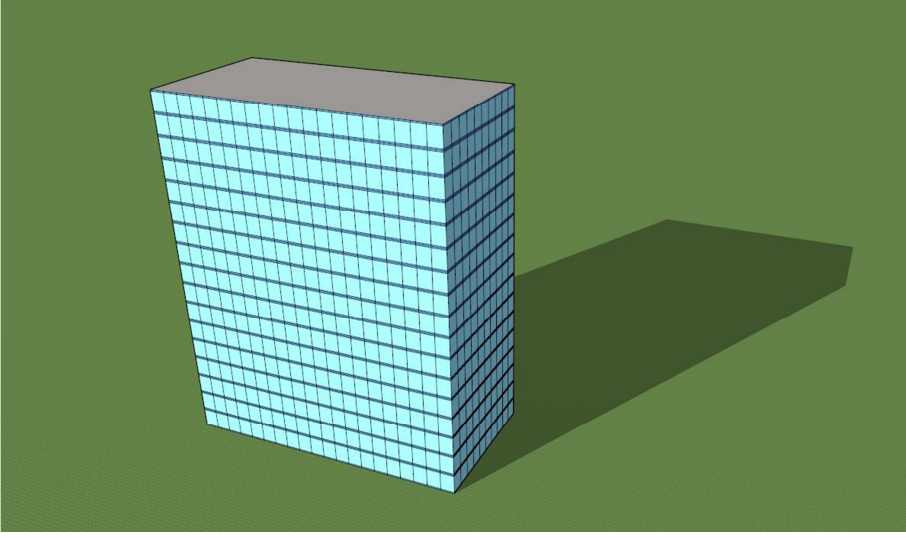
Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	44.00	
PR [m]	22.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	52,659.20	
VN [m <sup>3</sup> ]	42,127.00	
NP [-]	17.00	
AL [m]	54.40	
SL [m <sup>2</sup> ]	16,456.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	968.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	9,116.80	
SN [m <sup>2</sup> ]	15,962.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.17	
SV [m <sup>2</sup> ]	7,180.80	
SOV [m <sup>2</sup> ]	3,662.21	
SVV [m <sup>2</sup> ]	3,518.59	
RVT [-]	0.39	

---

---

**IU3 - edifici a torre con chiusura verticale tutto vetro**

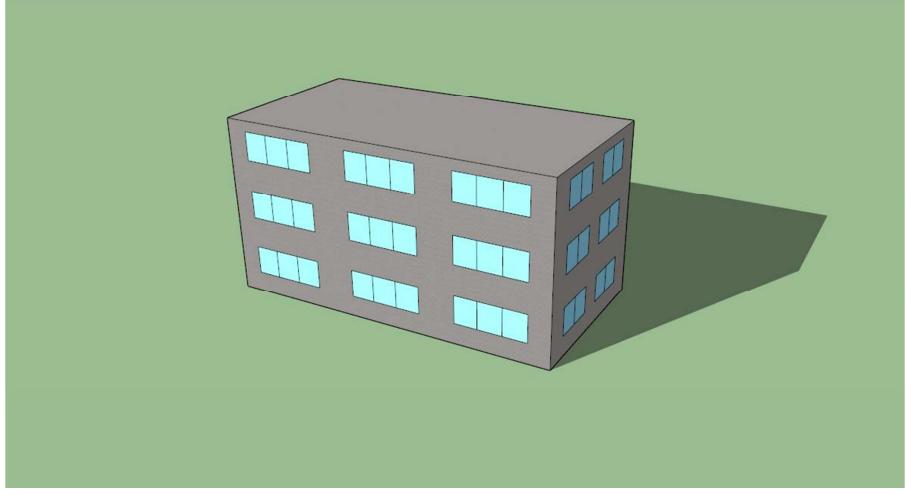
---

Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	44.00	
PR [m]	22.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	52,659.20	
VN [m <sup>3</sup> ]	42,127.00	
NP [-]	17.00	
AL [m]	54.40	
SL [m <sup>2</sup> ]	16,456.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	968.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	9,116.80	
SN [m <sup>2</sup> ]	15,962.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.17	
SV [m <sup>2</sup> ]	7,180.80	
SOV [m <sup>2</sup> ]	0.00	
SVV [m <sup>2</sup> ]	7,180.80	
RVT [-]	0.79	

---

**IU4 - edifici a forma di parallelepipedo di piccola taglia chiusura verticale vetrata a blocchi**

---

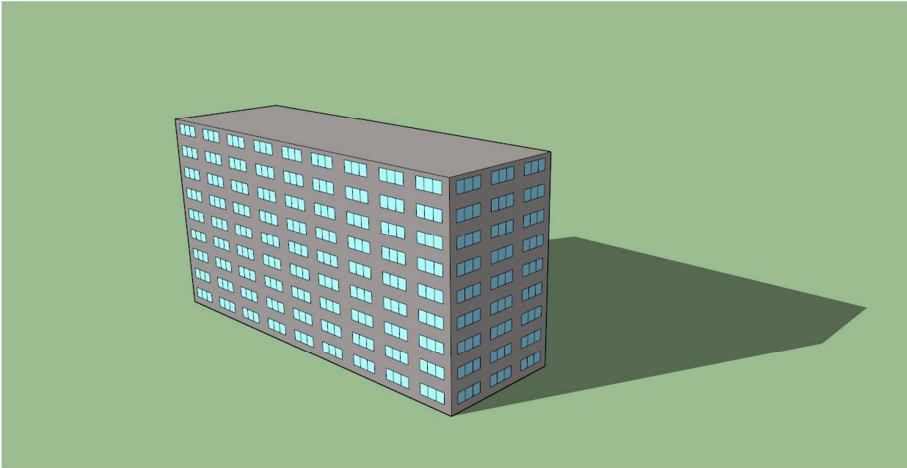
Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	18.50	
PR [m]	9.50	
VL [m <sup>3</sup> ]	1,689.60	
VN [m <sup>3</sup> ]	1,350.00	
NP [-]	3.00	
AL [m]	9.60	
SL [m <sup>2</sup> ]	528.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	176.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	889.60	
SN [m <sup>2</sup> ]	511.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.53	
SV [m <sup>2</sup> ]	537.60	
SOV [m <sup>2</sup> ]	381.70	
SVV [m <sup>2</sup> ]	155.90	
RVT [-]	0.18	

---

---

**IU5 - edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia chiusura verticale vetrata a blocchi**

---

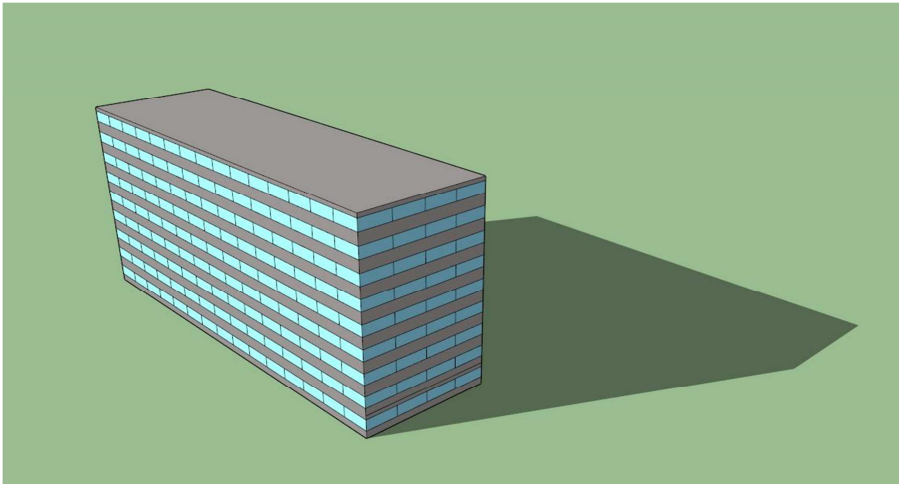
Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	18.00	
PR [m]	60.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	31,104.00	
VN [m <sup>3</sup> ]	24,880.00	
NP [-]	9.00	
AL [m]	28.80	
SL [m <sup>2</sup> ]	9,720.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	1,080.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	6,652.80	
SN [m <sup>2</sup> ]	9,430.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.21	
SV [m <sup>2</sup> ]	4,492.80	
SOV [m <sup>2</sup> ]	2,808.00	
SVV [m <sup>2</sup> ]	1,684.80	
RVT [-]	0.25	

---

---

**IU6 - edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia chiusura verticale vetrata a nastro**

---

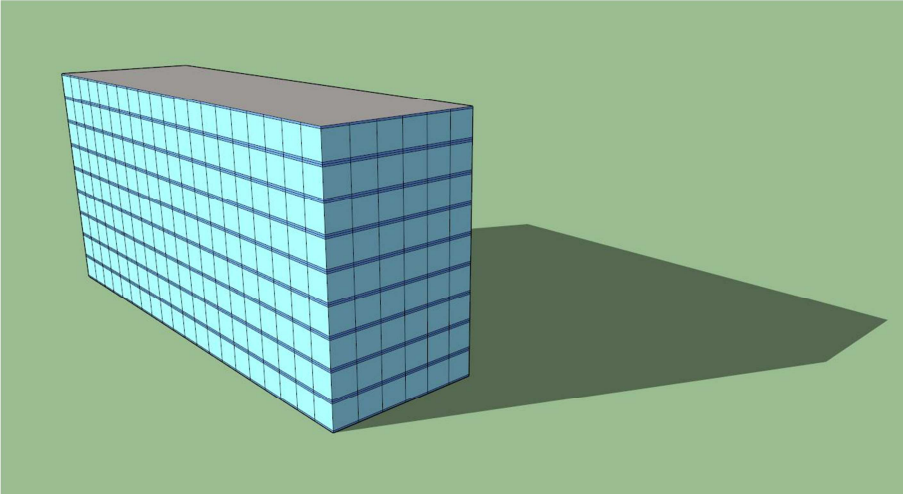
Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	18.00	
PR [m]	60.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	31,104.00	
VN [m <sup>3</sup> ]	24,880.00	
NP [-]	9.00	
AL [m]	28.80	
SL [m <sup>2</sup> ]	9,720.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	1,080.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	6,652.80	
SN [m <sup>2</sup> ]	9,430.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.21	
SV [m <sup>2</sup> ]	4,492.80	
SOV [m <sup>2</sup> ]	1,752.19	
SVV [m <sup>2</sup> ]	2,740.61	
RVT [-]	0.41	

---

---

**IU7 - edifici a forma di parallelepipedo di grossa taglia chiusura verticale tutto vetro**

---

Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	18.00	
PR [m]	60.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	31,104.00	
VN [m <sup>3</sup> ]	24,880.00	
NP [-]	9.00	
AL [m]	28.80	
SL [m <sup>2</sup> ]	9,720.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	1,080.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	6,652.80	
SN [m <sup>2</sup> ]	9,430.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.21	
SV [m <sup>2</sup> ]	4,492.80	
SOV [m <sup>2</sup> ]	0.00	
SVV [m <sup>2</sup> ]	4,492.80	
RVT [-]	0.68	

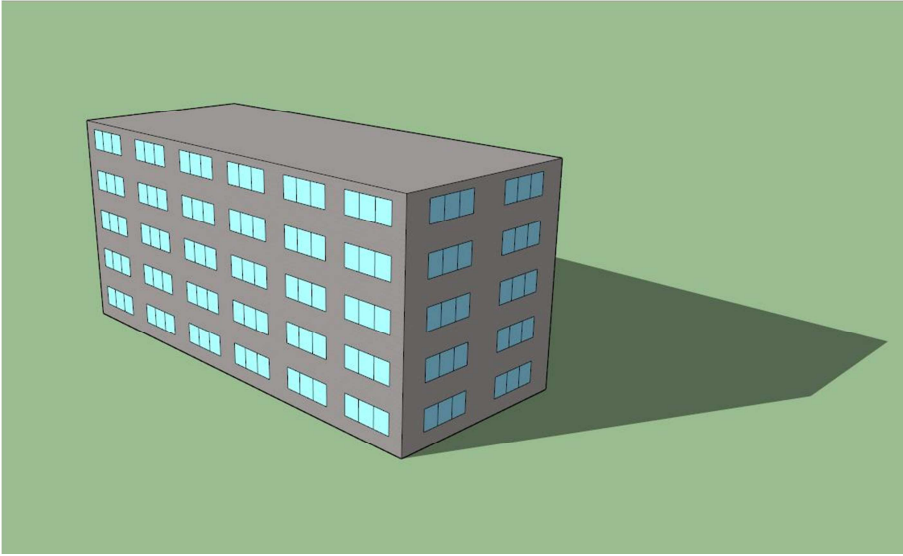
---



---

**IU8 - edifici a forma di parallelepipedo di media taglia chiusura verticale vetrata a blocchi**

---

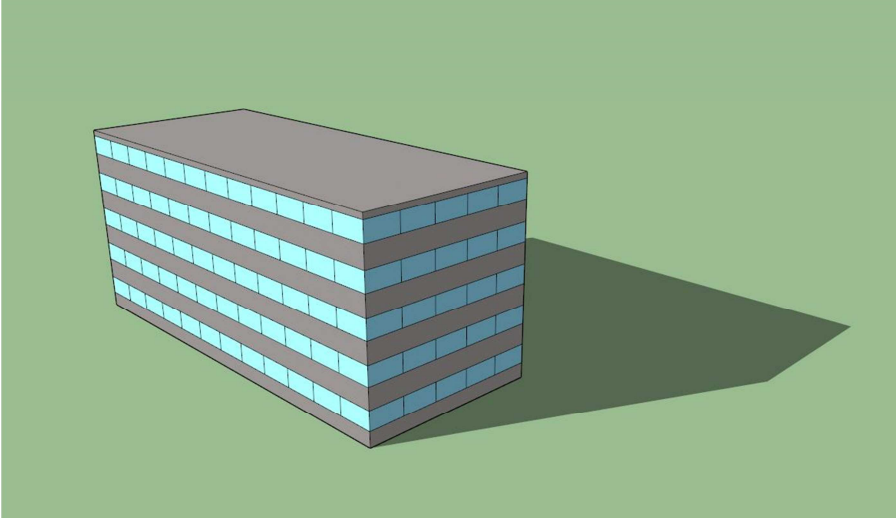
Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	15.00	
PR [m]	36.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	8,640.00	
VN [m <sup>3</sup> ]	6,910.00	
NP [-]	5.00	
AL [m]	16.00	
SL [m <sup>2</sup> ]	2,700.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	540.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	2,712.00	
SN [m <sup>2</sup> ]	2,620.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.31	
SV [m <sup>2</sup> ]	1,632.00	
SOV [m <sup>2</sup> ]	1,020.00	
SVV [m <sup>2</sup> ]	612.00	
RVT [-]	0.23	

---

---

**IU9 - edifici a forma di parallelepipedo di media taglia chiusura verticale vetrata a nastro**

---

Cod.	Valori	Rappresentazione schematica
LA [m]	15.00	
PR [m]	36.00	
VL [m <sup>3</sup> ]	8,640.00	
VN [m <sup>3</sup> ]	6,910.00	
NP [-]	5.00	
AL [m]	16.00	
SL [m <sup>2</sup> ]	2,700.00	
SP [m <sup>2</sup> ]	540.00	
SI [m <sup>2</sup> ]	2,712.00	
SN [m <sup>2</sup> ]	2,620.00	
S/V [m <sup>-1</sup> ]	0.31	
SV [m <sup>2</sup> ]	1,632.00	
SOV [m <sup>2</sup> ]	636.48	
SVV [m <sup>2</sup> ]	995.52	
RVT [-]	0.37	

---

Con le schede si conclude la definizione delle caratteristiche morfologiche degli archetipi, in accordo con la procedura proposta dalla relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica“ [2].

Nel seguente capitolo saranno definite le tecnologie d’involucro applicate agli archetipi morfologici, stabilendo le stratigrafie delle chiusure opache, la tipologia dei serramenti e le schermature solari.



## CAPITOLO 3

### ARCHETIPI TECNOLOGICI

Una volta determinati i 9 archetipi morfologici si definiscono quelli d'involucro, stabilendone le stratigrafie e le caratteristiche. In questa trattazione sono considerati quattro elementi principali:

- chiusure verticali opache (le pareti che dividono l'ambiente interno da quello esterno);
- chiusure orizzontali di copertura (il solaio di copertura dell'edificio);
- chiusure orizzontali controterra (il solaio del piano terra a contatto con il terreno sottostante);
- chiusure verticali trasparenti (gli elementi vetrati che dividono l'ambiente interno da quello esterno);
- schermature solari (sistemi lamellari esterni all'edificio applicati agli elementi trasparenti).

Per questi elementi si andranno a definire le stratigrafie e le tecnologie utilizzate, tra le quali stabilire quale sia la misura di efficienza energetica, ovvero la loro caratteristica che influisce direttamente sul fabbisogno termico dell'edificio. Queste saranno poi parametrizzate e se ne individueranno le possibili variazioni.

#### 3.1 Fonti utilizzate

Per la scelta degli elementi tecnologici è stata utilizzata come fonte di partenza la ricerca del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16], nella quale sono riportate anche le caratteristiche costruttive del patrimonio edilizio di recente costruzione nel campo degli edifici ad uso ufficio. Oltre a questa fonte è stato consultato uno studio di progettazione operante nell'ambito trattato, per capire quali siano gli elementi d'involucro attualmente utilizzati e le loro evoluzioni in un prossimo futuro.

## 3.2 Criterio di analisi

I pacchetti tecnologici proposti all'interno della ricerca del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano [16] sono stati riconsiderati in un'ottica orientata al miglioramento delle prestazioni dei componenti edilizi ed all'utilizzo di tecnologie innovative. Inoltre, dovendo descrivere edifici di nuova costruzione, sono stati modificati affinché rientrino nei limiti di trasmittanza termica ( $W/m^2K$ ) previsti dal DGR VIII/8745 del 2008 [3], come alla tabella 7.

*Tabella 7 - Limiti di prestazione energetica delle chiusure secondo il DGR VIII/8745 del 2008 [3], espressi in  $W/m^2K$*

Zona climatica	Strutture rivolte verso l'esterno ovvero verso ambienti a temperatura non controllata			
	Opache verticali	Opache orizzontali inclinate		Chiusure trasparenti comprensive di infissi
		Coperture	Pavimenti	
D	0.36	0.32	0.36	2.40
E	0.34	0.30	0.33	2.20
F	0.33	0.29	0.32	2.00

La trasmittanza termica è la grandezza fisica che misura la quantità di calore scambiato da un materiale o un corpo per unità di superficie e unità di temperatura ( $W/m^2K$ ) e definisce la capacità isolante di un elemento. La trasmittanza termica  $U$  viene calcolata con le seguenti formule tratte dalla norma UNI EN ISO 6946, "Componenti ed elementi per edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo" [20].

$$U = \frac{1}{R_T} \quad U = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{se}}$$

Il valore di  $U$  è inversamente proporzionale a quello di  $R_T$ , ovvero la resistenza termica complessiva della stratigrafia considerata, la cui unità di misura è  $m^2K/W$ . La resistenza termica totale si calcola come la sommatoria delle resistenze dei singoli strati e di quelle superficiali. Le resistenze dei singoli strati vengono calcolate dividendo lo spessore dello strato espresso in metri per la conduttività termica dell'elemento, espressa in  $W/mK$ . I valori

sono stati ricavati dalla norma UNI 10351, “Materiali da costruzione - Valori della conduttività termica e della permeabilità al vapore” [21] e da schede tecniche dei principali produttori.

Le resistenze liminari  $R_{si}$  ed  $R_{se}$ , espresse in  $m^2K/W$ , dipendono invece dalla direzione del flusso termico e sono riassunte alla tabella 8.

*Tabella 8 - Valori delle resistenze liminari in funzione della direzione del flusso termico, espresse in  $m^2K/W$*

	<b>Ascendente</b>	<b>Orizzontale</b>	<b>Discendente</b>
<b>R<sub>si</sub></b>	0.1	0.13	0.17
<b>R<sub>se</sub></b>	0.04	0.04	0.04

Per quanto concerne il calcolo della resistenza termica delle intercapedini la norma UNI EN ISO 6946, “Componenti ed elementi per edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo” [20] le distingue fra non ventilate, leggermente ventilate e ben ventilate, proponendo dei valori di resistenza termica in funzione della tipologia, spessore e della direzione del flusso termico.

Seguendo la procedura proposta dalla relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica“ [2] partendo dalle soluzioni tecniche “base”, che rispondono ai limiti di normativa, si incrementa la loro prestazione energetica.

Per quanto riguarda le tre tipologie di chiusure opache il valore di trasmittanza termica  $U$  viene diminuito aumentando lo spessore dello strato di isolante termico.

La prestazione energetica degli elementi vetrati inoltre alterata modificando la tecnologia del serramento, ovvero utilizzando vetrocamere e telai con diverse caratteristiche.

Le schermature solari influiscono sulla quantità di radiazione incidente sulla superficie vetrata e le migliorie apportate a questo sistema consistono nella variazioni dell’interasse delle lamelle dei frangisole.

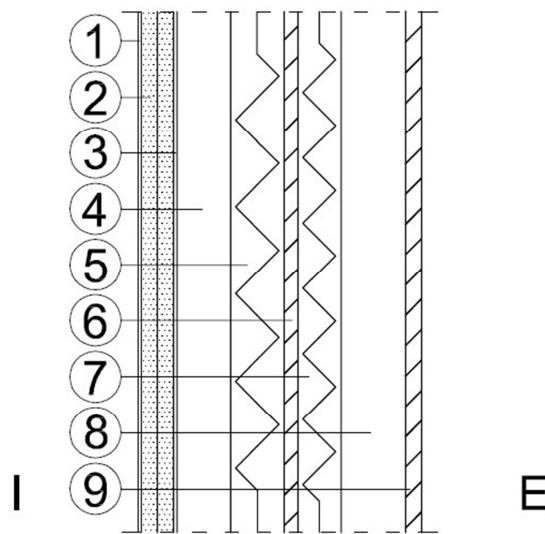
Per ognuno degli elementi descritti si definiscono nello specifico le prestazioni energetiche, i valori di partenza e le migliorie possibili.

### 3.2.1 Chiusura verticale opaca

Si sceglie di considerare due tipologie di pareti verticali molto differenti, una “a secco“, ovvero progettata senza l’utilizzo del calcestruzzo, ed un’altra con una classica struttura in malta e laterizi. Le soluzioni tecniche vengono applicate ad archetipi morfologici compatibili, ad esempio si assume che nella costruzione di un nuovo edificio a torre ad uso ufficio, la scelta per la chiusura opaca ricadrà su una struttura a secco rispetto ad una tradizionale.

#### 3.2.1.1 Chiusura verticale opaca a secco

Di seguito si riporta una sezione verticale della soluzione tecnica scelta ed una descrizione dei componenti.



*Figura 4 - Sezione della chiusura verticale opaca a secco*

*Tabella 9 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura verticale opaca a secco*

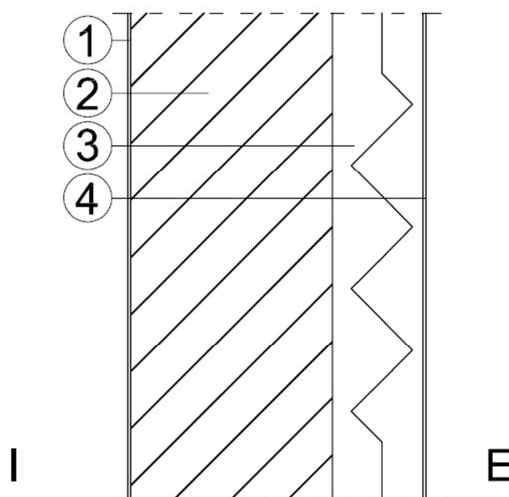
<b>Cod. stratigrafia: A</b>				
<b>Cod.</b>	<b>Descrizione: chiusura verticale opaca a secco</b>			
	<b>Strato</b>	<b>sp. [m]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/mK]</b>	<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>
R <sub>se</sub>	resistenza liminare esterna	-	-	0.130
9	pannello composito alluminio - plastica	0.015	-	-
8	intercapedine ventilata	0.060	-	-
7	pannello isolante in polistirene espanso estruso (XPS)	0.040	0.034	-
6	pannello in cemento fibrorinforzato	0.040	0.600	-
5	pannello isolante in lana di vetro	0.050	0.034	-
4	intercapedine non ventilata	0.050	-	0.110
3	foglio in PVC	0.003	-	-
2	doppio pannello in cartongesso	0.030	0.210	-
1	finitura interna in rasatura e pittura	0.003	0.800	-
R <sub>si</sub>	resistenza liminare interna	-	-	0.040
<b>Spessore totale</b>		<b>0.291</b>	<b>m</b>	
<b>Resistenza totale</b>		<b>3.140</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>	
<b>limite U: 0,33 [W/m<sup>2</sup>K]</b>		<b>Trasmittanza U</b>	<b>0.32</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>

L'isolamento termico di questa soluzione tecnica è affidato al pannello isolante in polistirene espanso estruso (XPS) ed a quello in lana di vetro. Il valore della trasmittanza termica di questa stratigrafia è di 0.32 W/m<sup>2</sup>K, si propongono quindi due aumenti successivi dello strato di isolante in modo da incrementare le resistenza termica del pacchetto. Questi interventi corrispondono ad una maggiorazione di 3 cm dello spessore dello strato di XPS:

- primo miglioramento U 0,25 W/m<sup>2</sup>K, spessore isolante totale 12 cm (incremento di 3 cm rispetto alla struttura di riferimento);
- secondo miglioramento U 0,21 W/m<sup>2</sup>K, spessore isolante totale 15 cm (incremento di 6 cm rispetto alla struttura di riferimento).

### 3.2.1.2 Chiusura verticale opaca tradizionale

Di seguito si riporta una sezione verticale della soluzione tecnica scelta ed una descrizione dei componenti.



*Figura 5 - Sezione della chiusura verticale opaca tradizionale*

*Tabella 10 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura verticale opaca tradizionale*

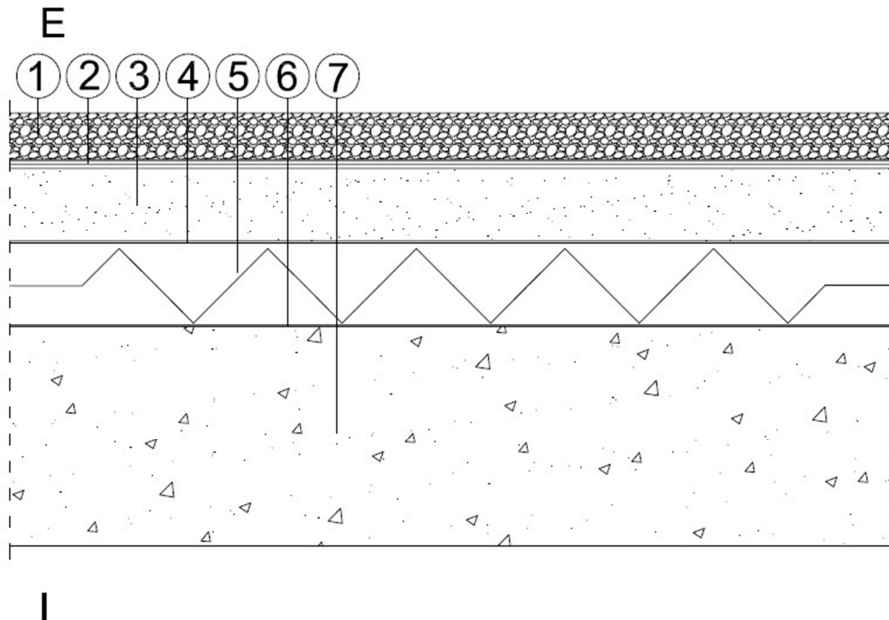
<b>Cod. stratigrafia: B</b>				
<b>Cod.</b>	<b>Descrizione: chiusura verticale opaca tradizionale</b>			
	<b>Strato</b>	<b>sp. [m]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/mK]</b>	<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>
R <sub>se</sub>	resistenza liminare esterna	-	-	0.130
4	intonaco per cappotto in cemento - resina	0.003	0.520	-
3	pannelli isolanti in polistirene espanso estruso (XPS)	0.090	0.034	-
2	Poroton	0.200	0.688	-
1	finitura interna in rasatura e pittura	0.003	0.800	-
R <sub>si</sub>	resistenza liminare interna	-	-	0.040
	<b>Spessore totale</b>	<b>0.296</b>	<b>m</b>	
	<b>Resistenza totale</b>	<b>3.117</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>	
	<b>limite U: 0,33 [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>Trasmittanza U</b>	<b>0.32</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>

L'isolamento termico di questa soluzione tecnica è affidato al pannello isolante in polistirene espanso estruso (XPS). Il valore della trasmittanza termica di questa stratigrafia è di  $0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ , si propongono quindi due aumenti successivi dello strato di isolante in modo da incrementare le resistenza termica del pacchetto. Questi interventi corrispondono ad una maggiorazione di 3 cm dello spessore dello strato di XPS:

- primo miglioramento  $U 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , spessore isolante totale 12 cm (incremento di 3 cm rispetto alla struttura di riferimento);
- secondo miglioramento  $U 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ , spessore isolante totale 15 cm (incremento di 6 cm rispetto alla struttura di riferimento).

### 3.2.2 Chiusura orizzontale di copertura

Di seguito si riporta una sezione verticale della soluzione tecnica scelta ed una descrizione dei componenti.



*Figura 6 - Sezione della chiusura orizzontale di copertura*

*Tabella 11 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura orizzontale di copertura*

Cod. stratigrafia: C				
Cod.	Descrizione: chiusura orizzontale di copertura			
	Strato	sp. [m]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
R <sub>se</sub>	resistenza liminare esterna	-	-	0.100
9	Ghiaia	0.050	-	-
8	doppia membrana impermeabile bituminosa	0.010	0.240	-
7	calcestruzzo alleggerito $\lambda=0.3$	0.080	0.300	-
6	fibre minerali	0.002	-	-
5	pannelli isolanti in polistirene espanso estruso - XPS	0.090	0.034	-
4	fibre minerali	0.002	-	-
3	solaio in laterocemento	0.240	0.800	-
2	intercapedine impiantistica	0.500	-	-
1	pannello in cartongesso	0.015	-	-
R <sub>si</sub>	resistenza liminare interna	-	-	0.040
<b>Spessore totale</b>		<b>0.989</b>	<b>m</b>	
<b>Resistenza totale</b>		<b>3.395</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>	
<b>limite U: 0,29 [W/m<sup>2</sup>K]</b>		<b>Trasmittanza U</b>	<b>0.29</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>

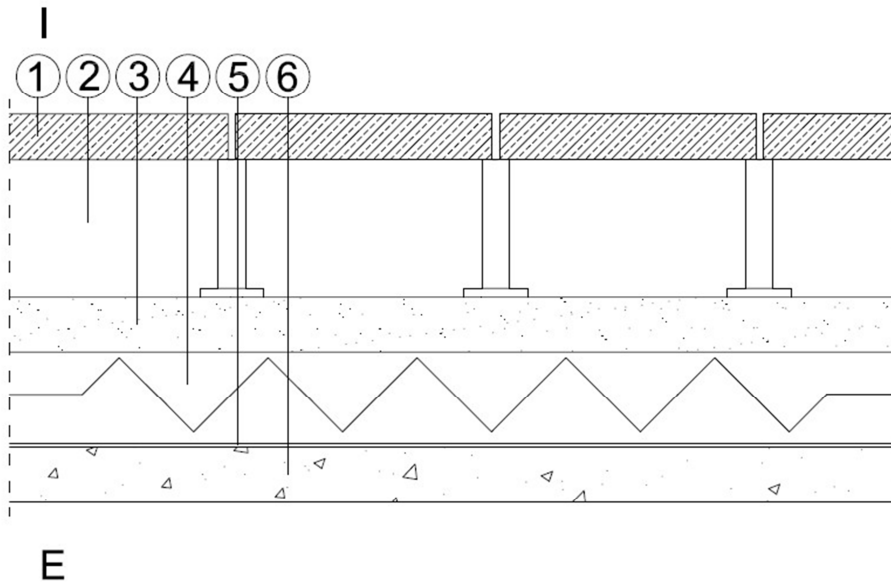
La scelta di considerare un controsoffitto nella stratigrafia nasce dal fatto che per gli edifici ad uso ufficio esso viene comunemente utilizzato per l'alloggiamento degli impianti. Nel calcolo della prestazione termica non viene però considerato il controsoffitto, in quanto la sua conformazione dipende dalle caratteristiche degli impianti presenti al suo interno. L'isolamento termico di questa soluzione tecnica è affidato al pannello isolante in polistirene espanso estruso (XPS). Il valore della trasmittanza termica di questa stratigrafia è di 0.29 W/m<sup>2</sup>K, si propongono quindi due aumenti successivi dello strato di isolante in modo da incrementare la resistenza termica del pacchetto. Questi interventi corrispondono ad una maggiorazione di 3 cm dello spessore dello strato di XPS:

- primo miglioramento U 0,23 W/m<sup>2</sup>K, spessore isolante totale 12 cm (incremento di 3 cm rispetto alla struttura di riferimento);
- secondo miglioramento U 0,19 W/m<sup>2</sup>K, spessore isolante totale 15 cm (incremento di 6 cm rispetto alla struttura di riferimento).



### 3.2.3 Chiusura orizzontale controterra

Di seguito si riporta una sezione verticale della soluzione tecnica scelta ed una descrizione dei componenti.



*Figura 7 - Sezione della chiusura orizzontale controterra*

*Tabella 12 - Stratigrafia e caratteristiche della chiusura orizzontale controterra*

<b>Cod. stratigrafia: D</b>				
<b>Cod.</b>	<b>Descrizione: chiusura orizzontale controterra</b>			
	<b>Strato</b>	<b>sp. [m]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/mK]</b>	<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>
R <sub>se</sub>	resistenza liminare esterna	-	-	0.170
8	magrone in calcestruzzo	0.050	-	-
7	intercapedine ventilata	0.300	-	-
6	calcestruzzo armato	0.060	1.910	-
5	membrana impermeabile bituminosa	0.004	0.170	-
4	pannelli isolanti in polistirene espanso estruso (XPS)	0.100	0.034	-
3	calcestruzzo magro $\lambda=0.9$	0.060	0.900	-
2	intercapedine attrezzata	0.150	-	-
1	quadrotti in solfato di calcio	0.050	-	-
R <sub>si</sub>	resistenza liminare interna	-	-	0.040
<b>Spessore totale</b>		<b>0.774</b>	<b>m</b>	
<b>Resistenza totale</b>		<b>3.273</b>	<b>m<sup>2</sup>K/W</b>	
<b>limite U: 0,32 [W/m<sup>2</sup>K]</b>		<b>Trasmittanza U</b>	<b>0.31</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>

L'intercapedine tra il magrone e gli altri strati si ipotizza ventilata, in quanto garantisce innanzitutto che non vi siano risalite di gas radon dal terreno ed in secondo luogo asporta l'umidità. Nel calcolo della trasmittanza l'intercapedine ventilata ed il magrone non vengono considerati, come stabilito dalla norma UNI EN ISO 6946, "Componenti ed elementi per edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo" [20].

L'isolamento termico di questa soluzione tecnica è affidato al pannello isolante in polistirene espanso estruso (XPS).

Il valore della trasmittanza termica di questa stratigrafia è di 0.31 W/m<sup>2</sup>K, si propongono quindi due aumenti successivi dello strato di isolante in modo da incrementare le resistenza termica del pacchetto. Questi interventi corrispondono ad una maggiorazione di 3 cm dello spessore dello strato di XPS:

- primo miglioramento U 0,24 W/m<sup>2</sup>K, spessore isolante totale 13 cm (incremento di 3 cm rispetto alla struttura di riferimento);
- secondo miglioramento U 0,20 W/m<sup>2</sup>K, spessore isolante totale 16 cm (incremento di 6 cm rispetto alla struttura di riferimento).

### 3.2.4 Chiusura verticale trasparente

Le chiusure verticali trasparenti sono serramenti costituiti da un telaio a taglio termico e da una vetrocamera con caratteristiche differenti a seconda della tipologia di isolamento termico richiesto.

Si è scelto di considerare tre diversi serramenti, distinti in base alla tipologia di vetrocamera.

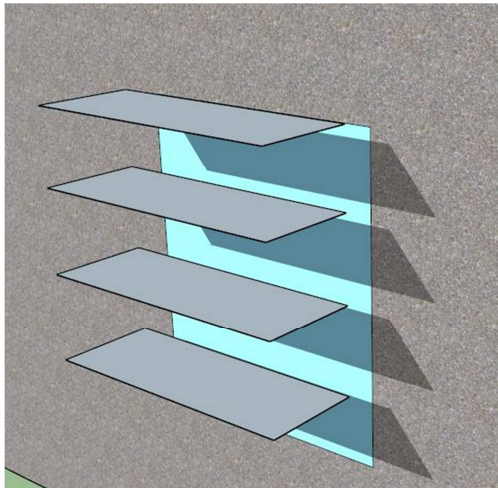
- singola vetrocamera con aria nell'intercapedine ( $U=2.00 \text{ W/m}^2\text{K}$  fattore solare  $g=0.422$ );
- singola vetrocamera con argon nell'intercapedine, rivestimento basso emissivo ( $U=1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$  fattore solare  $g=0.315$ );
- doppia vetrocamera con aria nell'intercapedine, rivestimento basso emissivo ( $U=1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$  fattore solare  $g=0.264$ ).

L'ipotesi di partenza è quella di utilizzare un serramento con trasmittanza entro i limiti ipotizzati dalla normativa, per poi sostituirlo con elementi dalle prestazioni migliori, in modo di valutare gli effetti in termini energetici.

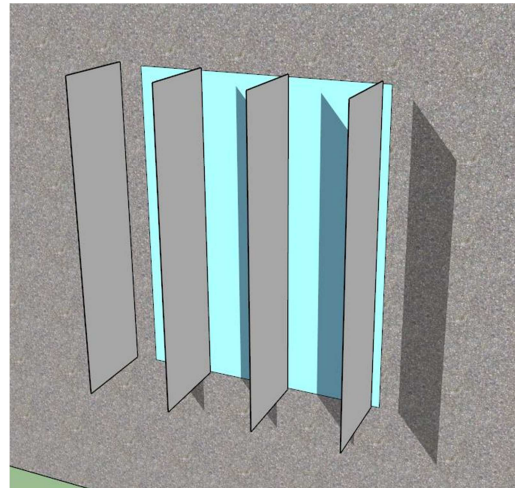
In tabella 7 sono riportati i tre diversi valori massimi della trasmittanza dei serramenti, a seconda della zona termica della Regione Lombardia in cui ci si trova. Si è scelto di partire dal valore massimo di  $2.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ovvero il più basso tra quelli proposti.

### 3.2.5 Schermature solari

Le schermature solari considerate in questa trattazione possono essere schematizzate come nelle seguenti figure, con delle lamelle poste di fronte agli elementi vetrati.



(a)

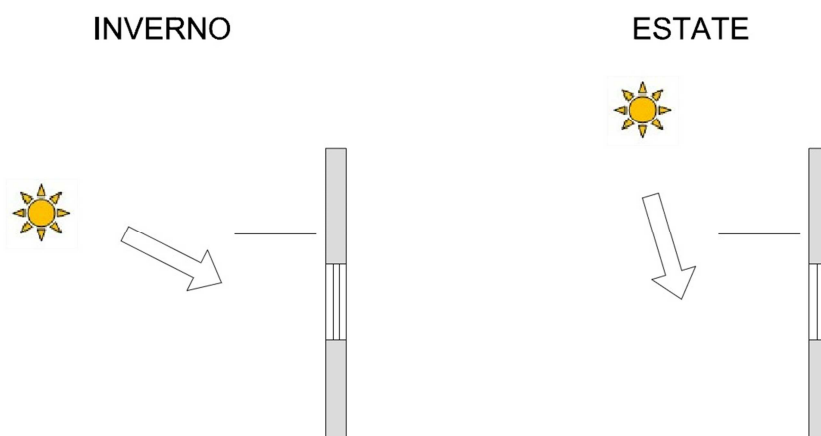


(b)

**Figura 8 - (a) Posizionamento delle lamelle sulle superfici vetrate del lato Sud (b) posizionamento delle lamelle sulle superfici vetrate dei lati Est ed Ovest**

L'effetto delle schermature solari è principalmente quello di ridurre i carichi termici estivi, diminuendo i guadagni solari interni. La presenza dei frangisole riduce il fattore di vista fra la superficie del vetro e la volta celeste, facendo sì che diminuisca la radiazione diffusa ricevuta. Per quanto riguarda invece la radiazione diretta, viene schermata sul lato Sud con lamelle poste orizzontalmente come in figura 8(a), mentre ad Est ed Ovest verticalmente, come si può vedere in figura 8(b). Il lato nord è considerato privo di schermature a causa del basso livello di irraggiamento solare.

La distribuzione dei frangisole sul lato sud ha un effetto positivo nella stagione invernale, come si può vedere in figura 9.



*Figura 9 - Effetto sulla radiazione solare diretta delle schermature sul lato Sud*

Con questa configurazione delle lamelle si minimizza la radiazione diretta incidente sulle vetrate nella stagione estiva (diminuendo quindi gli apporti solari), ma nella stagione invernale si ha una maggiore irradiazione, trovandosi il sole ad una posizione più bassa rispetto all'orizzonte.

La condizione di riferimento scelta in questa trattazione non prevede l'applicazione di schermature solari e vengono valutati successivamente i cambiamenti della prestazione energetica dell'edificio, applicando le lamelle come precedentemente descritto. Gli elementi schermanti hanno una larghezza di 20 cm e sono posti per tutta la larghezza sul lato Sud, lungo l'altezza ad Est ed Ovest. Per quanto riguarda l'interasse tra le lamelle sono stati considerati i seguenti valori.

- primo miglioramento interasse delle lamelle a distanza 45 cm;
- secondo miglioramento interasse delle lamelle a distanza 15 cm.

Nella tabella 13 sono riportati i fattori di oscuramento dovuti alle schermature, per la stagione invernale, estiva e globale in funzione degli interassi proposti per le lamelle.

*Tabella 13 - Fattori di oscuramento delle schermature, in funzione dell'interasse e della stagione*

	Interasse 45 cm	Interasse 15 cm
<b>estate</b>	0.25	0.45
<b>inverno</b>	0.21	0.44
<b>globale</b>	0.23	0.44



### 3.3 Definizione delle misure di efficienza energetica e dei parametri

La tabella 14 riporta l'elenco delle caratteristiche soggette a modifica e delle migliorie apportate.

*Tabella 14 - Definizione delle misure di efficienza energetica e loro descrizione*

Cod.	Misura di efficienza energetica	Descrizione modello base
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Isolamento di spessore 4 cm in polistirene espanso estruso (XPS) ed isolamento di spessore 5 cm in lana di vetro
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Isolamento di spessore 9 cm in polistirene espanso estruso (XPS)
C	Isolamento termico della chiusura orizzontale di copertura	Isolamento di spessore 9 cm in polistirene espanso estruso (XPS)
D	Isolamento termico della chiusura orizzontale controterra	Isolamento di spessore 10 cm in polistirene espanso estruso (XPS)
E	Isolamento termico delle chiusure verticali trasparenti	Serramento avente trasmittanza pari a 2.0
F	Schermatura solare	Assenza della schermatura solare

*Tabella 15 - Parametri delle misure di efficienza energetica e valori base con ipotesi migliorativi*

Cod.	Parametro	Simbolo	Massimo normativa	Valore base	Prima migliororia	Seconda migliororia
A	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]	U	0.33	0.32	0.25	0.21
B	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]	U	0.33	0.32	0.25	0.21
C	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]	U	0.29	0.29	0.23	0.19
D	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]	U	0.32	0.31	0.24	0.20
E	Trasmittanza termica [W/m <sup>2</sup> K]	U	2.00	2.00	1.40	1.20
F	Interasse [m]	m	-	-	0.45	0.15

Nelle tabelle 14 e 15 si può vedere come ogni lettera corrisponda ad una misura di efficienza energetica ed al relativo parametro con interventi migliorativi. Queste codifiche saranno utilizzate nelle valutazioni energetiche per definire il cambiamento della prestazione globale dell'involucro edilizio con il variare dei parametri e quindi il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva che ne deriva.

Con le tabelle precedentemente esposte si conclude la definizione delle tecnologie d'involucro, dei loro parametri connotanti ed interventi migliorativi, in accordo con la procedura proposta dalla relazione del Ministero dello Sviluppo Economico "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica" [2].

Nel prossimo capitolo si andranno a definire gli archetipi impiantistici ed i loro interventi migliorativi, in modo da ottenere tutti i parametri che concorrono alla prestazione energetica del sistema edificio-impianto in termini di energia primaria.



## CAPITOLO 4

### ARCHETIPI IMPIANTISTICI

Una volta definiti gli aspetti morfologici e tecnologici dei modelli di edificio si passa agli archetipi impiantistici. Finora sono state stabilite le caratteristiche che influiscono sul fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione invernale ed estiva. Per archetipi impiantistici si intendono quei componenti che andranno a soddisfare tale necessità. Oltre alle dotazioni impiantistiche non direttamente legate alla climatizzazione ma che concorrono a definire i consumi energetici in termini di energia primaria (EP). I fabbisogni qui considerati sono quelli legati al carico termico sensibile dei fabbricati mentre non è oggetto di questa trattazione lo studio dei carichi termici latenti.

Le componenti impiantistiche necessarie per soddisfare la richiesta energetica della climatizzazione invernale ed estiva sono qui elencate.

- sistema di generazione;
- sistema di emissione;
- sistema di regolazione;
- sistema di distribuzione.

Gli altri elementi considerati in quanto influiscono sui consumi sono i seguenti.

- sistema di ventilazione meccanica con recuperatore di calore, il quale influisce sulla richiesta di energia termica dell'involucro;
- sistema di produzione dell'acqua calda sanitaria, che influisce sul fabbisogno di energia primaria;
- impianto solare fotovoltaico, in grado di produrre energia elettrica.

Seguendo la procedura proposta dalla relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica“ [2] si vogliono creare delle configurazioni impiantistiche base sulle quali variare i parametri connotanti e valutare così le differenti prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto in termini di EP.

Questo lavoro viene suddiviso in due fasi; la prima in cui si definiscono quelle componenti che influiscono direttamente sul fabbisogno energetico invernale ed estivo (sistemi di generazione, emissione, regolazione e distribuzione), la seconda invece in cui vengono descritti gli altri elementi che incidono sul fabbisogno di EP (sistemi di ventilazione meccanica con recuperatore di calore, produzione dell’acqua calda sanitaria ed impianto solare fotovoltaico).

Tutte queste componenti sono in sè misure di efficienza energetica, in quanto impattano direttamente sul fabbisogno dell’edificio; per ognuna sarà definito il parametro che ne caratterizza la prestazione e le possibili migliorie.

## 4.1 Fonti utilizzate

Per la definizione del sistema impiantistico sono stati studiati i dati disponibili nel CEER [17]. Le informazioni ricavate hanno fornito le indicazioni necessarie a descrivere il sistema di generazione e di emissione.

Per quanto riguarda il primo si trovano direttamente i dati necessari (tipologia combustibile, tipologia generatore e potenza del generatore come elencato alla tabella 1).

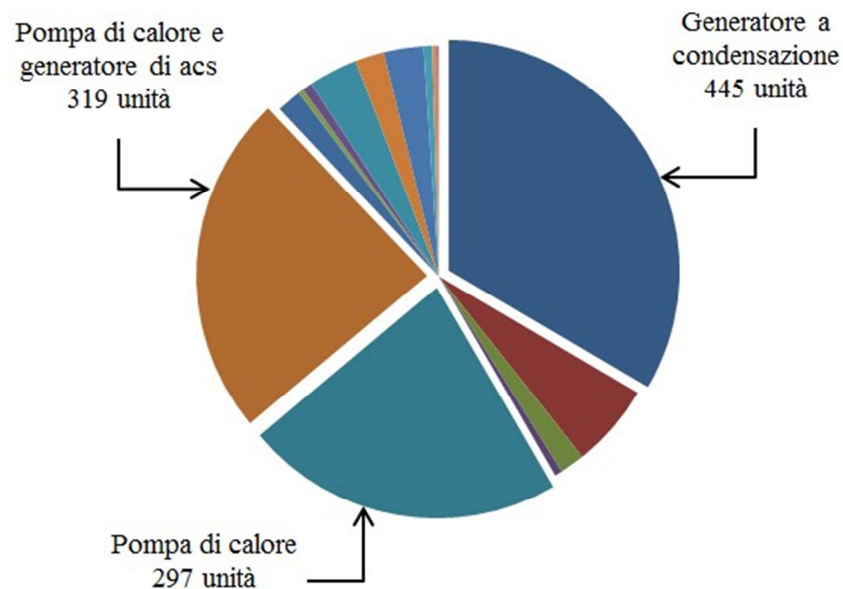
La scelta dei sistemi di emissione ha richiesto prima lo studio della superficie e volume netti in modo da poter ricavare l’altezza media dei locali. Noto questo parametro ci si riferisce al DGR VIII/5796 del 2009 [4] che elenca i sistemi di emissione applicabili in funzione dell’altezza netta degli ambienti.

## 4.2 Criterio di analisi

L'analisi si è svolta considerando ognuno dei quattro elementi principali che compongono il sistema impiantistico separatamente, definendo poi delle combinazioni plausibili di impianto che non risultino obsolete e lavorando in un'ottica migliorativa dell'attuale patrimonio edilizio esistente. Vengono utilizzati dei rendimenti dei sistemi impiantistici per passare da energia termica a primaria, i quali saranno i parametri variabili per valutare il comportamento globale dell'impianto. La scelta di utilizzare un componente o un altro influisce sul rendimento e quindi sulla prestazione energetica globale. Per le equazioni ed il procedimento di calcolo di questi parametri si rimanda al capitolo 5.

### 4.2.1 Sistema di generazione

Lo studio del sistema di generazione parte dalla figura 10 che riporta i dati ricavati dal CEER [17].



*Figura 10 - Distribuzione dei sistemi di generazione per il campione di edifici del CEER, esplodendo il grafico sono evidenziate le categorie maggiormente diffuse, mentre le altre componenti accorpate rappresentano quelle meno utilizzate*

Questa figura rappresenta la distribuzione delle tipologie di generazione, ogni spicchio è una percentuale dei 1331 sistemi studiati.

I sistemi di generazione presenti sono i seguenti, riportati così come descritti nel database:

- generatore a condensazione;
- generatore a condensazione e generatore di acqua calda sanitaria;
- generatore a condensazione e pompa di calore;
- generatore a condensazione, generatore di acqua calda sanitaria, pompa di calore;
- pompa di calore;
- pompa di calore e generatore di acqua calda sanitaria;
- pompa di calore, riscaldatore ad infrarossi e generatore di acqua calda sanitaria;
- riscaldatore ad infrarossi e generatore di acqua calda sanitaria;
- generatore multistadio o modulante e generatore di acqua calda sanitaria;
- generatore multistadio o modulante;
- teleriscaldamento;
- generatore tradizionale;
- teleriscaldamento e generatore di acqua calda sanitaria;
- generatore tradizionale e generatore di acqua calda sanitaria;
- generatore tradizionale e generatore a condensazione;
- generatore ad aria calda e generatore di acqua calda sanitaria.

Da questo elenco sono estratti i sistemi di generazione più diffusi, ovvero i tre spicchi del grafico in cui è riportato il numero delle unità:

- generazione a condensazione (410 unità);
- pompa di calore + generatore di ACS (295 unità);
- pompa di calore (280 unità).

Si può vedere come la tecnologia della pompa di calore e della caldaia a condensazione coprano circa il 74% dell'intero patrimonio edilizio studiato, pertanto saranno questi i sistemi studiati ed applicati ai modelli di impianto.

#### 4.2.1.1 Caldaia a condensazione

La caldaia a condensazione è attualmente una delle tecnologie più efficaci per lo sfruttamento del gas naturale al fine di coprire il fabbisogno di riscaldamento: mentre nelle caldaie tradizionali i gas combusti vengono normalmente espulsi ad una temperatura di circa 110°C e sono in parte costituiti da vapore acqueo, nella caldaia a condensazione i prodotti della combustione, prima di essere espulsi all'esterno, attraversano uno speciale scambiatore. Qui i fumi scambiano calore sensibile con l'acqua di ritorno dalla caldaia, inoltre il vapore acqueo condensa, cedendo parte del calore latente di condensazione all'acqua. In tal modo l'acqua nell'impianto viene preriscaldata, consentendo uno sfruttamento più efficace del combustibile, mentre i gas di scarico fuoriescono alla temperatura di circa 40°.

Fino ad alcuni anni fa non era pensabile poter raffreddare i fumi di combustione al di sotto del punto di rugiada in quanto la condensa avrebbe provocato gravi danni alla caldaia e/o al camino ad opera di fenomeni corrosivi. L'impiego di materiali resistenti alla corrosione, quali acciai inossidabili speciali, leghe di alluminio, fusioni in ghisa speciale e persino alcuni materiali plastici (per i condotti di scarico fumi), ha permesso il superamento di tale limite tecnico.

Il parametro fondamentale di questo sistema è il rendimento  $\eta$ , definito dalla seguente formula:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{m * PC}$$

Dove  $\dot{Q}$  è la potenza ottenuta (effetto utile),  $m$  la portata di combustibile e  $PC$  il potere calorifico. Quest'ultimo è la quantità massima di energia che si può ricavare convertendo completamente una massa unitaria di un vettore energetico in condizioni standard (in questo caso il gas naturale).

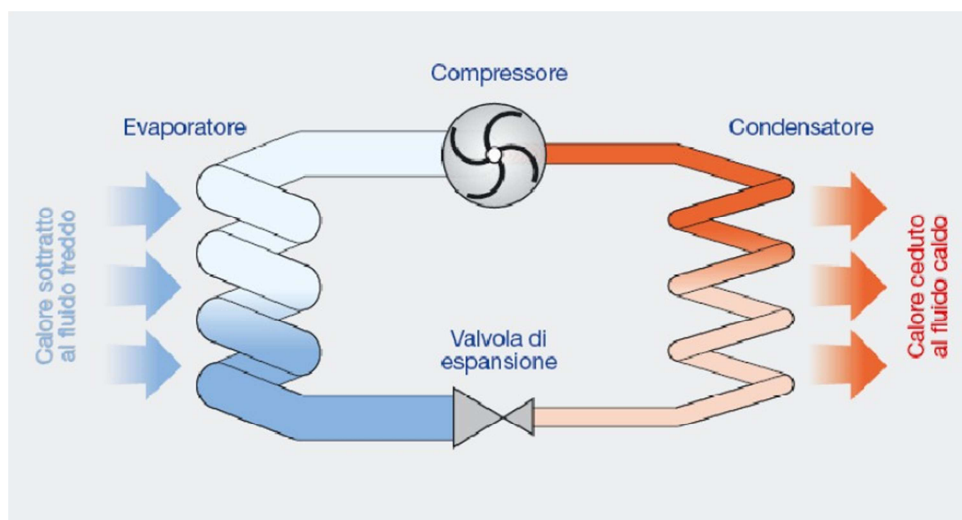
Storicamente il rendimento delle caldaie veniva definito rispetto al PCI, mentre con l'introduzione sul mercato della tecnologia a condensazione nel 1989 occorre stabilire come valutarne la prestazione. E' stato introdotto quindi il PCS, che a differenza del PCI

considera anche l'entalpia di transizione di fase contenuta nel vapore acqueo. La tecnologia quindi sfrutta il PCS ma, essendo il metodo di calcolo del rendimento ancora legato al PCI, si possono avere  $\eta$  maggiori di 1. Per il calcolo dei rendimenti si rimanda al capitolo 5.

#### 4.2.1.2 Pompa di calore e chiller

Le pompe di calore e chiller sono macchine termiche che operano trasferendo calore da una sorgente fredda ad una calda. Vengono definite pompe di calore quando sono utilizzate per la fase di riscaldamento, mentre il termine chiller si riferisce a quelle adibite alla sola funzione di raffrescamento.

All'interno di questa macchina un fluido frigorifero compie un ciclo scambiando calore con l'ambiente esterno e con quello interno. Nella figura 11 si può vedere il ciclo generico di questo sistema.



*Figura 11 - Ciclo generico di funzionamento di una pompa di calore<sup>a</sup>*

Lo schema di funzionamento di una pompa di calore generica si compone di un compressore, una valvola di espansione, un condensatore che cede calore al pozzo ad alta temperatura ed un evaporatore che invece assorbe calore dalla sorgente a bassa temperatura.

---

<sup>a</sup> Figura tratta dalle dispense del corso di Architettura Tecnica e Servizi Tecnologici del Politecnico di Milano, A.A. 2010/2011;

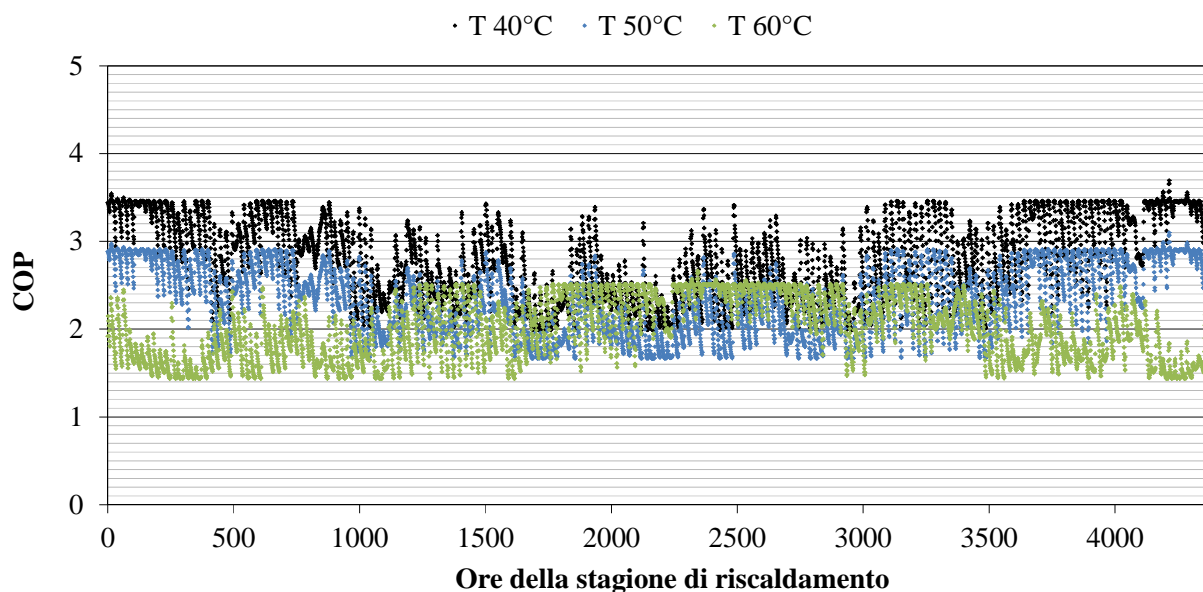
Il compressore di una pompa di calore genera la differenza di pressione che permette il ciclo: aspira il fluido refrigerante attraverso l'evaporatore (dove il fluido stesso evapora a bassa pressione assorbendo calore), lo comprime e lo spinge all'interno del condensatore (dove il fluido condensa ad alta pressione rilasciando il calore assorbito in precedenza). Dopo il condensatore, il fluido attraversa la valvola di laminazione che lo porta in condizione liquido/vapore (riduce la pressione del fluido), successivamente rientra nell'evaporatore ricominciando il ciclo.

Nella fase di funzionamento in pompa di calore della macchina viene assorbito calore dall'ambiente esterno (sorgente fredda) e ceduto a quello interno (pozzo caldo). Invece nella stagione estiva si sottrae calore all'ambiente interno (sorgente fredda) che viene ceduto all'ambiente esterno (pozzo caldo). Pertanto nel primo caso l'effetto utile è al condensatore e nel secondo all'evaporatore.

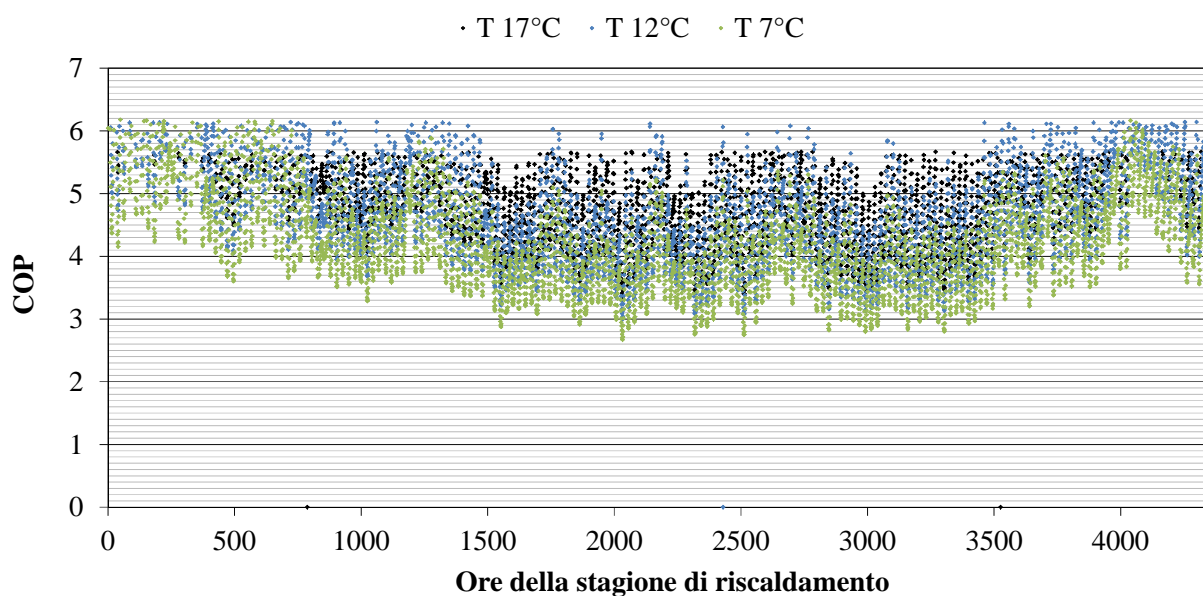
La tecnologia consente lo scambio di calore con una sorgente o pozzo esterno che può essere aria o acqua. Nel caso dell'aria la macchina presenta un'unità esterna dotata di ventilatore, nella quale avviene lo scambio termico con il fluido frigorifero. Se invece si considera come fonte l'acqua, lo scambio energetico avverrà fra il fluido frigorifero ed un circuito alimentato ad acqua.

Queste sorgenti o pozzi esterni differiscono tra loro per il rendimento, che aumenta con il diminuire della differenza tra la temperatura richiesta all'interno e quella esterna. L'aria presenta basse temperature invernali ed alte estive, risultando quindi la fonte che presenta le peggiori performance. L'acqua invece, avendo minori sbalzi termici rispetto all'aria esterna, garantisce delle prestazioni migliori, che dipendono dalla fonte di approvvigionamento. Ad esempio l'acqua proveniente dalla falda acquifera avrà una prestazione migliore di quella derivante da un circuito geotermico, in quanto diminuisce la differenza di temperatura. Per il calcolo del rendimento di questo sistema si rimanda al capitolo 5.

Nelle figure 12 e 13 sono riportati valori del COP e dell'EER considerando l'aria come sorgente e valutando tre diverse temperature di mandata richieste.



*Figura 12 - Valori orari del COP nella stagione di riscaldamento (dal 15 ottobre al 15 luglio) valutati per tre diverse temperatura di mandata, 40°C (nero), 50°C (azzurro) e 60°C (verde)*



*Figura 13 - Valori orari dell'EER nella stagione di raffrescamento (dal 15 luglio al 15 ottobre) valutati per tre diverse temperatura di mandata, 17°C (nero), 12°C (azzurro) e 7°C (verde)*

In entrambe le figure si può vedere come il rendimento peggiori all'aumentare del salto termico tra la temperatura richiesta dal sistema di emissione e quella della sorgente.



### 4.2.1.3 Chiller ad assorbimento

Questa tecnologia di refrigerazione si basa sull'evaporazione a bassa temperatura e pressione di un fluido, che assorbe calore dall'acqua da refrigerare. Il vapore prodotto viene asportato facendolo assorbire da una soluzione di bromuro di litio, dalla quale lo si separa nuovamente per riscaldamento. Il calore utilizzato per la separazione in questo caso viene fornito da collettori solari termici che si ipotizzano installati sulla copertura degli edifici considerati nelle simulazioni. La figura 14 riassume il ciclo di raffreddamento del chiller ad assorbimento.

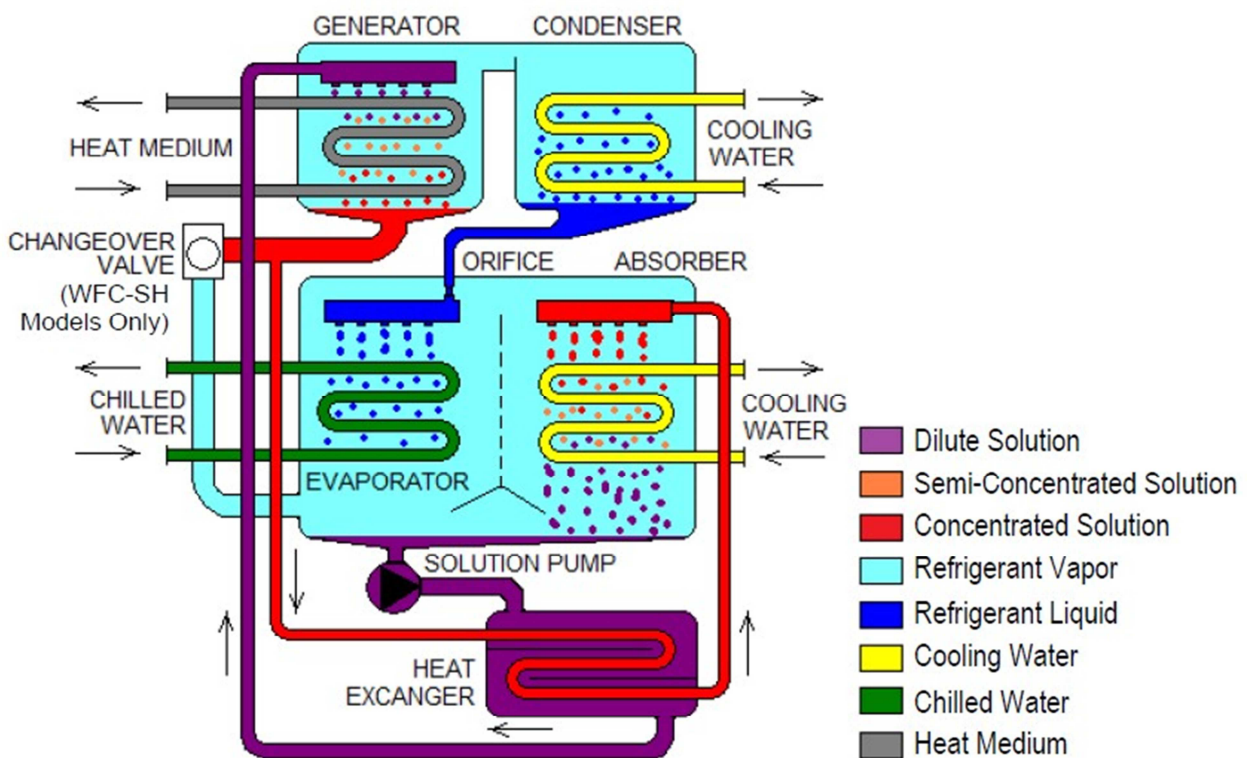


Figura 14 - Ciclo di funzionamento di un chiller ad assorbimento <sup>b</sup>

Al generatore la soluzione diluita di acqua e bromuro di litio, a contatto con il circuito di fluido caldo proveniente dai pannelli solari, viene portata ad ebollizione. L'ebollizione libera vapore acqueo e concentra la soluzione di bromuro di litio che viene raccolta e preraffreddata attraverso lo scambiatore di calore prima di essere immessa nell'assorbitore.

<sup>b</sup> Figura tratta dalla scheda tecnica del chiller ad assorbimento Water-Fired Chiller/Chiller-Heater, produttore Yazaky;

Il vapore refrigerante giunge al condensatore dove condensa sulla superficie delle serpentine del circuito di raffreddamento. Il calore di condensazione è rimosso dall'acqua di raffreddamento ed espulso attraverso la torre evaporativa. Il liquido refrigerante, raccolto nel condensatore, passa quindi nell'evaporatore dove la pressione è più bassa di quella del generatore e del condensatore per l'influenza esercitata dall'assorbitore; per questo motivo il liquido refrigerante, una volta entrato nell'evaporatore, bolle ed assorbe calore evaporando sulla superficie della serpentina del circuito del fluido da refrigerare.

Il vapore refrigerante ottenuto fluisce quindi nell'assorbitore, dove viene assorbito dalla soluzione concentrata di bromuro di litio, mentre il calore di condensazione è rimosso dall'acqua di raffreddamento. La soluzione diluita di bromuro di litio è poi pre-riscaldata nello scambiatore di calore prima di ritornare nel generatore.

Il chiller ad assorbimento funziona solo quando la temperatura del fluido in ingresso al generatore si trova entro un certo intervallo, quando il campo solare non è in grado di fornire fluido a questa temperatura il ciclo si ferma ed è necessaria quindi la presenza di un chiller integrativo quando il sistema ad assorbimento non è in funzione.

Il circuito della pompa di calore ad assorbimento ha una portata legata a quella del campo collettori, quindi occorre considerare che il dimensionamento del sistema è legato alla superficie di copertura disponibile. Per il calcolo dei rendimenti si rimanda al capitolo 5.

## 4.2.2 Sistema di emissione

Il DGR VIII/5796 del 2009 [4] stabilisce le tipologie di emissione per locali aventi altezza netta media maggiore o minore di 4 metri, per questo motivo è stata studiata l'altezza degli ambienti, ricavata sull'analisi del volume lordo e della superficie lorda; di seguito si riportano i risultati in tabella 16.

*Tabella 16 - Campioni studiati suddivisi in base all'altezza netta*

<b>Range</b>	<b>Campioni</b>
≤ 4 m	1,266 (95.12%)
> 4 m	65 (4.88%)

Dai dati ricavati si può vedere come la maggioranza degli edifici abbia un'altezza netta interna minore di 4 metri, per i quali il prospetto XXXIX del DGR VIII/5796 del 2009 [4] propone i seguenti terminali di emissione.

- radiatori su parete esterna isolata;
- radiatori su parete interna;
- termoconvettori;
- ventilconvettori;
- bocchette in sistemi ad aria calda;
- pannelli a parete;
- pannelli annegati a pavimento;
- pannelli annegati a soffitto;
- pannelli isolati annegati a pavimento.

Di questi elementi sono stati scartati i radiatori, in quanto l'alta temperatura di mandata che richiedono non è compatibile con le tipologie di generazione considerate. Per quanto riguarda gli altri sistemi si ipotizza che in un edificio ad uso ufficio i terminali di emissione si trovino nel controsoffitto, in modo da avere le pareti libere e da poter utilizzare un pavimento sopraelevato per l'alloggiamento dell'impianto elettrico.

I ventilconvettori sono molto utilizzati negli uffici moderni, mentre i pannelli radianti sono una tecnologia in via di sviluppo che presenta un buon funzionamento in abbinamento ad un generatore in pompa di calore, data la bassa temperatura di mandata che richiedono.

Queste considerazioni hanno portato all'utilizzo come terminali di ventilconvettori e pannelli radianti a controsoffitto.

Il rendimento di questi sistemi si ottiene sulla base della norma UNI-TS 11300/parte 2 [22], della quale si riporta un estratto in tabella 17.

*Tabella 17 - Rendimenti dei terminali di erogazione in funzione del carico specifico*

Terminali di erogazione del calore	Carico termico specifico [W/m <sup>3</sup> ]		
	< 4	4 ≤ x ≤ 10	> 10
Ventilconvettori	0.96	0.95	0.94
Pannelli radianti a soffitto	0.97	0.95	0.93

Per quanto riguarda invece la temperatura di mandata ai terminali sono state scelti i seguenti valori:

- ventilconvettori: riscaldamento 50 °C , raffrescamento 7°;
- pannelli radianti a soffitto: riscaldamento 40 °C , raffrescamento 17°.

### 4.2.3 Sistema di regolazione

Il rendimento del sistema di regolazione si ottiene sulla base della norma UNI-TS 11300/parte 2 [22], della quale si riporta un estratto in tabella 18.

*Tabella 18 - Rendimenti di regolazione in funzione del sistema di emissione*

<b>Sistema di emissione</b>	<b>Rendimento</b>
Ventilconvettori	0.97
Pannelli integrati nelle strutture edilizie e disaccoppiati termicamente	0.96
Pannelli annegati nelle strutture edilizie e non disaccoppiati termicamente	0.94

Per quanto riguarda questo sistema si è optato per una regolazione di tipo climatico con regolatore di zona o ambiente, in quanto sono quelle che vengono frequentemente utilizzate nelle moderne costruzioni.

L'ipotesi progettuale per gli uffici è quella di utilizzare una regolazione di tipo climatica a zona con regolatore con banda proporzionale 1°C, il cui rendimento si ricava dalla tabella a seconda della tipologia del sistema di emissione.

#### 4.2.4 Sistema di distribuzione

Il rendimento del sistema di distribuzione si ottiene sulla base della norma UNI-TS 11300/parte 2 [22], della quale si riporta un estratto in tabella 19.

*Tabella 19 - Rendimento di distribuzione in funzione del numero di piani*

<b>Numero di piani</b>	<b>Rendimento</b>
1	0.936
2	0.947
3	0.958
4	0.969
5 e più	0.98

Considerando che stiamo trattando soltanto un impianto centralizzato con distribuzione verticale, il rendimento si calcola sulla base del numero di piani dell'edificio.

#### 4.2.5 Ventilazione meccanica

L'impianto di ventilazione meccanica è stato dimensionato secondo i minimi previsti dalla norma UNI 10339 [23], che prevede per gli edifici ad uso ufficio un ricambio d'aria di 40 m<sup>3</sup>/ora per persona e ne definisce l'indice di affollamento.

La presenza del recuperatore di calore è resa obbligatorio per alcuni casi dal D.P.R. 412/93 [19], in funzione della portata richiesta e delle ore di accensione dell'impianto. In questa trattazione si sceglie di applicarla a tutte le tipologie di edificio, essendo un elemento imprescindibile nella progettazione di un impianto di ventilazione efficiente.

Il sistema ipotizzato è quello di avere elementi localizzati nella varie zone dell'edificio, che siano in grado di ricambiare l'aria localmente. Queste macchine saranno dotate di uno scambiatore entalpico per diminuire la differenza di temperatura tra l'aria immessa e quella espulsa. I flussi di aria in ingresso ed in uscita dall'ambiente interno sono posti a contatto tra di loro, in modo che da preriscaldare in inverno e preraffreddare in estate l'aria da introdurre all'interno dell'edificio.

L'effetto utile dello scambiatore è quindi sulla temperatura dell'aria immessa, che va ad influire sul carico di energia termica globale dell'involucro. Per quanto riguarda l'efficienza del recuperatore si è scelto di partire dal minimo valore di efficienza del 75% proposto dalla norma SIA 382/1 [24] per il recuperatore di calore degli impianti di ventilazione.

Alla luce di quanto esposto finora, dopo una ricerca sui valori proposti dai principali produttori, si è scelto di considerare un valore base del recuperatore di calore pari all'87% e di valutare l'impatto sui consumi dell'edificio utilizzando invece una macchina con un'efficienza del 95%. Per il calcolo degli effetti sulla temperatura in ingresso all'ambiente interno dei differenti rendimenti si rimanda al capitolo 5.

#### 4.2.6 Acqua calda sanitaria

La categoria di edifici ad uso ufficio ha una bassa richiesta di acqua calda sanitaria, definito dalla norma UNI-TS 11300/parte 2 [22] pari a  $0,2 \text{ l/m}^2\text{G}$ , ovvero litri al  $\text{m}^2$  per il numero dei giorni mensili di occupazione. Considerata la bassa richiesta di acqua calda sanitaria si ipotizza una produzione localizzata in corrispondenza dei punti dove richiesta (tipicamente i servizi igienici o una zona ristoro).

Si valutano due differenti sistemi di produzione, ovvero l'utilizzo di bollitori alimentati a gas naturale oppure l'installazione di pompe di calore ad aria. Si rimanda al capitolo 5 per la definizione del fabbisogno e dei rendimenti.

Si è scelto di non studiare l'applicazione di un impianto solare termico per il soddisfacimento del fabbisogno di acqua calda sanitaria. L'installazione di tale sistema avrebbe richiesto la realizzazione di un serbatoio inerziale di una certa entità e di un sistema di distribuzione, ma risulterebbe una soluzione progettuale problematica e poco efficace rispetto alla produzione localizzata dell'acqua calda sanitaria.



#### 4.2.7 Impianto solare fotovoltaico

Si sceglie di valutare l'installazione di un impianto solare fotovoltaico con moduli policristallini sulla copertura dell'edificio e di studiarne la produttività. Si studia questa tecnologia fotovoltaica in quanto risulta essere una delle più diffuse sul mercato.

L'energia elettrica prodotta andrà a diminuire il fabbisogno dell'edificio. Si ipotizza che l'impianto venga progettato per l'autoconsumo e non vi sia quindi la vendita alla rete, tutto ciò che viene prodotto è consumato in loco. L'energia fornita viene utilizzata per alimentare l'impianto di climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio, mentre non si considerano altri usi come l'illuminazione.

Nelle successive configurazioni dell'impianto si ipotizzerà prima l'assenza di questo sistema e successivamente due livelli di rendimento, il primo in cui vengono utilizzati dei moduli fotovoltaici aventi una potenza nominale 250 W mentre il secondo da 345 W. Per il modello di calcolo della produttività di questo sistema si rimanda al capitolo 5.

## 4.3 Definizione delle misure di efficienza energetica e dei parametri

L'analisi di questi sistemi impiantistici ci ha portato a definire le tipologie base e le loro possibili migliorie. Questi sistemi sono in se misure di efficienza energetica e come tali saranno trattati, in quanto influiscono direttamente con le loro prestazioni sul fabbisogno di energia primaria globale dell'edificio.

La condizione base del sistema di generazione sarà definita in seguito, qui sono riportate le possibilità studiate; la tipologia di emissione dipende direttamente dalla scelta del componente precedente, così come il rendimento di regolazione. Il sistema di distribuzione invece è legato al numero di piani dell'archetipo morfologico considerato.

Per quanto concerne invece i sistemi di ventilazione meccanica con recuperatore, produzione di acqua calda sanitaria ed impianto solare fotovoltaico, le condizioni di partenze e le possibili migliorie sono state definite nei precedenti paragrafi di questo capitolo.

Nelle tabelle 20 e 21 si riportano l'elenco delle misure di efficienza energetica ed i loro parametri.

*Tabella 20 - Misure di efficienza energetica per i sistemi di generazione, emissione, regolazione e distribuzione*

<b>Cod.</b>	<b>Generazione</b>	<b>Emissione</b>	<b>Regolazione</b>	<b>Distribuzione</b>
G	pompa di calore invertibile aria-acqua	pannelli radianti a soffitto	climatica più zona con banda proporzionale 1°	verticale
H	pompa di calore invertibile acqua-acqua	pannelli radianti a soffitto	climatica più zona con banda proporzionale 1°	verticale
I	caldaia a condensazione e chiller	ventilconvettori	climatica più zona con banda proporzionale 1°	verticale
L	caldaia a condensazione e chiller ad assorbimento	ventilconvettori	climatica più zona con banda proporzionale 1°	verticale

**Tabella 21 - Misure di efficienza energetica legate a ventilazione, fotovoltaico ed acqua calda sanitaria con i rispettivi parametri**

<b>Cod.</b>	<b>Misura di efficienza energetica</b>	<b>Parametro</b>	<b>Simbolo</b>	<b>Valore base</b>	<b>Prima miglioria</b>	<b>Seconda miglioria</b>
M	Ventilazione con recuperatore	Efficienza del recuperatore	$\eta$	0.87	0.95	-
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco nominale impianto	W	-	250	345
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Vettore energetico	-	Gas	PdC	-

Si possono vedere le misure di efficienza energetica studiate, che corrispondono alla configurazione impiantistica globale. Nella tabella 20 sono riportate le quattro possibilità per le combinazioni dei sistemi di generazione, emissione, regolazione e distribuzione, mentre nella 21 si trovano gli altri componenti dell'impianto.

L'applicazione sugli archetipi morfologici delle misure di efficienza energetica riportate nel capitolo 3 (corrispondenti alle tecnologie d'involucro) e di quelle riportate in questo (corrispondenti agli archetipi impiantistici) permette di definire il comportamento energetico del sistema edificio-impianto.

Nel prossimo capitolo verrà descritta la modellazione di quanto trattato finora, in modo da arrivare a calcolare i consumi dei sistemi edificio-impianto che saranno simulati.

## CAPITOLO 5

### MODELLAZIONE ENERGETICA

Nei capitoli precedenti sono state definiti gli archetipi morfologici e le misure di efficienza energetica (tecnologie d'involucro e archetipi impiantistici), ora si illustra la metodologia utilizzata nella costruire il sistema edificio-impianto, in modo da poter calcolare la prestazione energetica. Viene riportata inoltre la modellazione dei sistemi descritti al capitolo 4.

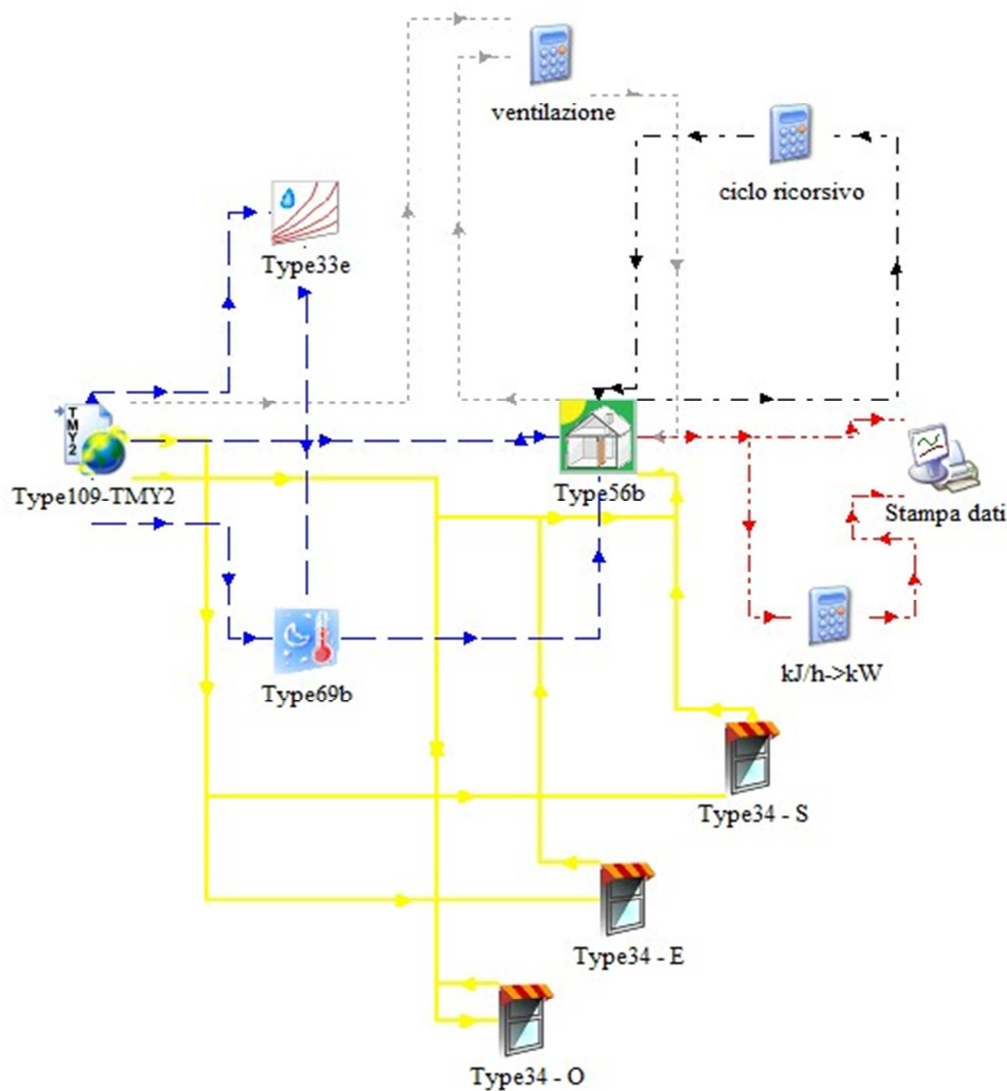
Gli strumenti utilizzati in queste modellazioni sono i software Trnsys, Window ed Excel. Il lavoro descritto in questo capitolo è stato realizzato principalmente con Trnsys, mentre Window è stato utilizzato per i serramenti ed Excel per elaborare i dati ricavati da Trnsys e nello studio degli impianti. Per questo motivo si approfondisce l'utilizzo del software Trnsys rispetto agli altri.

## 5.1 Software Trnsys

Il software Trnsys (Transient System Simulation Tool) è uno strumento per la simulazione di sistemi energetici in regime dinamico sviluppato presso il Solar Energy Lab dell'Università del Wisconsin-Madison ed il Solar Energy Application Lab dell'Università del Colorado, dal 1975 è divenuto un software commerciale. Al suo interno contiene dei codici che permettono di identificare il comportamento energetico di componenti di involucro e d'impianto, rendendo quindi possibile simulare il funzionamento del sistema edificio-impianto sottoposto a condizioni al contorno variabili nel tempo. La struttura di Trnsys si articola in due elementi fondamentali: il motore di risoluzione e la libreria dei componenti. L'utente ha la possibilità di scomporre il problema complesso in esame in problemi più "semplici", dalla cui soluzione combinata si ottiene il risultato. Trnsys presenta quindi una struttura molto flessibile e trasparente in quanto è possibile valutare il valore delle variabili di sistema durante le fasi della simulazione (come ad esempio temperatura, portata, calore trasferito). In riferimento agli studi effettuati in questa tesi, è stata utilizzata la versione 16 del software e due interfacce principali, ovvero Trnbuild e Simulation Studio, che saranno descritti nei seguenti paragrafi.

### 5.1.1 Sistema edificio-impianto

L'analisi del comportamento energetico dell'edificio viene sviluppata con Simulation Studio, l'interfaccia grafica del programma mediante la quale vengono selezionati i componenti (type) ed i collegamenti necessari per la simulazione del comportamento energetico in esame. In figura 15 si può vedere lo schema utilizzato per lo studio del comportamento energetico dell'edificio privo di impianti, ad eccezione della ventilazione meccanica.



**Figura 15 - Type ed i loro collegamenti in Simulation Studio per il calcolo della richiesta di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva**

Questa combinazione di type modella il funzionamento del sistema edificio-impianto. Al suo interno sono riportati i dati dell'archetipo morfologico, delle soluzioni tecnologiche e della conformazione d'impianto considerati. Lo scopo è di ottenere i carichi sensibili nell'arco di un anno tipo. Di seguito viene descritto il funzionamento dei singoli type.

Il type 109-TMY2 serve a leggere ed elaborare opportunamente i dati climatici provenienti da un file esterno. Le informazioni climatiche si riferiscono a quelle elaborate dalla stazione meteorologica dell'aeroporto di Linate e rappresentano un anno tipo costruito sulla base di una statistica trentennale.

Il type 33e utilizza in ingresso la temperatura di bulbo secco e la percentuale di umidità dal type 109 -TMY2 per calcolare la temperatura di rugiada. Il type 69b invece presenta come input i dati sulla temperatura esterna, la radiazione diffusa e quella riflessa al terreno ottenuti dal type 109-TMY2 e la temperatura di rugiada precedentemente ricavata per calcolare la temperatura fittizia della volta celeste.

I dati climatici calcolati finora vengono applicati al modello dell'edificio grazie al type 56b, punto cardine della simulazione. Questo componente è in grado di leggere i dati climatici ed applicarli al modello di edificio creato con Trnbuild, il cui funzionamento sarà approfondito in seguito.

Il type 34 serve a simulare il comportamento delle schermature solari, valutando la diminuzione della quantità di radiazione solare direttamente incidente sui serramenti ed il fattore di vista della superficie rispetto alla volta celeste. E' stato necessario introdurre una copia per ogni differente orientamento sul quale sono applicate le schermature, in questo caso si è scelto di simulare frangisole sui lati sud, est ed ovest secondo quanto esposto al capitolo 4.

La calcolatrice "ventilazione" simula il comportamento della ventilazione meccanica, operando sulla temperatura dell'aria in ingresso all'edificio; per il funzionamento e le equazioni di questo componente si rimanda alla modellazione del sistema di ventilazione meccanica con recuperatore di calore.

La calcolatrice "ciclo ricorsivo" invece serve a definire il periodo di accensione e spegnimento degli impianti di riscaldamento. Questo elemento controlla se l'impianto è in funzione sulla base dei limiti imposto dalla normativa. Si considera come riferimento il D.P.R. 412/93 [19], che stabilisce il periodo di accensione degli impianti di riscaldamento. Questo si estende dal 15 ottobre al 15 aprile per la zona climatica E, che rappresenta la maggior parte del territorio della Lombardia.

All'interno del type troveremo quindi le seguenti equazioni che regolano accensione e spegnimento dell'impianto di climatizzazione, rispettivamente per la stagione invernale ed estiva.

$$sch * (LE(TIME, 2520) + gt(TIME, 6889) * lt(TIME, 11280) + GE(TIME, 15649))$$

$$sch * (gt(TIME, 2520) * lt(TIME, 6889) + gt(TIME, 11280) * lt(TIME, 15649))$$

I numeri all'interno delle parentesi rappresentano due anni di funzionamento (inizio all'ora 0 e fine alla 17,520) mentre il termine "time" l'ora considerata in quel momento del calcolo. La funzione LE dà come risultato 1 se il valore del primo termine nella parentesi è minore o uguale a quello del secondo, altrimenti dà risultato 0, LT ha lo stesso funzionamento ma considera valori strettamente minori. GE invece dà risultato 1 se il valore del primo termine è maggiore o uguale a quello della secondo, in caso contrario 0, GT ha lo stesso funzionamento ma considera valori strettamente maggiori. In questo modo si stabilisce se il valore globale della parentesi per il quale moltiplicare sch sarà 1 o 0 in funzione del periodo dell'anno in cui ci si trova, in quanto gli impianti di riscaldamento possono esseri accesi dal 15 ottobre al 15 aprile nella zona E secondo il D.P.R. 412/93 [19]. Il parametro sch corrisponde allo schedule impostato all'interno di Trnbuild; questo termine verifica se la teemperatura dell'aria interna rispetta i valori del set point impostato. In caso negativo il valore che lo schedule restituisce viene utilizzato dal software per calcolare quanta potenza l'impianto deve fornire. Il D.P.R. 412/93 [19] stabilisce per la zona E un numero massimo di 14 ore di accensione per l'impianto, su questa base si imposta il funzionamento dell'impianto nei giorni lavorativi settimanali dalle ore 7 alla 19.

### 5.1.2 Modello dell'edificio

L'edificio viene modellato con Trnbuild, una delle interfacce grafiche di Trnsys. Il primo passo è quello di stabilire quante siano le zone termiche, definite come una parte dell'edificio, cioè un insieme di ambienti a temperatura controllata o climatizzati, che abbia una sufficiente uniformità spaziale nella temperatura dell'aria e per la quale si ha un unico e comune valore prefissato della grandezza controllata (temperatura). Una zona termica deve avere inoltre la stessa tipologia di occupazione e destinazione d'uso ed essere servita da un'unica tipologia di sistema impiantistico.



Per gli edifici ad uso ufficio non è quindi necessario modellare più di una zona, tenendo conto che si tratta di casi virtuali e quindi di modelli semplificati, sui quali valutazioni più dettagliate appesantirebbero il calcolo senza apportare reali benefici in termini di risultati.

Le soluzioni tecniche che definiscono l'involucro della zona termica possono essere opache o trasparenti, secondo quanto descritto al capitolo 3. Le prime vengono studiate utilizzando le funzioni di trasferimento dell'energia termica. Il vantaggio di questo metodo è che permette di valutare i flussi termici scambiati in un regime transitorio (così da poter definire correttamente il comportamento estivo), ma non è possibile avere informazioni sul profilo di temperatura all'interno della stratigrafia delle pareti (non è possibile ad esempio fare delle valutazioni sulla condensa interstiziale).

Lo studio degli elementi trasparenti è stato effettuato con il software Window, che permette di modellare i serramenti ed importarli all'interno di Trnbuild. Il vantaggio dell'utilizzo di questo software è la possibilità di valutare il comportamento delle vetrazioni tenendo conto delle variazioni nell'inclinazione dei raggi solari.

Vengono definite anche le superfici delle partizioni interne, in quanto hanno effetto sull'inerzia termica dell'edificio.

I guadagni interni per questa categoria edilizia sono stati considerati pari a  $6 \text{ W/m}^2$ , in accordo alla norma UNI-TS 11300/parte 2 [22].

All'interno di Trnbuild sono impostati i parametri relativi all'impianto di climatizzazione e ventilazione.

Si stabilisce la potenza dell'impianto di climatizzazione estiva ed invernale come illimitata e vengono impostate le temperature all'interno della zona termica.

- stagione invernale, orario di lavoro - temperatura minima  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- stagione invernale, orario non lavorativo - temperatura minima  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- stagione estiva, orario di lavoro - temperatura massima  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- stagione estiva, orario non lavorativo - temperatura massima  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Per quanto riguarda la ventilazione si rimanda alla sua modellazione, descritta successivamente in questo capitolo.

Vengono studiate le infiltrazioni all'interno dell'edificio, che si dividono tra quelle ad impianto spento e quelle ad impianto acceso. Le seconde sono state considerate trascurabili, in quanto nei momenti in cui l'impianto è in funzione si crea una leggera sovrappressione interna, che tende a minimizzare le infiltrazioni dall'esterno. Le perdite ad impianto spento sono state calcolate con le formule ed i valori proposti nella norma UNI EN ISO 13789 [25], arrivando a definire delle infiltrazioni  $m$  ad impianto spento pari a 0.14 volumi/ora calcolate con la seguente formula.

$$m = V * n_{50} * e$$

Dove  $V$  è il volume della zona termica,  $n_{50}$  il flusso di ricambio d'aria ad una pressione di 50 Pa pari a 2 [h<sup>-1</sup>] ed  $e$  il coefficiente di schermatura pari 0.07 per gli edifici considerati.

### 5.1.3 Simulazioni

Per ogni simulazione vengono calcolati i dati relativi alla temperatura dell'ambiente interno dell'edificio ed ai carichi termici sensibili ora per ora. Per ridurre gli effetti delle condizioni iniziali (si ipotizza una temperatura interna di partenza) vengono simulati due anni di funzionamento e considerato solamente il secondo per le successive analisi. I dati saranno quindi utilizzati per arrivare a definire il consumo energetico finale del sistema edificio impianto.

## 5.2 Modellazione degli impianti

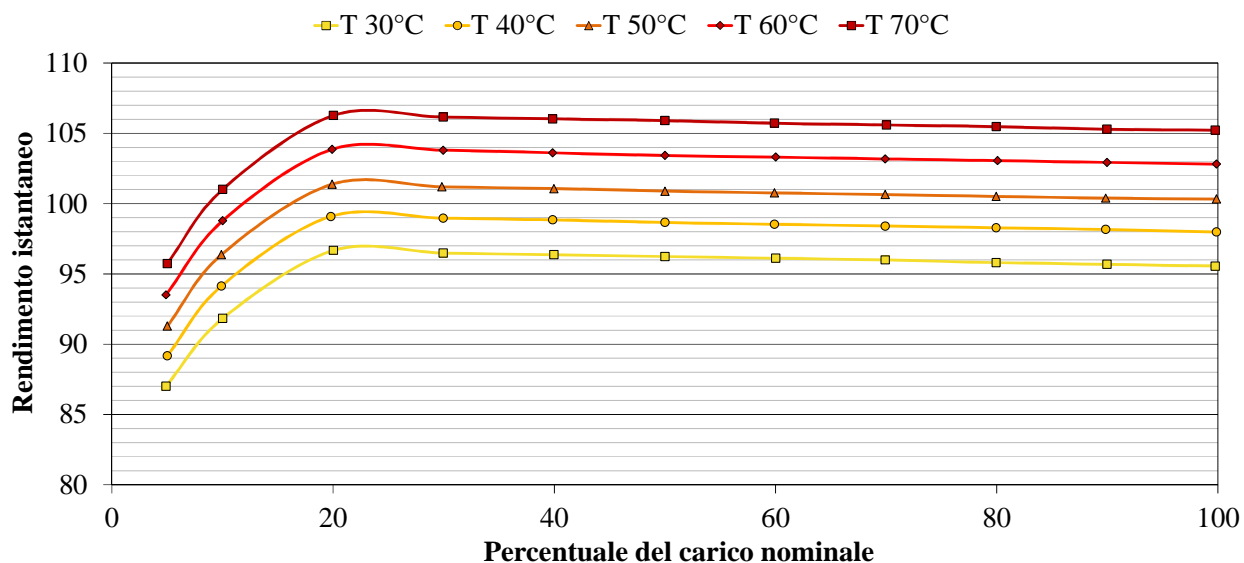
In questo paragrafo viene descritta la modellazione e schematizzazione degli impianti definiti al capitolo 4, in modo da poterne calcolare i parametri connotanti e le loro variazioni.

### 5.2.1 Caldaia a condensazione

Il parametro che definisce la prestazione di questa tecnologia dipende dalla temperatura richiesta dal sistema di emissione e dal carico nominale. Nel capitolo 4 è stata definita la richiesta termica dei ventilconvettori, la tipologia di emissione che si ipotizza applicabile a questo sistema di generazione.

Occorre ora stabilire il carico nominale, ovvero la richiesta energetica al generatore rispetto a quanta ne può effettivamente produrre.

La taglia del generatore viene scelta per soddisfare un carico di picco, ma durante il periodo di funzionamento il fabbisogno subirà continue variazioni. Questo implica che se la richiesta diminuisce la temperatura di ritorno alla caldaia sarà più bassa e quindi si avrà una condensazione più efficace, in questo modo viene sfruttata una parte maggiore del PCS. Il rendimento presenterà una leggera diminuzione avvicinandosi al 100% del carico nominale (avvicinandosi al 100% del carico nominale la temperatura di ritorno sarà più alta e quindi una condensazione leggermente meno efficace) come si può vedere dalla figura 16 ricavata dall'articolo 06/12 "Analisi delle prestazioni stagionali delle caldaie a condensazione applicate a diversi tipi di impianti, in varie zone climatiche italiane" del 60° Congresso Nazionale ATI di Roma 2005 [26].



*Figura 16 - Variazione del rendimento della caldaia a condensazione in funzione della percentuale del carico nominale e della temperatura di ritorno dal sistema di emissione*

Le curve in figura 16 descrivono l'andamento del rendimento in funzione della temperatura di ritorno dal sistema di emissione e della percentuale di carico. Ipotizzando una differenza tra mandata e ritorno pari a 10°C, sulla base della temperatura richiesta dal sistema di emissione e della percentuale di carico si ricavano i rendimenti. I valori così ricavati moltiplicano l'energia termica richiesta al sistema di generazione, arrivando ad ottenere il fabbisogno di energia primaria ora per ora.

### 5.2.2 Pompa di calore e chiller

Il parametro che definisce il rendimento di queste macchine è il Coefficient Of Performance (COP) per la pompa di calore e l'Energy Efficiency Ratio (EER) per il chiller:

$$COP = \frac{Q_{cond}}{P_{ele}} \quad EER = \frac{Q_{evap}}{P_{ele}}$$

Dove  $Q_{cond}$  e  $Q_{evap}$  sono rispettivamente l'energia termica scambiata al condensatore ed all'evaporatore, mentre  $P_{ele}$  è l'energia elettrica assorbita. L'energia termica scambiata al condensatore nel caso invernale ed all'evaporatore nel caso estivo, oltre che quella elettrica assorbita, vengono calcolate tramite delle funzioni che hanno come variabili la temperatura dell'aria esterna e quella di mandata dei terminali impiantistici. I dati sull'aria esterna vengono ricavati grazie a Trnsys, mentre per la mandata dei terminali impiantistici, si fa riferimento al capitolo 4.

Nella figure 17, 18, 19, 20 si può notare l'andamento del COP e dell'EER in funzione della temperatura del sistema di emissione e di quella della sorgente, che nei casi studiati può essere aria o acqua.

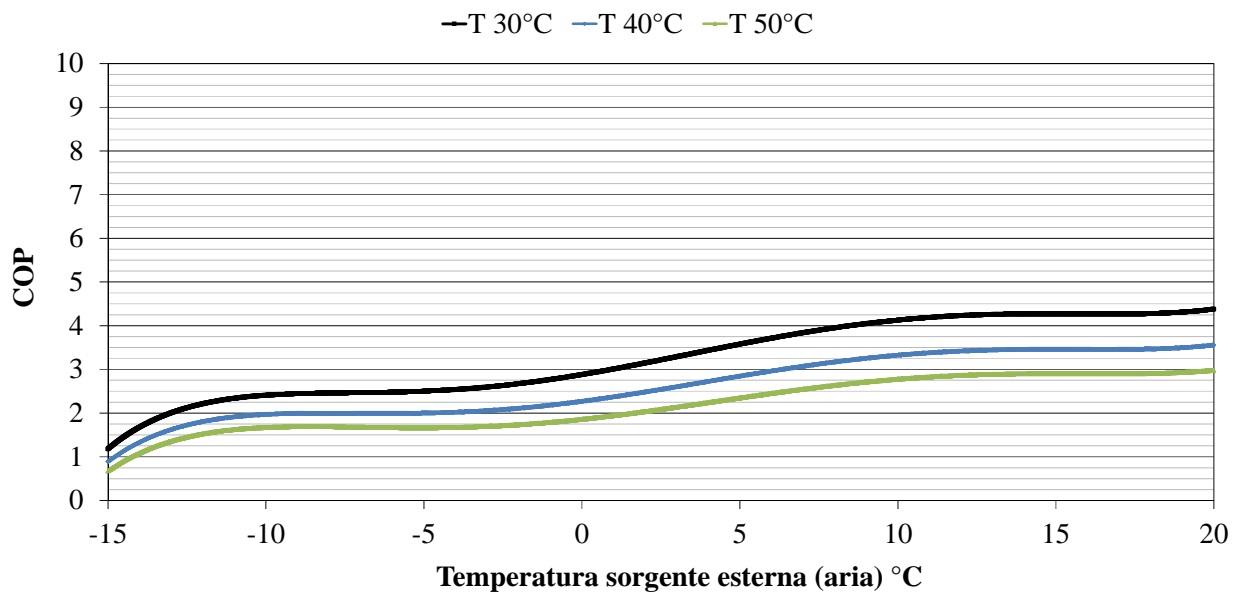


Figura 17 - Valori del COP (stagione invernale) in funzione della temperatura della sorgente esterna (aria) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 30°C (nero), 40°C (azzurro), 50°C (verde)

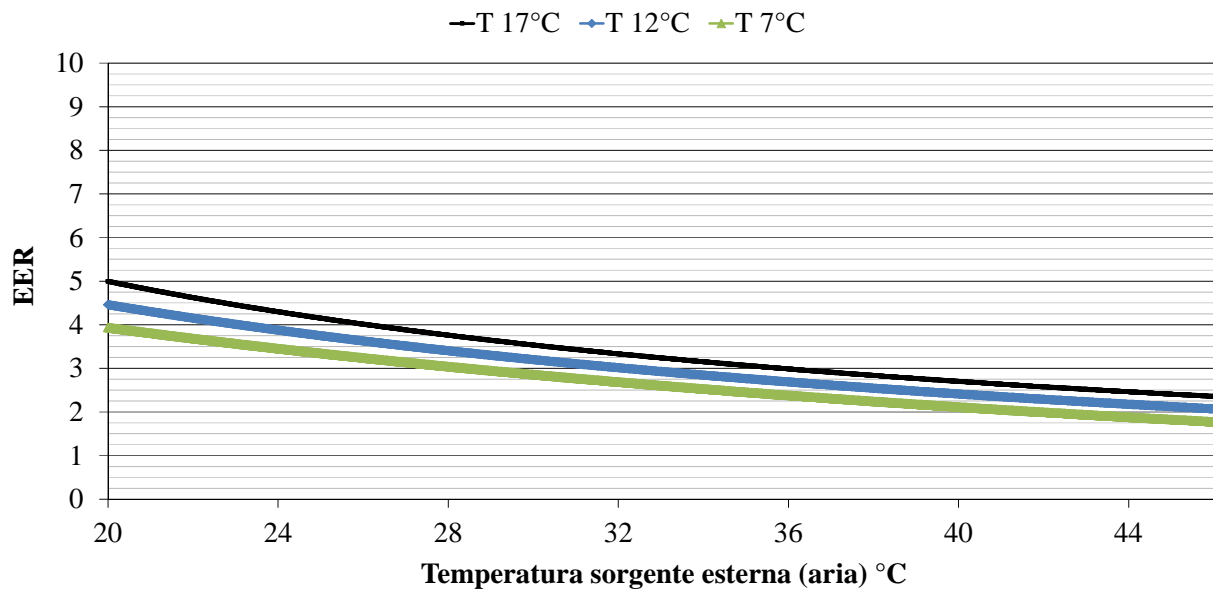
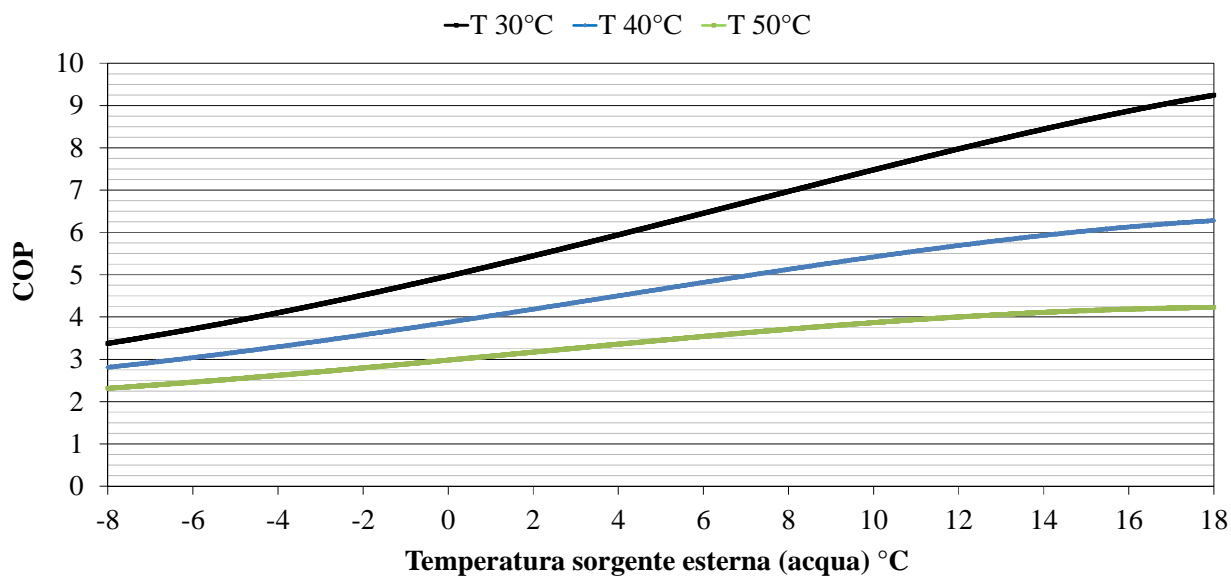
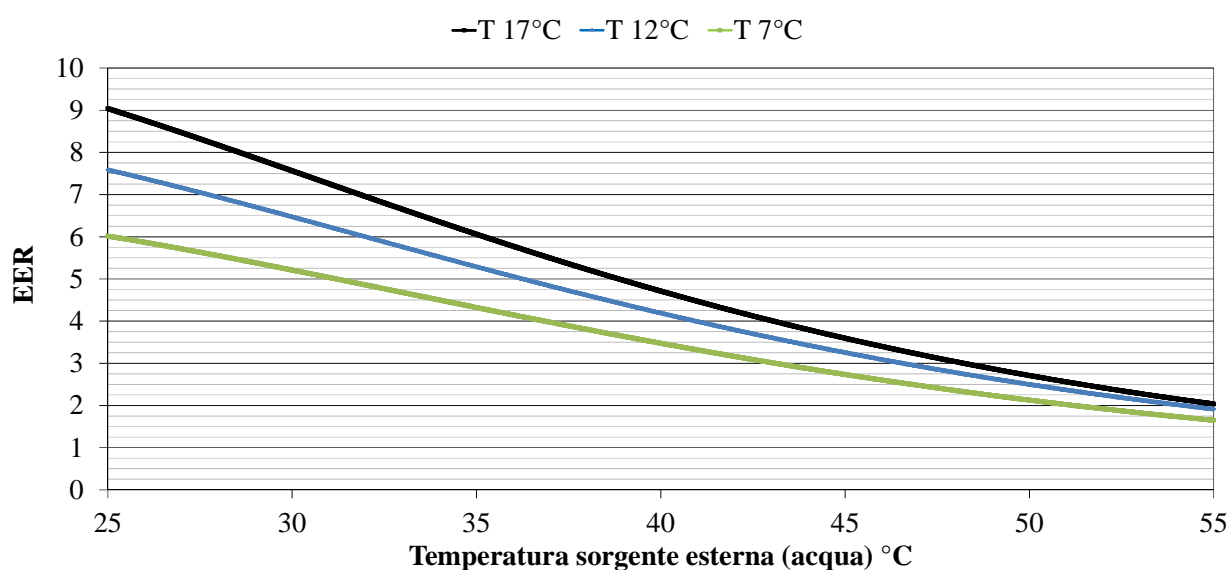


Figura 18 - Valori dell'EER (stagione estiva) in funzione della temperatura della sorgente esterna (aria) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 17°C (nero), 12°C (azzurro), 7°C (verde)



**Figura 19 - Valori del COP (stagione invernale) in funzione della temperatura della sorgente esterna (acqua) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 30°C (nero), 40°C (azzurro), 50°C (verde)**



**Figura 20 - Valori dell'EER (stagione estiva) in funzione della temperatura della sorgente esterna (acqua) e della mandata dell'impianto rispettivamente di 17°C (nero), 12°C (azzurro), 7°C (verde)**

Ricavati i COP e l'EER ora per ora, il fabbisogno termico ricavato dalle simulazioni viene diviso per questi parametri, definendo così i consumi di energia elettrica. Per arrivare alla primaria la si divide per il rendimento del sistema elettrico nazionale, pari a 0,41.

### 5.2.3 Chiller ad assorbimento

Il rendimento di queste macchine è legato alla potenza termica assorbita  $\dot{Q}_e$ , ovvero la capacità frigorifera e si calcola con le equazioni seguenti e grafici tratti dalla scheda tecnica<sup>c</sup>.

$$\dot{Q}_g + \dot{Q}_e = \dot{Q}_c$$

Questi termini identificano delle potenze, dove  $\dot{Q}_g$  indica quella termica fornita dal campo collettori,  $\dot{Q}_e$  l'effetto utile e  $\dot{Q}_c$  quella dissipata dalla torre evaporativa. Il campo collettori<sup>d</sup> viene modellato in Simulation Studio ed i dati relativi a portata e temperatura del circuito sono utilizzati per definire la produttività della macchina ad assorbimento.  $\dot{Q}_g$  e  $\dot{Q}_e$  si calcolano con le seguenti formule.

$$\dot{Q}_g = HIF * HMFCF * RHI$$

$$\dot{Q}_e = CCF * HMFCF * RCC$$

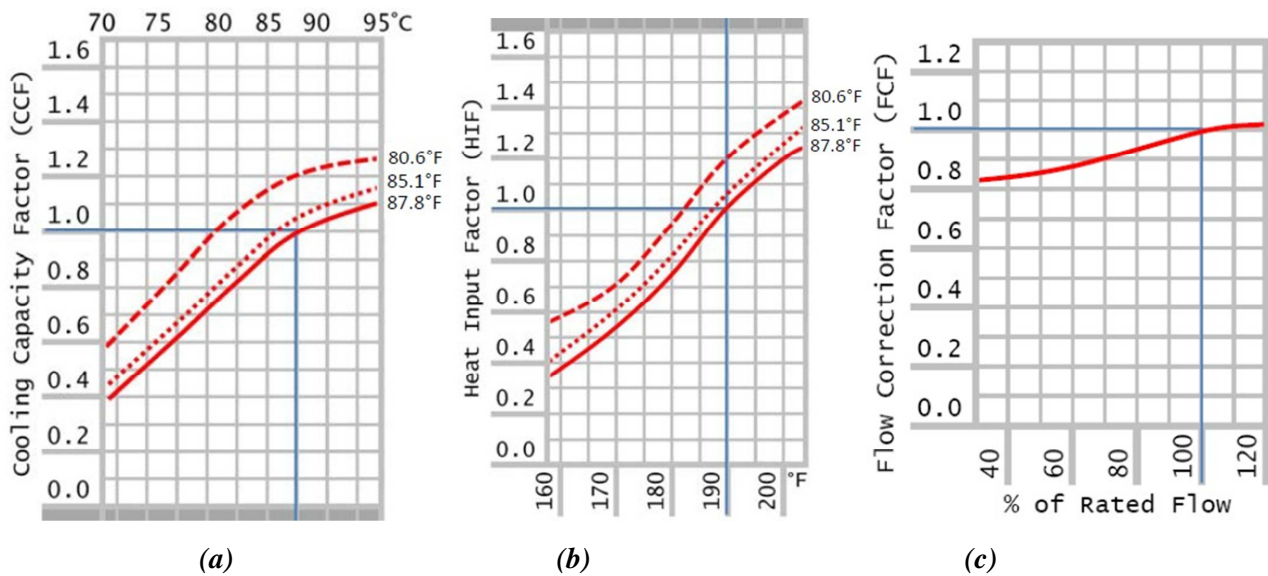
I coefficienti Heat Input Factor (HIF) e Cooling Capacity Factor (CCF) dipendono dalla temperatura dell'acqua di torre e del campo collettori, L'Heat Medium Flow Correction Factor (HMFCF) è in funzione della portata all'interno del campo collettori il Rated Heat Input (RHI) e la Rated Heating Capacity (RCC) sono stabilite da scheda tecnica. Per quanto riguarda i primi tre fattori HIF, CCF e HMFCF il loro valore è stabilito dai grafici riportati nella scheda tecnica, per i quali si riportano degli esempi con la figura 21.

---

<sup>c</sup> Equazioni e grafici tratti dalla scheda tecnica del chiller ad assorbimento Water-Fired Chiller/Chiller-Heater, produttore Yazaky;

<sup>d</sup> Dati tecnici dei pannelli solari termici da scheda tecnica del modello CSO 25 R Plus, produttore Riello;





**Figura 21 - Valore di CCF (a) e HIF (b) in funzione della temperatura media dell'acqua calda in ingresso dal campo collettori (ascisse) e della temperatura dell'acqua di raffreddamento della torre evaporativa (curve rosse); valore di FCF (c) in funzione della percentuale del flusso rispetto a quello nominale (ascisse)**

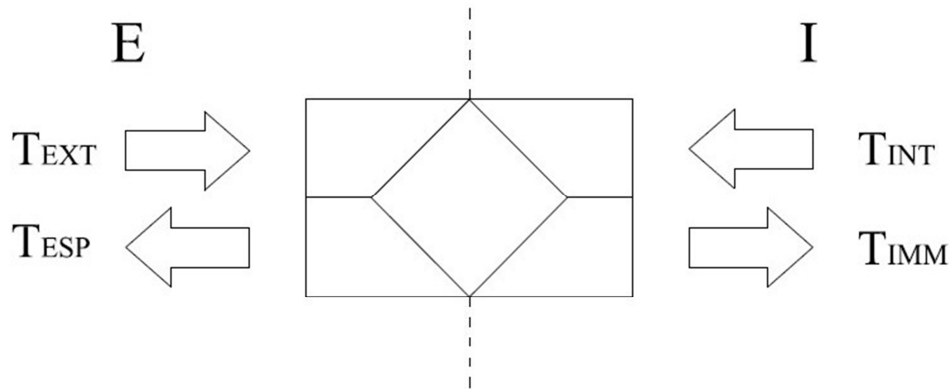
La figura 21 riporta i valori di CCF (a) e HIF (b) in funzione della temperatura media dell'acqua calda in ingresso dal campo collettori (ascisse) e della temperatura dell'acqua di raffreddamento della torre evaporativa (curve rosse), mentre i valori di FCF (c) sono espressi in funzione della percentuale del flusso rispetto a quello nominale (ascisse).

Si calcolano quindi ora per ora durante l'anno il fabbisogno dell'edificio e la produttività della macchina ad assorbimento. I consumi energetici del sistema ad assorbimento sono quelli elettrici della torre di raffreddamento e della pompa del campo collettori, fissati rispettivamente all'8% di  $\dot{Q}_c$  ed al 3% di  $\dot{Q}_g$ .

L'effetto utile  $\dot{Q}_e$  si esprime in termini di energia termica, da sottrarre al fabbisogno energetico per il raffreddamento in fase estiva. Il chiller ad assorbimento è legato alla portata e temperatura del fluido del circuito solare. Questo fatto definisce dei limiti a questo sistema, legati innanzitutto alla superficie del campo solare, che si ipotizza installato sulla copertura dell'edificio e quindi stabilisce la portata massima che si può ottenere sulla base della superficie disponibile di tetto. L'altro limite è rappresentato dal fatto che la macchina ad assorbimento lavora soltanto tra i 70 °C ed i 95 °C in ingresso dal campo solare, al di fuori del quale entra in funzione un chiller ausiliario ad aria.

### 5.2.4 Ventilazione meccanica

La ventilazione meccanica viene progettata come un elemento separato dal resto dell'impianto, in grado di effettuare il ricambio dell'aria e di recuperare il calore attraverso uno scambiatore; come si può vedere alla figura 22.



*Figura 22 - Schema di funzionamento dello scambiatore all'interno del sistema di ventilazione*

Nella figura 22 il lato "I" identifica l'ambiente interno, mentre quello "E" l'esterno, le temperature contrassegnate sono le seguenti.

- $T_{INT}$ , temperatura dell'ambiente interno;
- $T_{IMM}$ , temperatura dell'aria esterna immessa in ambiente interno dopo essere passata attraverso lo scambiatore;
- $T_{EXT}$ , temperatura dell'ambiente esterno;
- $T_{ESP}$ , temperatura dell'aria espulsa dal sistema all'esterno.

$T_{INT}$  e  $T_{EXT}$  vengono calcolate con Trnsys, mentre la  $T_{IMM}$  viene ricavata dalla seguente equazione.

$$T_{IMM} = ((T_{INT} - T_{EXT}) * \eta) + T_{EXT}$$

Questa formula è ricavata dalle equazioni che regolano il bilancio termico di uno scambiatore di calore, dove  $\eta$  rappresenta ne rappresenta il rendimento.

All'interno di Trnsys la calcolatrice legata alla ventilazione riporta questa equazione andando ad agire sulla temperatura dell'aria immessa nell'ambiente interno. L'effetto del rendimento di questo sistema è quello di variare il carico termico legato alla ventilazione nelle fasi di climatizzazione invernale ed estiva.

### 5.2.5 Acqua calda sanitaria

Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria prima di definire il rendimento del sistema occorre stabilire la procedura per il calcolo del fabbisogno, sulla base del DGR VIII/5796 del 2009 [4]. Si calcola la richiesta mensile di energia per l'acqua calda sanitaria,  $Q_{ACS}$  tramite la seguente formula:

$$Q_{ACS} = \rho * c * V_W * (\theta_{er} - \theta_0) * N * 10^{-3}$$

La massa volumica  $\rho$  e la capacità termica specifica  $c$  dell'acqua si assumono rispettivamente pari ad 1 kg/l e 1,162 Wh/kgK.  $V_W$  è il volume d'acqua richiesto durante il periodo di calcolo espresso in l/giorno. Le temperature  $\theta_{er}$  e  $\theta_0$  sono la temperatura di erogazione dell'acqua sanitaria e di ingresso dall'acquedotto. La prima è fissata a 40 °C, mentre la seconda ad 8° C da ottobre a febbraio e 12° C da marzo a settembre.  $N$  è il numero di giorni del mese considerato. Il valore di  $V_W$  si calcola con la formula seguente.

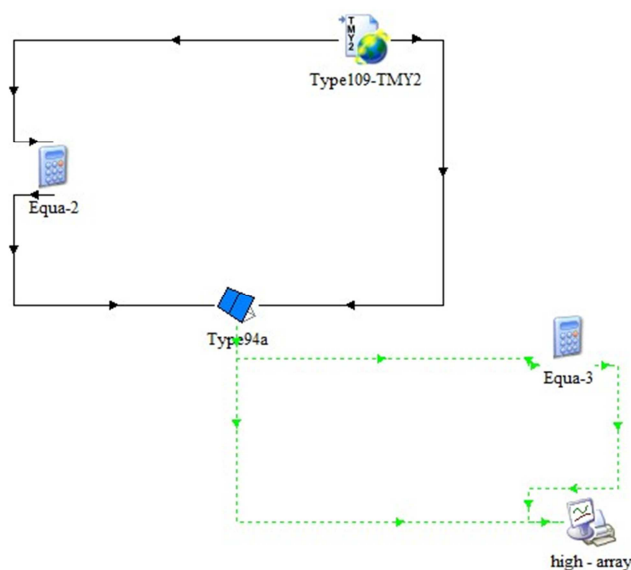
$$V_W = a * N_u$$

In accordo con la norma UNI-TS 11300/parte 2 [22] il termine  $a$  ha un valore di 20 l/G persona, dove  $G$  è il numero di giorni lavorativi nel mese.  $N_u$ , numero di persone, viene definito in base al fattore di affollamento per gli uffici ricavato dalla norma UNI 10339 [23]. Si considera il maggiore tra 0.06 persone/m<sup>2</sup> per gli uffici singoli mentre 0.12 persone/m<sup>2</sup> per gli open-space.

Una volta calcolati per ogni archetipo morfologico i fabbisogni annuali, si valuta l'utilizzo di una pompa di calore o di un sistema a condensazione, i cui rendimenti sono stabiliti nei precedenti paragrafi di questo capitolo.

## 5.2.6 Impianto solare fotovoltaico

L'impianto solare fotovoltaico è stato studiato con Thrsys per valutarne la produttività energetica, ovvero arrivare a capire ora per ora quanto può rendere l'impianto. Lo schema utilizzato in Simulation Studio è riportato alla figura 23.



*Figura 23 - Type ed i loro collegamenti in Simulation Studio per calcolare la produttività dell'impianto solare fotovoltaico*

All'interno del type94a vengono definite tutte le caratteristiche dell'impianto<sup>e</sup>, mentre i dati climatici vengono inseriti all'interno del type 109-TMY2. Il campo dei pannelli fotovoltaici si ipotizza installato sulla copertura dell'edificio, della quale è stata valutata la superficie utile. I moduli sono orientati a sud con un'inclinazione di 30°, distanziati tra di loro in maniera che non si ombreggino reciprocamente durante il giorno. Infine si applicano dei coefficienti per tenere conto delle perdite dell'impianto e rendere realistica la simulazione. Ottenuta la producibilità in termini energetici ora per ora dell'impianto, la si valuterà come un risparmio energetico sui consumi elettrici e quindi una diminuzione della richiesta di energia primaria.

---

<sup>e</sup> Le schede tecniche utilizzate sono quelle dei moduli fotovoltaici serie X, produttore SunPower e serie ND, produttore Sharp;

### 5.3. Definizione del fabbisogno di energia primaria

Utilizzando le metodologie di modellazione proposte in questo capitolo è possibile, per ogni archetipo morfologico, stabilire sulla base delle misure di efficienza energetica applicate e dei loro parametri (tecnologie d'involucro ed archetipi impiantistici) il fabbisogno di energia termica primaria del sistema edificio-impianto in termini di kWh/m<sup>2</sup> annuo.

Nel prossimo capitolo viene descritto il metodo di calcolo per ottenere il secondo valore di riferimento proposto dalla procedura, ovvero la valutazione economica delle misure di efficienza energetica, espressa in termini di €/m<sup>2</sup>.

## CAPITOLO 6

### METODOLOGIA VAN

Nei capitoli precedenti sono stati definite tutte le componenti che influiscono sulla prestazione energetica dell'edificio, mentre ora si vuole andare a valutare l'efficacia economica di queste misure, ovvero quelle che portano al minor esborso.

Il costo globale dell'edificio è valutato in termini di Valore Attuale Netto (abbreviato in VAN) ed espresso in €/m<sup>2</sup>. Si tratta di una metodologia molto diffusa per la valutazione finanziaria di progetti a medio/lungo termine, tramite cui si definisce il valore attuale di una serie attesa di flussi di cassa, non solo sommandoli contabilmente, ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento (o tasso di attualizzazione). Confrontando il VAN di due o più investimenti alternativi si riesce a valutare l'opzione più vantaggiosa attraverso il meccanismo dell'attualizzazione dei costi e dei ricavi, che prevede il ricondurre ad un medesimo orizzonte temporale i flussi di cassa che si manifesterebbero in momenti diversi e che quindi non sarebbero direttamente confrontabili. Le formule utilizzate sono le seguenti.

$$C_g(\tau, r) = I_0 + \sum_{i=1}^{\tau} \frac{FC(i)}{(1+r)^i} = I_0 + \sum_{i=1}^{\tau} FC(i) * R_d(i)$$
$$R_d(i) = (1+r)^{-i}$$

$C_g$  rappresenta il costo globale, calcolato come il costo iniziale  $I_0$  per le misure di efficienza energetica al quale si aggiunge la sommatoria dei flussi di cassa  $FC(i)$  dell'anno  $i$ -esimo. Il termine  $\tau$  è l'orizzonte temporale all'interno del quale vengono considerati suddetti flussi, moltiplicati per il fattore di attualizzazione  $R_d(i)$  sulla base del tasso di attualizzazione  $r$ .

Nelle simulazioni effettuate si è scelto di utilizzare un tasso di attualizzazione ( $r$ ) pari al 3%, lavorando in un'ottica di prospettiva macroeconomica. Per prospettiva macroeconomica si intende che i flussi di cassa tengano conto anche dei costi legati alla produzione di CO<sub>2</sub>, con le modalità descritte nei seguenti paragrafi.

Il Regolamento prescrive che i calcoli economici siano effettuati in accordo con la norma UNI EN 15459:2008 [27] “Prestazione energetica degli edifici - Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici”. Tale norma distingue tra due metodologie di calcolo: costo globale (global cost) e rendita finanziaria (annuity cost).

La relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica” [2] prescrive di seguire la metodologia del costo globale. Il periodo di calcolo è di 20 anni per gli edifici adibiti ad ufficio. Nell’applicazione italiana l’anno di partenza è stato fissato nell’anno in corso; pertanto si assume che nel 2014 venga completata la realizzazione dell’edificio ed a partire dal 2015 comincino ad incidere i costi annuali.



## 6.1 Investimento iniziale

L'investimento iniziale  $I_0$  è rappresentato dai costi legati alle misure di efficienza energetica dell'edificio. Sarà valutato non il costo complessivo dell'opera edilizia, ma solo quelli legati alle misure di efficienza energetica, delle quali viene definita la vita utile alla tabella 22.

*Tabella 22 - Vita utile delle misure di efficienza energetica*

Cod.	Misura di efficienza energetica	Vita utile
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	50 anni
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	50 anni
C	Isolamento termico della chiusura orizzontale di copertura	50 anni
D	Isolamento termico della chiusura orizzontale controterra	50 anni
E	Isolamento termico delle chiusure verticali trasparenti	50 anni
F	Schermatura solare	50 anni
G	Pompa di calore invertibile aria-acqua	20 anni
H	Pompa di calore invertibile acqua-acqua	20 anni
I	Caldia a condensazione e chiller	15 anni per la caldaia a condensazione 20 anni per il chiller
L	Caldia a condensazione e chiller ad assorbimento	15 anni per la caldaia a condensazione 20 anni per il chiller ad assorbimento
M	Ventilazione con recuperatore	15 anni
N	Impianto solare fotovoltaico	25 anni
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Come sopra a seconda della tipologia di generazione utilizzata

La vita utile delle misure di efficienza energetica e dei loro componenti sono stato ricavati seguendo la norma UNI EN 15459:2008 [27].

Oltre alla vita utile delle misure, occorre considerare quella dei loro componenti principali, che vengono di seguito identificate:

- pannelli radianti a soffitto: 20 anni;
- ventilconvettori: 15 anni;
- compressore pompa di calore: 15 anni.

In questo modo è possibile quantificare i costi legati alla diversa vita utile dei vari componenti principali, per quello che riguarda invece i componenti secondari delle misure energetiche i loro costi si assumono assorbiti in quelli di manutenzione.

Il periodo di calcolo considerato in questa trattazione è di 20 anni, occorre distinguere le casistiche di studio dei prezzi iniziali in relazione alla vita utile delle misure energetiche e dei loro componenti.

L'investimento iniziale è dato dal valore iniziale delle misure energetiche, a cui vanno sommati i costi di sostituzione e detratti i valori residui.

La fonte principale dei prezzi utilizzata in questa tesi è il prezzario DEI 2013 [28], per quanto non presente in tale prezzario sono state utilizzati i dati riportati nella relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “ Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica” [2].

Per tutti quegli elementi, in particolar modo gli impianti, i cui prezzi non sono stati trovati in queste fonti, è stato fatta una ricerca confrontando i listini prezzi dei principali produttori (si fa riferimento alla bibliografia per l'elenco dei listini consultati) ed alcuni preventivi forniti da uno studio di progettazione che opera nell'ambito milanese. Nella tabella 23 sono riportati i costi considerati.

**Tabella 23 - Elenco riassuntivo dei costi considerati per le misure di efficienza energetica**

<b>Cod.</b>	<b>Misura di efficienza energetica</b>	<b>Descrizione dei costi</b>
A	Isolamento di spessore 4 cm in polistirene espanso estruso (XPS) a cappotto ed isolamento di spessore 5 cm in lana di vetro in intercapedine	La posa di 3 cm di isolamento in polistirene espanso estruso (XPS) a cappotto ha un costo di 51,75 €/m <sup>2</sup> , con un sovrapprezzo di 2,14 € per ogni cm in più di spessore. La posa di 3 cm di isolamento in lana di vetro in intercapedine ha un costo di 33,92 €/m <sup>2</sup> , con un sovrapprezzo di 1,75 € per ogni cm in più di spessore.
B	Isolamento di spessore 9 cm in polistirene espanso estruso (XPS) a cappotto	La posa di 3 cm di isolamento in polistirene espanso estruso (XPS) a cappotto ha un costo di 51,75 €/m <sup>2</sup> , con un sovrapprezzo di 2,14 € per ogni cm in più di spessore.
C	Isolamento di spessore 9 cm in polistirene espanso estruso (XPS) della copertura piana	La posa di 3 cm di isolamento in polistirene espanso estruso (XPS) sulla copertura piana ha un costo di 7,76 €/m <sup>2</sup> , con un sovrapprezzo di 1,85 € per ogni cm in più di spessore.
D	Isolamento di spessore 10 cm in polistirene espanso estruso (XPS) del solaio controterra	La posa di 3 cm di isolamento in polistirene espanso estruso (XPS) del solaio controterra ha un costo di 7,12 €/m <sup>2</sup> , con un sovrapprezzo di 1,64 € per ogni cm in più di spessore.
E	Serramento con U=2.00 W/m <sup>2</sup> K	364.00 €/m <sup>2</sup>
	Serramento con U=1.40 W/m <sup>2</sup> K	397.27 €/m <sup>2</sup>
	Serramento con U=1.20 W/m <sup>2</sup> K	435.00 €/m <sup>2</sup>
F	Lamelle frangisole interasse 45 cm	90.67 €/m <sup>2</sup>
	Lamelle frangisole interasse 15 cm	104.63 €/m <sup>2</sup>
G	Pompa di calore reversibile aria - acqua	Un modello avente potenza termica nominale di 170 kW in fase di heating e 147 in fase di cooling ha un costo di 47750.91 €
	Pannelli radianti a soffitto	161.69 €/m <sup>2</sup>
H	Pompa di calore reversibile acqua - acqua	Un modello avente potenza termica nominale di 170 kW in fase di heating e 147 in fase di cooling ha un costo di 48906.48 €
	Pannelli radianti a soffitto	161.69 €/m <sup>2</sup>
I	Caldaia a condensazione	Un modello avente potenza termica nominale di 1078 kW ha un costo di 67413.10 €
	Chiller	Un modello avente potenza termica nominale di 120 kW ha un costo di 36708.21 €
	Ventilconvettori	Un modello avente potenza termica nominale di 23 kW ha un costo di 2879.59 €

segue a pag. 99

Cod.	Misura di efficienza energetica	Descrizione dei costi
	Caldaia a condensazione	Un modello avente potenza termica nominale di 1078 kW ha un costo di 67413.10 €
L	Chiller ad assorbimento ed impianto solare termico	Per il chiller ad assorbimento si considera un costo di 600 €/kW di potenza nominale della macchina. Per quanto riguarda invece l'impianto solare termico è stato considerato un costo di 614,71 € a pannello
	Chiller	Un modello avente potenza termica nominale di 120 kW ha un costo di 36708.21 €
	Ventilconvettori	Un modello avente potenza termica nominale di 23 kW ha un costo di 2879.59 €
M	Ventilazione con recuperatore	Un modello avente una portata di 650 m <sup>3</sup> /h ha un costo di 3328 €
N	Impianto solare fotovoltaico	Questo impianto ha un costo di 4000 € al kW di picco
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Un modello di generatore istantaneo a condensazione da 18.5 kW ha un costo di 1792 €. Un modello di pompa di calore aria-acqua da 18.5 kW ha un costo di 3010.56 €

Per costi di sostituzione si intende l'esborso economico che deve essere sostenuto per sostituire una misura o un componente la cui vita utile è inferiore al periodo di calcolo, mentre per valore residuo si intende la quantificazione di quello rimanente per quegli elementi la cui vita utile supera la durata del calcolo.

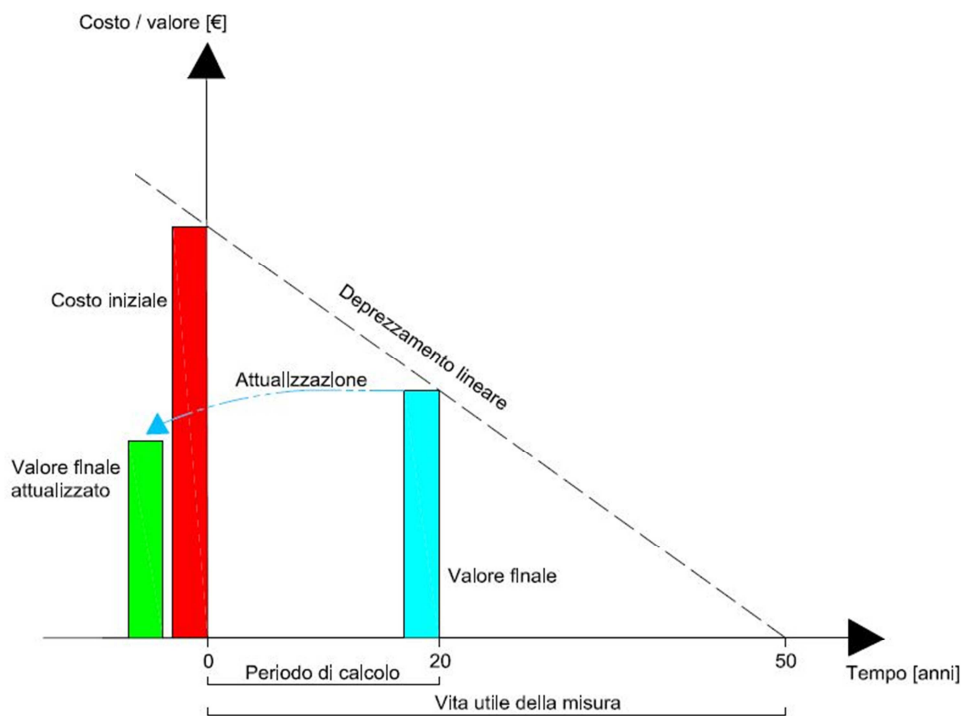
Se invece la vita utile di una misura o di un componente è pari al periodo di calcolo, allora non devono essere considerati nè il costo di sostituzione nè il valore residuo.

Nei seguenti paragrafi si spiega come sono stati trattati i costi di sostituzione ed i valori residui.

### 6.1.1 Valore residuo

Nel caso in cui elementi dell'edificio abbiano una vita utile superiore al periodo di calcolo è necessario valutare il loro valore residuo ipotizzando un deprezzamento lineare nel tempo. Lo si considera nel calcolo come un flusso di cassa negativo.

Come si può vedere in figura 24 il valore della misura o del componente alla fine del periodo di calcolo si ricava da un deprezzamento lineare del costo iniziale (rosso) fino ad arrivare al valore finale (ciano) che deve essere riportato al valore finale attualizzato (verde) utilizzando il fattore di attualizzazione  $R_d$ .

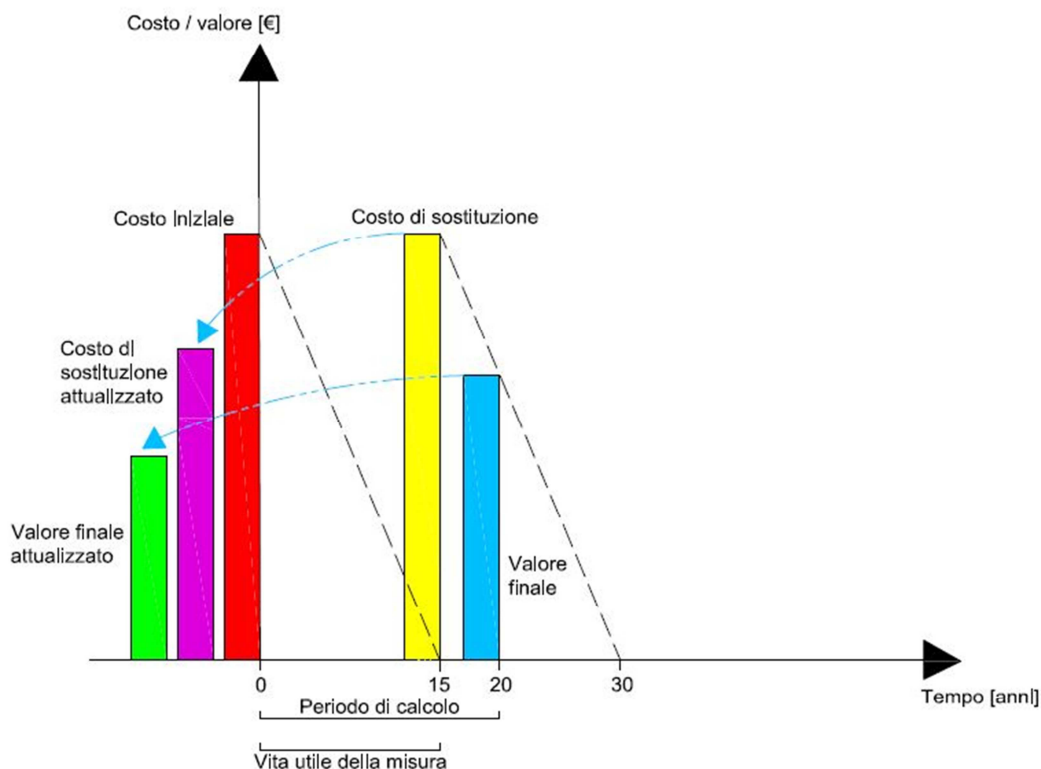


**Figura 24 - Attualizzazione del valore residuo della misura di efficienza energetica la cui vita utile supera il periodo di calcolo**

## 6.1.2 Costo di sostituzione

Nel caso in cui elementi dell'edificio abbiano una vita utile inferiore al periodo di calcolo è necessario valutare il loro costo di sostituzione, oltre che il valore finale attualizzato dell'elemento sostituito. Lo si considera nel calcolo come un flusso di cassa positivo, mentre il valore residuo che si genera sarà sempre negativo.

Come si può vedere in figura 25 prima della fine del periodo di calcolo si ha il costo di sostituzione (giallo) pari al costo iniziale (rosso) della misura o del componente considerato. Questo esborso deve essere attualizzato utilizzando il fattore di attualizzazione  $R_d$ , riportando così il valore all'inizio del periodo di calcolo (viola). Per quanto riguarda invece il valore finale attualizzato della misura (verde) lo si ricava applicando il fattore di attualizzazione  $R_d$  al valore ricavato alla fine dei 20 anni (ciano).



*Figura 25 - Attualizzazione del valore finale e costo di sostituzione della misura di efficienza energetica la cui vita utile è inferiore al periodo di calcolo*

## 6.2 Flussi di cassa

I flussi di cassa rappresentano la sommatoria dei valori dei costi energetici, di manutenzione e delle emissioni di CO<sub>2</sub> durante il periodo di calcolo considerato. Questi si calcolano anno per anno con il fattore di attualizzazione  $R_d$ ; nei seguenti paragrafi si riporta nel dettaglio il calcolo di questi costi.

### 6.2.1 Costi energetici

In questa trattazione vengono studiati i due vettori energetici principali utilizzati nel campo degli edifici ad uso ufficio, ovvero l'energia elettrica ed il gas naturale.

#### 6.2.1.1 Energia elettrica

Per quanto riguarda i costi legati a questo vettore, possono essere distinti nelle tre seguenti macro-categorie:

- quota fissa;
- quota potenza;
- quota energia.

Queste quote sono calcolate secondo le attuali condizioni tariffarie per gli edifici ad uso ufficio riportate nella relazione del Ministero dello Sviluppo Economico "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica" [2]. La quota energia si suddivide a seconda delle fasce orarie (F1, F2, F3) e del periodo di utilizzo. Viene fatta una media dei valori, sia mensili che di fascia, per arrivare ad ottenere un'unica quota energia. Inoltre viene pagata l'imposta erariale di consumo (accisa) e l'Imposta sul Valore Aggiunto (IVA). La prima si è calcolata utilizzando i valori proposti nella relazione [2], mentre per quanto riguarda l'IVA la si considera pari al 22%. Non viene trattata la vendita dell'energia elettrica, in quanto si ipotizza che quella prodotta dall'impianto fotovoltaico sia totalmente destinata all'autoconsumo.

### 6.2.1.2 Gas naturale

Per quanto riguarda i costi legati al gas naturale, possono essere distinte le seguenti macro-categorie:

- quota energia;
- quota fissa.

Entrambe vanno considerate sia per i servizi di rete (che coprono i costi di acquisto, commercializzazione all'ingrosso e vendita al dettaglio della materia) che per i servizi di vendita (dovuti al trasporto, stoccaggio, distribuzione locale e gestione del contatore). Queste quote sono calcolate con le tabelle riportate nella relazione del Ministero dello Sviluppo Economico "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica" [2]. La quota energia è stabilita in  $\text{Sm}^3$ , ovvero il metro cubo standard che rappresenta la quantità di gas a condizioni standard di  $15^\circ\text{C}$  e 1013,25 millibar. Per convertire i  $\text{Sm}^3$  in kWh si utilizza il potere calorifico del gas naturale, assunto pari a  $8250 \text{ kcal/ Sm}^3$  ( pari  $9.59 \text{ kWh/ Sm}^3$ ).

Come per l'energia elettrica, anche su questo vettore energetico si paga l'accisa e l'IVA. La prima viene calcolata seguendo le tabelle della relazione [2], mentre l'IVA si applica al 10% per i consumi inferiori a  $480 \text{ Sm}^3$ , mentre al 22% quando questo limite viene superato.

### 6.2.1.3 Evoluzione dei costi

Si è tenuto conto dell'evoluzione del costo dei vettori energetici negli anni, i cui valori sono stati ricavati seguendo le indicazioni della relazione [2]. Per quanto riguarda il gas naturale si considera un aumento del 2,8% annuo, mentre per l'energia elettrica si fa riferimento al grafico che ne riporta l'evoluzione del costo nei prossimi anni.



## 6.2.2 Costi di manutenzione

I costi di manutenzione sono stati ricavati in accordo alla norma EN 15459 [27], valutati come percentuale annuale sul costo iniziale.

- caldaia a condensazione 1%;
- pompa di calore reversibile aria-acqua 4%;
- pompa di calore reversibile acqua-acqua 4%;
- chiller 4%;
- chiller ad assorbimento 4%;
- ventilazione meccanica 4%;
- ventilconvettori 4%;
- sistema solare fotovoltaico 1%.

## 6.2.3 Costi di smaltimento della CO<sub>2</sub>

Operando nell'ambito di una prospettiva macroeconomica vengono considerati i costi per le emissioni di CO<sub>2</sub>. Si tratta della spesa economica che gli stati membri dell'unione europea devono sostenere per compensare le emissioni di CO<sub>2</sub>, con l'obiettivo di ridurre la quantità rilasciata in ambiente.

Per quanto riguarda le emissioni di CO<sub>2</sub> legate al gas naturale si è utilizzato un valore di 55882 g/GJ, corrispondente a 201 g/kWh. Invece, per quanto riguarda l'emissione legata alla produzione di energia elettrica è stata utilizzata la tabella proposta dalla relazione [2] che ne mostra l'andamento nei prossimi anni.

I costi vengono ricavati con tabella 24 che riporta il costo per tonnellata di emissioni di CO<sub>2</sub> in riferimento ad anni specifici, per i valori non presenti in questa tabella sono state utilizzate delle interpolazioni lineari.

*Tabella 24 - Costo per tonnellata di CO<sub>2</sub> emessa in funzione dell'anno considerato*

Anno	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
€/Tonnellata	16.5	20	36	50	52	51	50

## CAPITOLO 7

# OTTIMI GLOBALI, CURVE ED INTERVALLI OTTIMALI DI PRESTAZIONE

Nei capitoli 2, 3 e 4 vengono presentati gli archetipi morfologici e le misure di efficienza energetica con i relativi parametri. Successivamente si definiscono le metodologie di calcolo dei due indicatori proposti dalla procedura, ovvero la prestazione energetica in termini di kWh/m<sup>2</sup> annuo ed il costo globale espresso come €/m<sup>2</sup> rispettivamente ai capitoli 5 e 6.

In questo capitolo si calcolano gli ottimi globali, ovvero quelle combinazioni di misure di efficienza energetica che per l'archetipo considerato definiscono il livello minimo di costo.

Una volta ricavati gli ottimi globali tramite un processo iterativo, si definiscono delle curve di involucro utilizzando i valori minimi fra tutte le combinazioni studiate. Queste saranno analizzate per ottenere gli intervalli di prestazione ottimale da confrontare con i limiti posti dalla normativa.

## 7.1 Scelta delle combinazioni

Per ogni archetipo morfologico occorre definire quali siano le tecnologie d'involucro e la configurazione dell'impianto, così da poter calcolare i due indicatori e valutarne le variazioni in funzione dei parametri che definiscono le misure di efficienza energetica.

### 7.1.1 Combinazioni di archetipi morfologici e tecnologie d'involucro

Per ogni archetipo morfologico sono stati considerati i due orientamenti principali, ovvero il lato lungo dell'edificio orientato in direzione nord-sud oppure est-ovest, così da poter tenere conto degli effetti dovuti al differente orientamento delle facciate. Il passo successivo è stato quello di applicare le tecnologie d'involucro precedentemente studiate ad ognuno dei modelli ottenuti, il cui fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva è stato calcolato con il software Trnsys. Nella tabella 25 sono presentate le scelte fatte.

*Tabella 25 - Caratteristiche delle combinazioni scelte*

<b>Cod.</b>	<b>Archetipo morfologico</b>	<b>Asse principale</b>	<b>Chiusura verticale opaca</b>
IU1_1a	IU1	Nord - Sud	A secco
IU1_1b	IU1	Est - Ovest	A secco
IU2_1a	IU2	Nord - Sud	A secco
IU2_1b	IU2	Est - Ovest	A secco
IU3_1a	IU3	Nord - Sud	A secco
IU3_1b	IU3	Est - Ovest	A secco
IU4_1a	IU4	Nord - Sud	A secco
IU4_1b	IU4	Est - Ovest	A secco
IU4_2a	IU4	Nord - Sud	Tradizionale
IU4_2b	IU4	Est - Ovest	Tradizionale
IU5_1a	IU5	Nord - Sud	A secco
IU5_1b	IU5	Est - Ovest	A secco
IU6_1a	IU6	Nord - Sud	A secco
IU6_1b	IU6	Est - Ovest	A secco

segue a pag.107

<b>Cod.</b>	<b>Archetipo morfologico</b>	<b>Asse principale</b>	<b>Chiusura verticale opaca</b>
IU7_1a	IU7	Nord - Sud	A secco
IU7_1b	IU7	Est - Ovest	A secco
IU8_1a	IU8	Nord - Sud	A secco
IU8_1b	IU8	Est - Ovest	A secco
IU8_2a	IU8	Nord - Sud	Tradizionale
IU8_2b	IU8	Est - Ovest	Tradizionale
IU9_1a	IU9	Nord - Sud	A secco
IU9_1b	IU9	Est - Ovest	A secco
IU9_2a	IU9	Nord - Sud	Tradizionale
IU9_2b	IU9	Est - Ovest	Tradizionale

Si ottengono 24 combinazioni da studiare, i cui codici sono evidenziati nella prima colonna. I 3 caratteri iniziali delle codifiche fanno riferimento all'archetipo morfologico, da IU1 a IU3 si tratta di edifici a torre, IU4 corrisponde ai piccoli uffici, da IU5 ad IU7 parallelepipedi di grossa taglia mentre IU8 ed IU9 media. Il quarto carattere si riferisce alla tipologia di chiusura verticale opaca, 1 corrisponde alla tecnologia a secco mentre 2 a quella tradizionale. La lettera minuscola finale definisce l'orientamento dell'edificio, a se l'asse principale è orientato Nord-Sud e b per Est-Ovest. Per quanto riguarda la chiusura opaca di copertura e controterra e gli elementi trasparenti essi non vengono identificati nel codice, in quanto sono gli stessi per tutti i modelli considerati.

In questo modo sono state considerate le misure di efficienza energetica dalla A alla F, considerando i valori base dei loro parametri connotanti.

### 7.1.2 Combinazioni di impianto

Per ognuna delle 24 combinazioni descritte nel precedente paragrafo occorre ora stabilire la configurazione dell'impianto.

Il punto di partenza è la scelta del sistema di generazione tra le misure di efficienza energetica dalla G alla L. Sulla base di simulazioni preliminari si nota che la misura I (generazione con caldaia a condensazione e chiller) presenta i consumi più elevati mentre la H (pompa di calore reversibile acqua acqua) quelli più contenuti.

In questo modo si stabiliscono conseguentemente le tipologie di emissione, regolazione e distribuzione. Si applicano poi i restanti elementi, ovvero dalla lettera M alla O.

Nelle combinazioni sono state considerate tutte le misure di efficienza energetica, nei seguenti paragrafi si andrà a descrivere il processo di ricerca degli ottimi globali.

## 7.2 Ottimi globali

La ricerca degli ottimi globali si effettua in accordo con la metodologia proposta dalla relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica” [2], che prevede la valutazione del costo globale delle combinazioni con un processo iterativo.

Questa metodologia prevede la creazione di due percorsi di ottimi parziali, attraverso i quali ricavare l’ottimo globale. I punti di partenza sono caratterizzati da un alto costo globale, ma presentano un livello differente di prestazione energetica. Il primo punto di partenza avrà un elevato fabbisogno di energia primaria, corrispondente ad una soluzione tecnologica meno avanzata, mentre il secondo al contrario avrà dei consumi molto ridotti utilizzando soluzioni tecniche ad alte prestazioni.

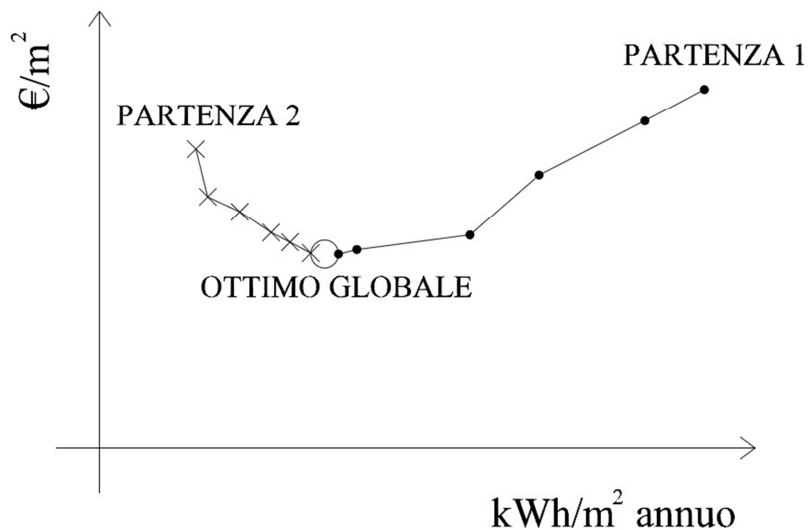
### 7.2.1 Procedimento iterativo ed ottimi globali

I punti di partenza dei due percorsi su cui applicare il processo iterativo saranno quindi caratterizzati entrambi da un elevato valore del costo globale [ $\text{€}/\text{m}^2$ ]; si differenziano quindi per il livello di prestazione energetica [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ], che si attesta su valori molto alti nel primo caso, rappresentando una performance mediocre del sistema edificio-involucro. Nel secondo caso invece si tratta di un edificio ad alte prestazioni energetiche e caratterizzato quindi da bassi consumi.

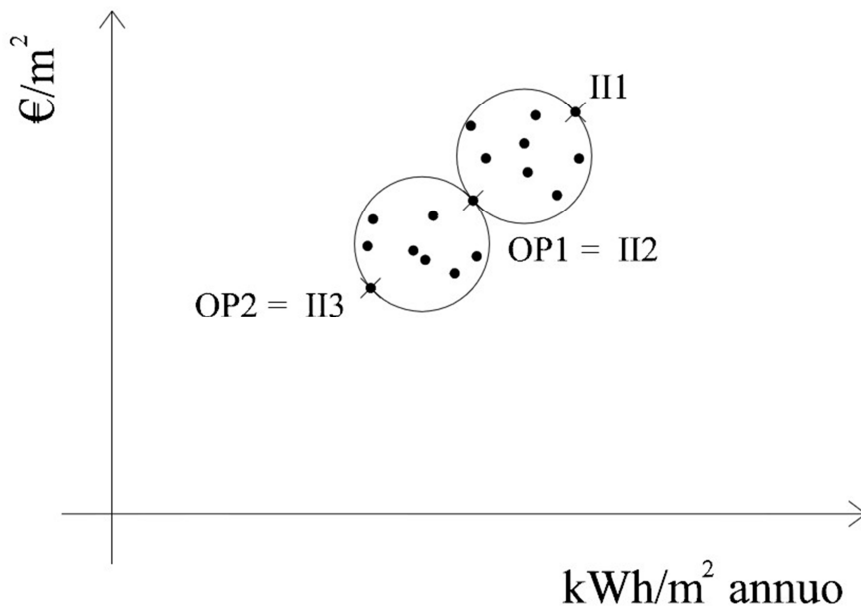
Il processo iterativo prevede che partendo dalle combinazioni che definiscono i punti di partenza, si vadano a variare uno alla volta i parametri che caratterizzano le misure di efficienza energetica. In questo modo saranno simulate diverse configurazioni del sistema edificio-impianto, tra le quali si sceglierà quella avente un valore minore del costo globale, che definisce l’ottimo parziale. La procedura prevede che il valore ricavato sia assunto come punto di partenza di una nuova iterazione, ripetendo il processo di modifica dei parametri. Con questo processo si otterranno diversi ottimi parziali per entrambi i percorsi, i cui valori tenderanno ad avvicinarsi.

Le iterazioni si arrestano quando la differenza tra i punti si minimizza, arrivando a definire l'ottimo globale, il cui costo è il minimo che si può ottenere fra tutte le combinazioni possibili.

La procedura esposta viene descritta nelle figure 26 e 27.



*Figura 26 - Percorsi alla fine del processo iterativo, sono evidenziati i punti di partenza, l'ottimo globale ed i parziali*



*Figura 27 - Processo iterativo, II corrisponde all'inizio dell'iterazione, mentre OP all'ottimo parziale; l'ottimo parziale che si ricava è la partenza dell'iterazione successiva*

Nella tabella 26 si riportano i valori degli ottimi parziali ottenuti alla fine del processo iterativo, che presentano differenze minime in termini sia economici che energetici. L'ottimo globale è il punto finale dei due percorsi che presenta il costo minore.

*Tabella 26 - Valori in termini energetici ed economici degli ottimi parziali finali ricavati dai percorsi iterativi*

IU1_1a	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]	IU1_1b	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]
<b>Partenza 1</b>	28.14	330.31	<b>Partenza 1</b>	25.96	321.01
<b>Arrivo 1</b>	11.23	220.48	<b>Arrivo 1</b>	10.11	218.01
<b>Partenza 2</b>	4.77	277.35	<b>Partenza 2</b>	4.41	273.91
<b>Arrivo 2</b>	11.01	218.7	<b>Arrivo 2</b>	9.93	216.47

IU2_1a	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]	IU2_1b	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]
<b>Partenza 1</b>	39.11	442.65	<b>Partenza 1</b>	35.41	420.67
<b>Arrivo 1</b>	15.81	287.16	<b>Arrivo 1</b>	13.99	283.84
<b>Partenza 2</b>	7.21	331.24	<b>Partenza 2</b>	6.31	323.14
<b>Arrivo 2</b>	15.6	285.89	<b>Arrivo 2</b>	13.77	285.56

IU3_1a	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]	IU3_1b	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]
<b>Partenza 1</b>	64.85	702.44	<b>Partenza 1</b>	57.97	672.83
<b>Arrivo 1</b>	26.54	454.71	<b>Arrivo 1</b>	23	447.79
<b>Partenza 2</b>	13.72	505.1	<b>Partenza 2</b>	12.84	500.07
<b>Arrivo 2</b>	26.48	453.89	<b>Arrivo 2</b>	22.93	446.95

IU4_1a	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]	IU4_1b	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]
<b>Partenza 1</b>	69.61	1133.91	<b>Partenza 1</b>	65.26	1113.48
<b>Arrivo 1</b>	23.54	611.38	<b>Arrivo 1</b>	21.64	607.5
<b>Partenza 2</b>	11.38	771.3	<b>Partenza 2</b>	10.72	768.16
<b>Arrivo 2</b>	21.83	607.6	<b>Arrivo 2</b>	19.9	603.84

IU4_2a	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]	IU4_2b	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]
<b>Partenza 1</b>	71.82	1163.39	<b>Partenza 1</b>	67.15	1141.45
<b>Arrivo 1</b>	24.26	646.61	<b>Arrivo 1</b>	21.82	639.72
<b>Partenza 2</b>	11.79	806.83	<b>Partenza 2</b>	11.08	803.58
<b>Arrivo 2</b>	22.73	643.98	<b>Arrivo 2</b>	20.65	635.5

IU5_1a	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]	IU5_1b	EP [kWh/m <sup>2</sup> ]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]
<b>Partenza 1</b>	37.33	430.73	<b>Partenza 1</b>	32.54	409.53
<b>Arrivo 1</b>	14.8	289.05	<b>Arrivo 1</b>	12.39	272.84
<b>Partenza 2</b>	5.55	336.49	<b>Partenza 2</b>	4.96	334.89
<b>Arrivo 2</b>	14.49	287.54	<b>Arrivo 2</b>	11.89	269.4



<b>IU6_1a</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	50.52	565.43
<b>Arrivo 1</b>	20.34	362.22
<b>Partenza 2</b>	8.07	430.26
<b>Arrivo 2</b>	19.96	359.49

<b>IU7_1a</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	71.03	768.85
<b>Arrivo 1</b>	28.88	490.97
<b>Partenza 2</b>	12.34	574.03
<b>Arrivo 2</b>	28.75	471.69

<b>IU8_1a</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	49.88	608.83
<b>Arrivo 1</b>	18.38	378.26
<b>Partenza 2</b>	7.6	569.33
<b>Arrivo 2</b>	15.5	391.02

<b>IU8_2a</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	51.05	665.51
<b>Arrivo 1</b>	18.99	396.9
<b>Partenza 2</b>	7.93	588.61
<b>Arrivo 2</b>	17.74	392.6

<b>IU9_1a</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	65.14	783.41
<b>Arrivo 1</b>	24.68	471.55
<b>Partenza 2</b>	9.79	673.34
<b>Arrivo 2</b>	24.02	470.28

<b>IU9_2a</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	65.85	796.4
<b>Arrivo 1</b>	25.05	483.33
<b>Partenza 2</b>	10.2	686.37
<b>Arrivo 2</b>	24.34	482.24

<b>IU6_1b</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	43.04	532.77
<b>Arrivo 1</b>	16.58	354.93
<b>Partenza 2</b>	6.78	425.46
<b>Arrivo 2</b>	16.16	352.21

<b>IU7_1b</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	59.65	719.83
<b>Arrivo 1</b>	23	479.41
<b>Partenza 2</b>	10.01	565.27
<b>Arrivo 2</b>	22.86	478.86

<b>IU8_1b</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	45.21	587.78
<b>Arrivo 1</b>	16.17	373.62
<b>Partenza 2</b>	6.98	567.1
<b>Arrivo 2</b>	15.28	371.07

<b>IU8_2b</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	46.18	614.77
<b>Arrivo 1</b>	16.65	391.88
<b>Partenza 2</b>	6.86	584.06
<b>Arrivo 2</b>	15.69	389.67

<b>IU9_1b</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	58.18	752.41
<b>Arrivo 1</b>	21.28	464.92
<b>Partenza 2</b>	9.28	672.38
<b>Arrivo 2</b>	20.58	463.66

<b>IU9_2b</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Partenza 1</b>	58.77	764.85
<b>Arrivo 1</b>	21.59	476.47
<b>Partenza 2</b>	9.23	682.05
<b>Arrivo 2</b>	20.83	475.42

Nella tabella 26 sono riportati per ognuna della 24 combinazioni di partenza i valori dei punti iniziali dei due percorsi e quelli di arrivo, il valore dell'ottimo globale viene considerato come il minore tra i due punti di arrivo dei percorsi, in quanto per arrivare alla totale uguaglianza tra i due valori occorrerebbe fare ulteriori simulazioni, ma si è deciso di arrestarsi quando la differenza del VAN tra i valori degli ottimi parziali è inferiore al 5%, anche se occorre precisare che per 4 casi la differenza si attesta tra l'1% e il 5% mentre per i restanti 20 è inferiore all'1% .

Si noti che il fabbisogno termico dell'edifici cambia con la variazione dell'orientamento. Trattandosi di edifici aventi una dimensione in pianta preponderante rispetto all'altra, i casi che hanno come asse principale Nord-Sud presentano carichi termici maggiori rispetto a quelli orientati Est-Ovest. Questo effetto è dovuto al fatto che nel primo caso aumenta considerevolmente la superficie vetrata esposta ad Est ed Ovest, lati dai quali si riceve la maggiore quantità di radiazione nell'arco della giornata. I maggiori guadagni solari hanno un effetto positivo in inverno, ma nella stagione estiva incidono negativamente sulla prestazione energetica, in modo preponderante rispetto ai benefici sulla climatizzazione invernale.

## 7.2.2 Grafici delle iterazioni e tabelle delle misure di efficienza energetica

All'interno di questo capitolo si riportano in forma grafica tutti i punti ricavati dalle iterazioni, il percorso di ricerca degli ottimi ed i punti di partenza. Lungo l'asse delle ascisse di riporta la prestazione energetica mentre sulle ordinate il costo globale.

Il percorso 1 è definito con linee di colore blu che collegano il punto di partenza e gli ottimi parziali, rappresentati con marcatori romboidali. Il processo 2 invece si evidenzia con il colore verde e dei marcatori triangolari. I restati valori sono evidenziati in marrone per il primo percorso ed in viola per il secondo.

Sotto ogni grafico si riportano le misure di efficienza ed il valore assunto per ogni parametro al fine di definire l'ottimo globale. Nell'elenco delle misure di efficienza non si riportano i sistemi dalla G alla L, in quanto il sistema di generazione non cambia da combinazione a combinazione. Per quanto riguarda il percorso 1 si partirà sempre dalla tipologia I, in quanto rappresenta sempre la prestazione energetica peggiore, mentre la migliore è definita dal sistema H che sarà il punto d'inizio nel secondo caso.

All'interno delle tabelle è inoltre indicato il valore dei parametri connotanti le misure di efficienza energetica che definiscono l'ottimo parziale. Con il codice "N. EEO" (acronimo ricavato dalla relazione [2], che significa Efficienza Energetica Ottimale) si intende invece il numero di migliore apportate al componente considerato, questo può variare tra 0 se la misura è presentata con il valore base, 1 e 2 per le successive migliorie.

### IU1\_1a - edificio a torre vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud

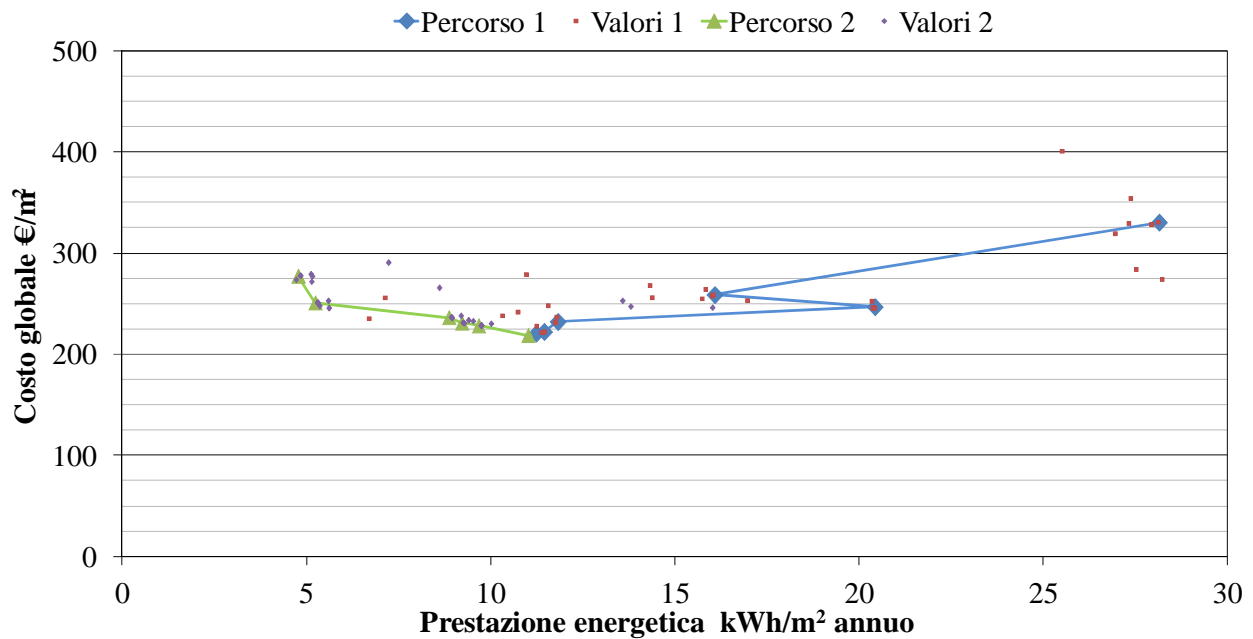


Figura 28 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU1\_1a

Tabella 27 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU1\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

IU1\_1b - edificio a torre vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest

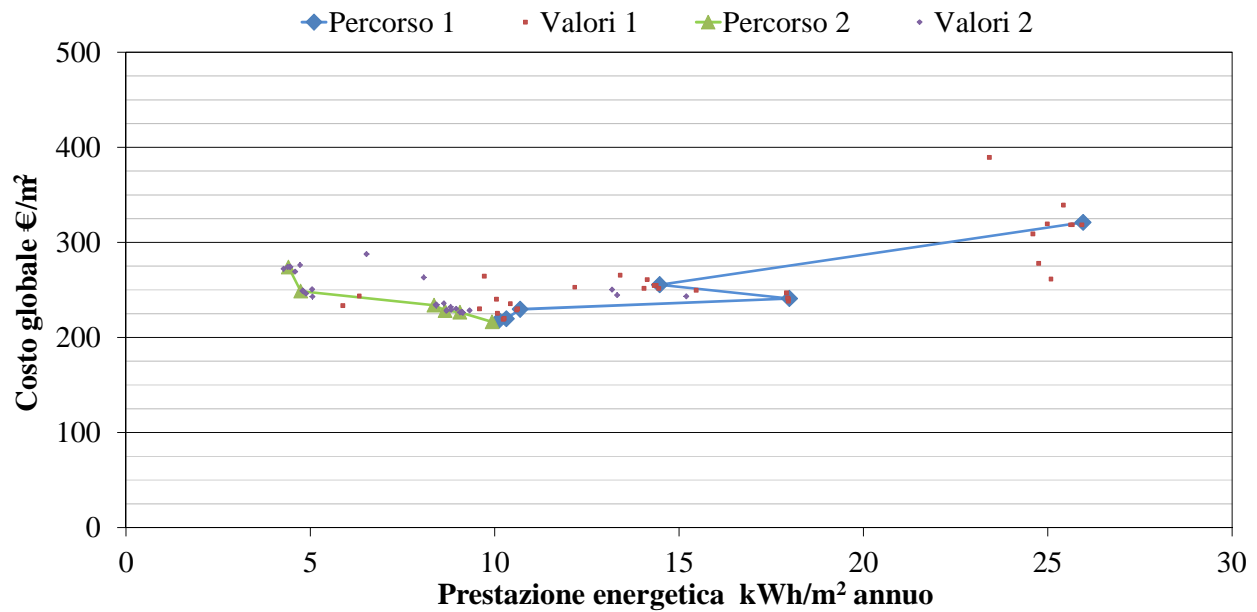


Figura 29 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU1\_1b

Tabella 28 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU1\_1b

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

### IU2\_1a - edificio a torre vetrato a nastro, orientamento Nord-Sud

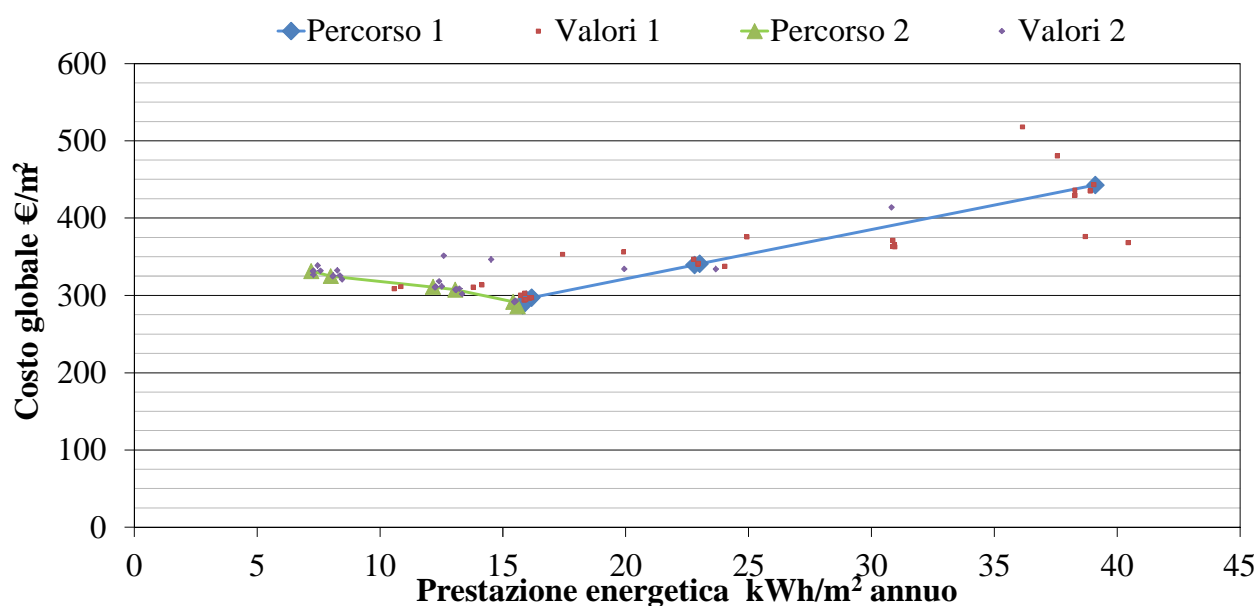
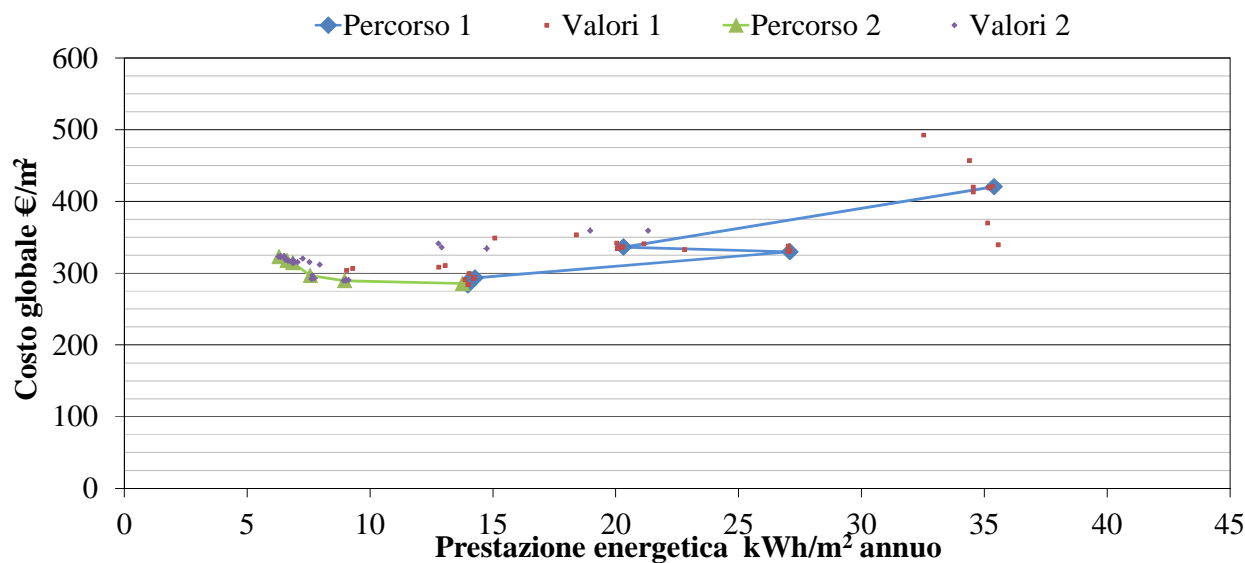


Figura 30 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU2\_1a

Tabella 29 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU2\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

### IU2\_1b - edificio a torre vetrato a nastro, orientamento Est-Ovest



**Figura 31 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU2\_1b**

**Tabella 30 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU2\_1b**

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.29	0
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.31	0
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Gas	0

### IU3\_1a - edificio a torre tutto vetro, orientamento Nord-Sud

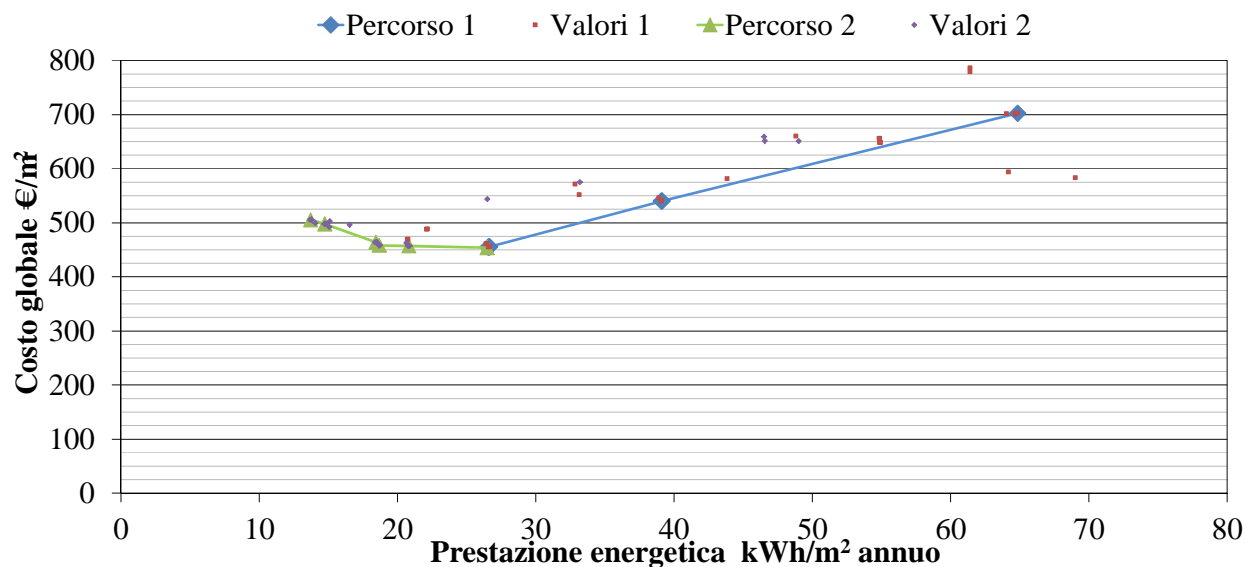


Figura 32 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU3\_1a

Tabella 31 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU3\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	$\eta$	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1



### IU3\_1b - edificio a torre tutto vetro, orientamento Est-Ovest

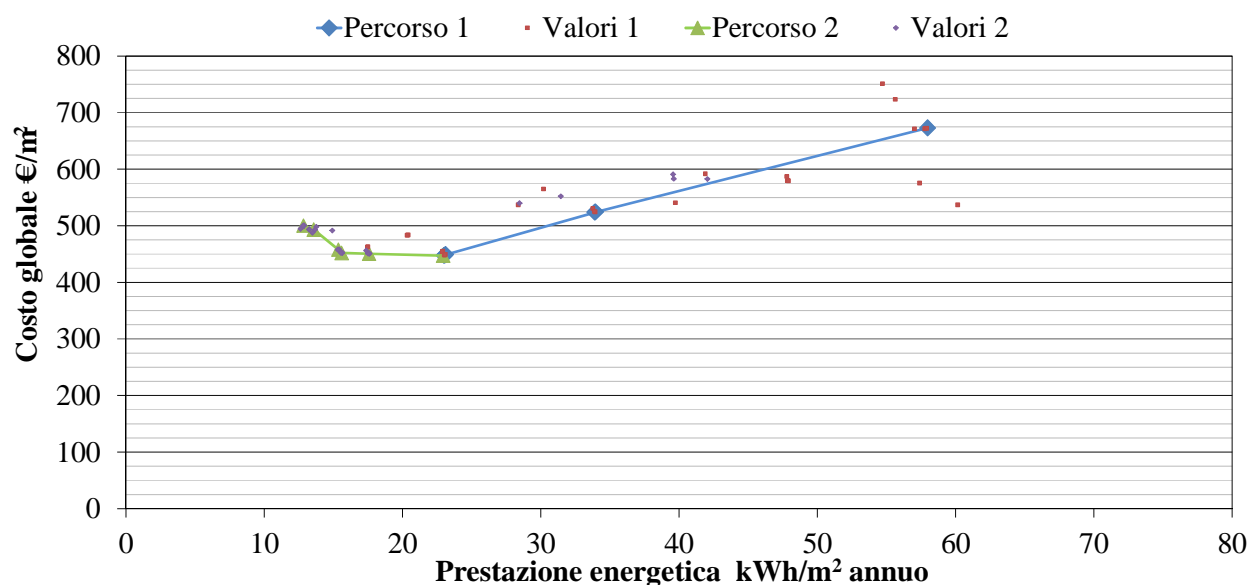
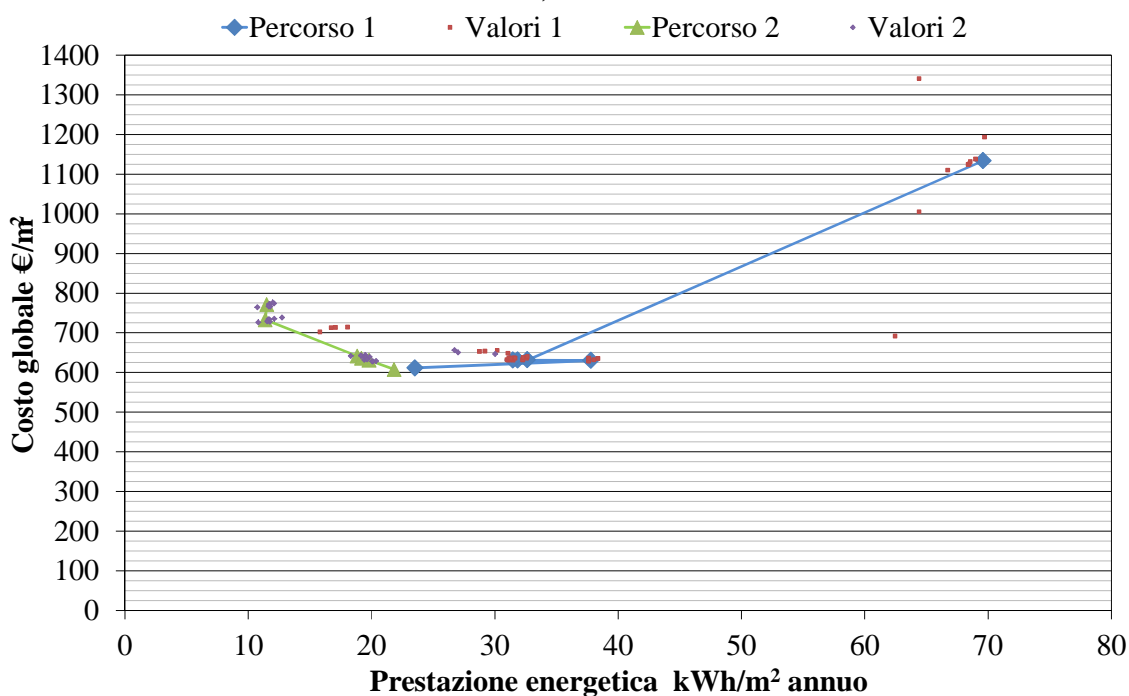


Figura 33 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU3\_1b

Tabella 32 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU3\_1b

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

**IU4\_1a - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud, chiusura a secco**

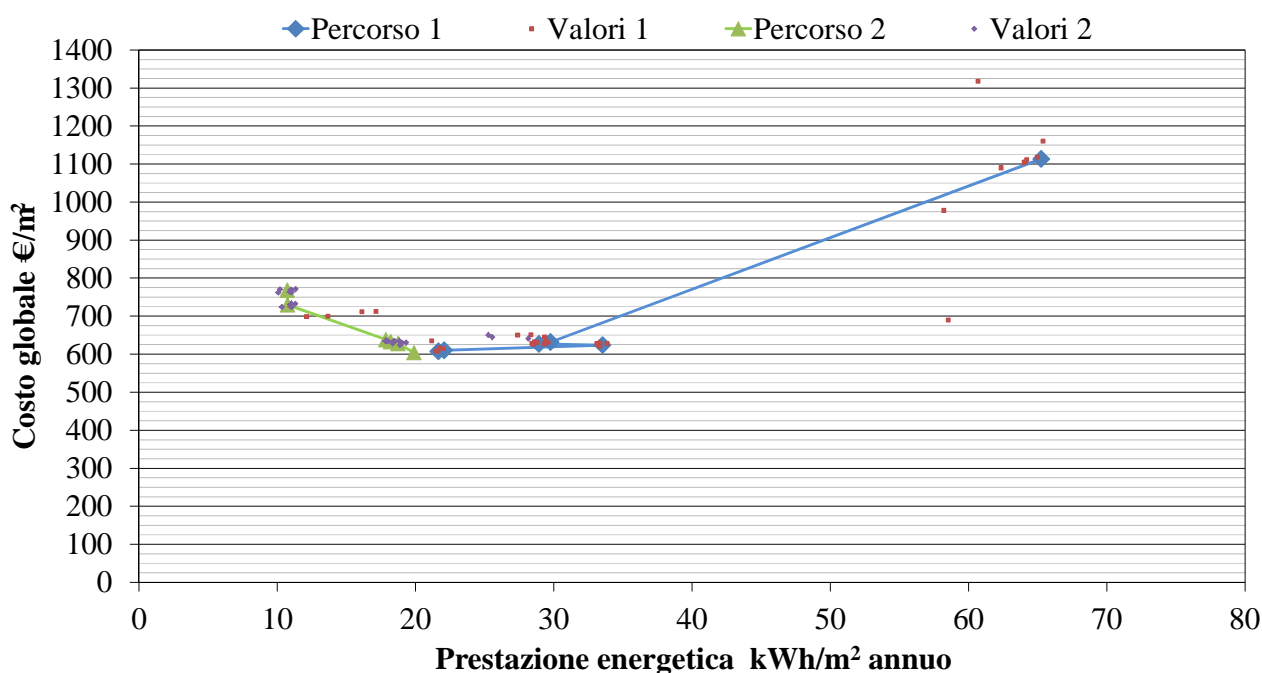


*Figura 34 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4\_1a*

*Tabella 33 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4\_1a*

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

**IU4\_1b - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura a secco**

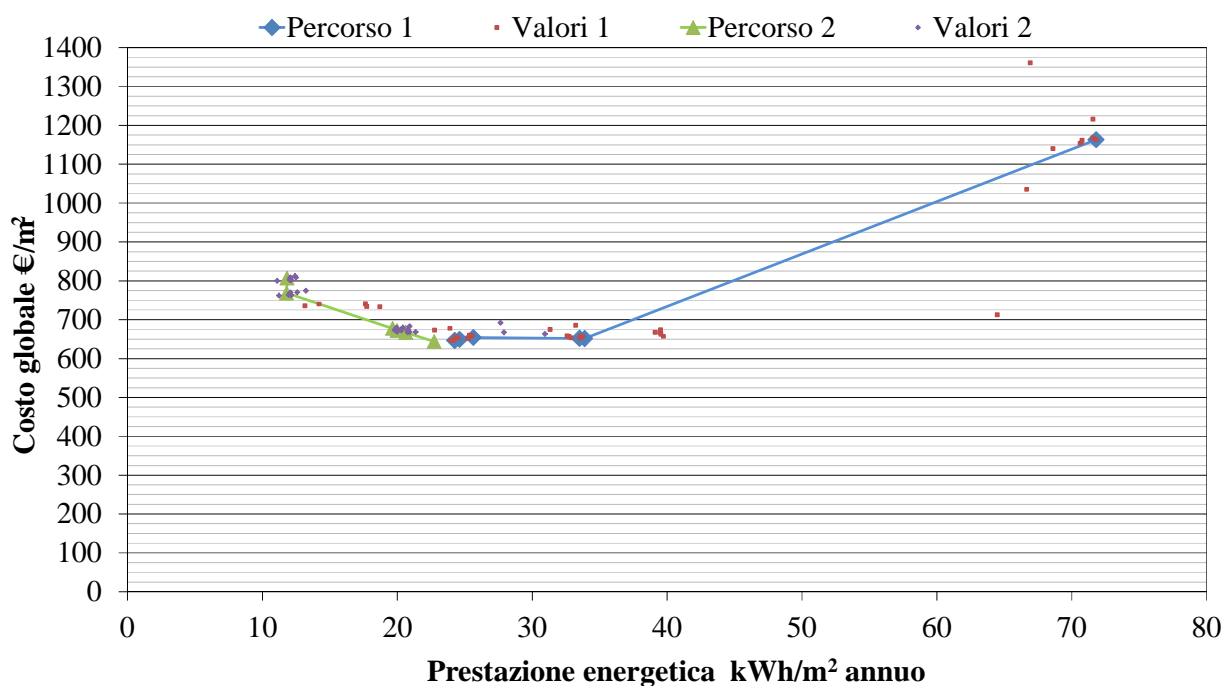


*Figura 35- Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4\_1b*

*Tabella 34 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4\_1b*

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

**IU4\_2a - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud, chiusura tradizionale**



**Figura 36 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4\_2a**

**Tabella 35 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4\_2a**

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	-	-
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	0.21	2
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m²K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	$\eta$	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

IU4\_2b - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura tradizionale

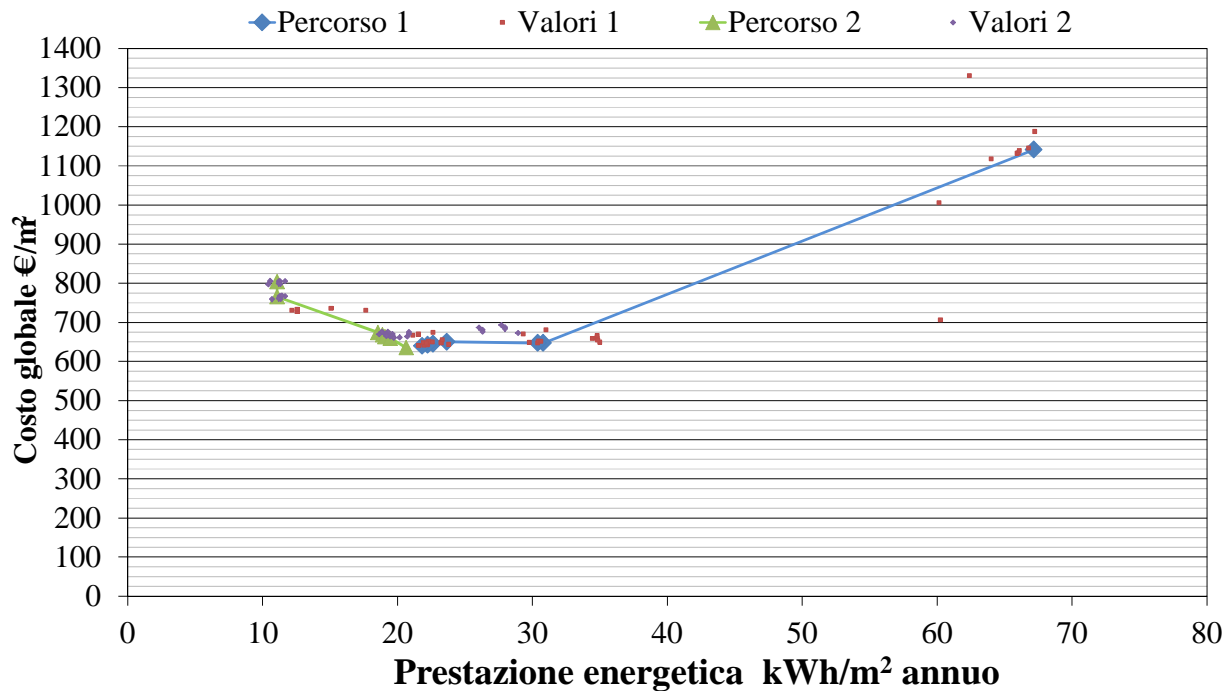


Figura 37 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU4\_2b

Tabella 36 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU4\_2b

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	0.45	1
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Gas	0

IU5\_1a - edificio di grossa taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud

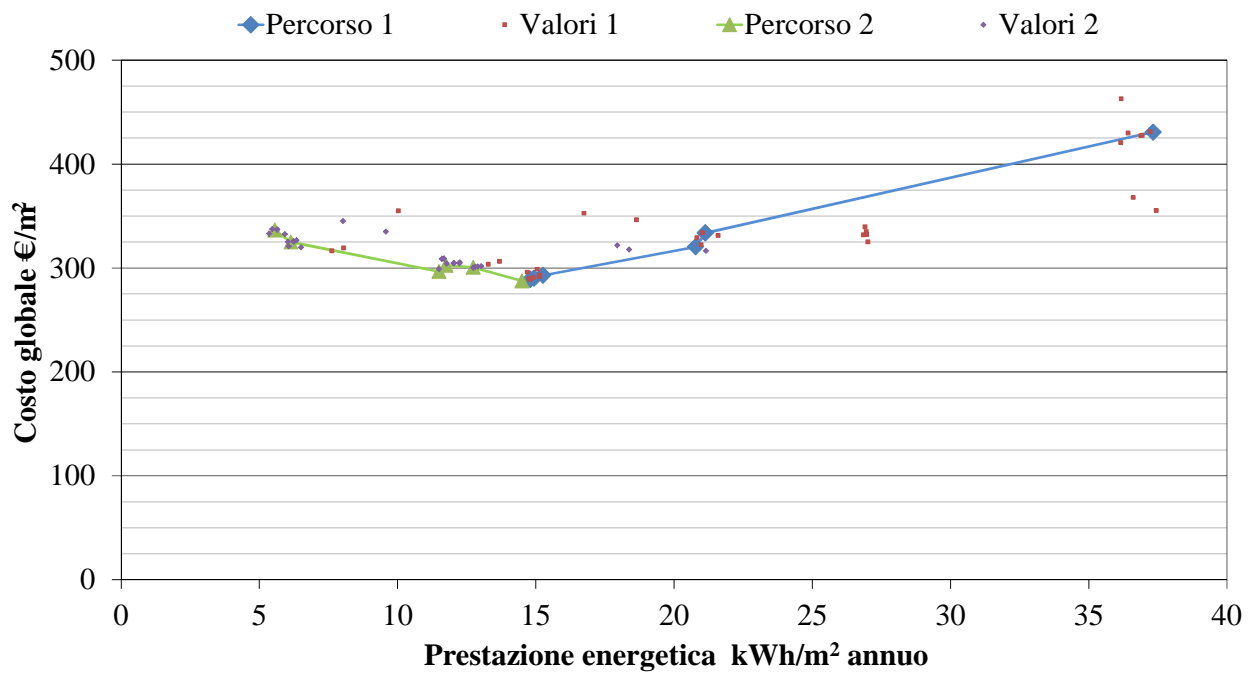


Figura 38 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU5\_1a

Tabella 37 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU5\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

### IU5\_1b - edificio di grossa taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest

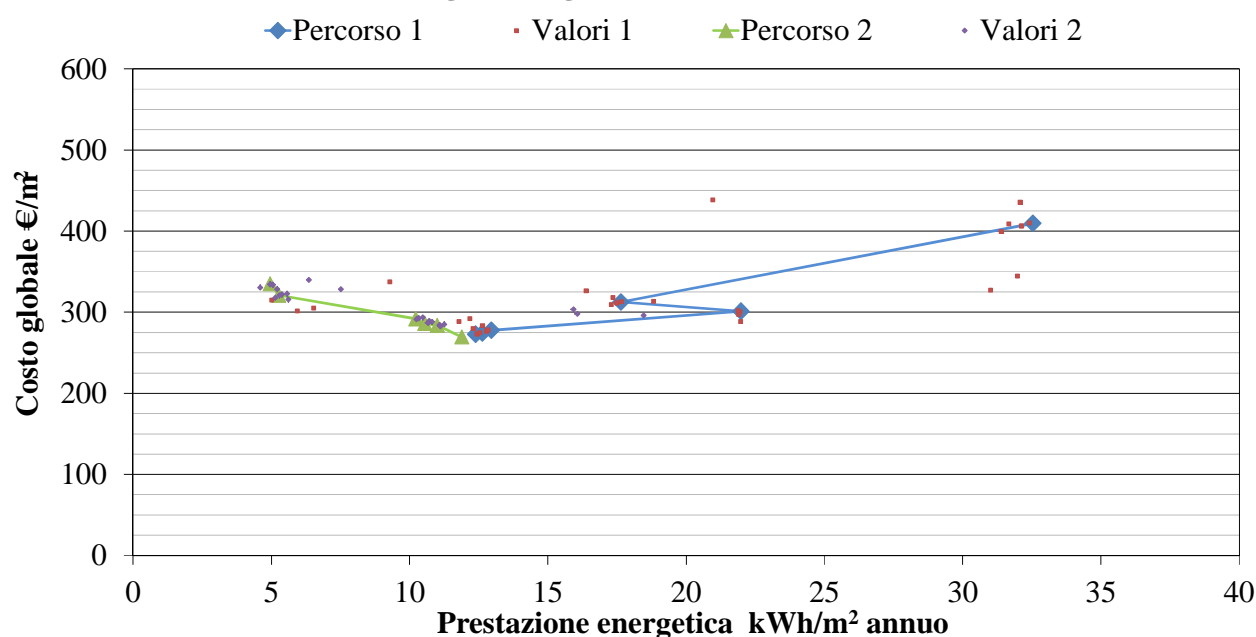


Figura 39 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU5\_1b

Tabella 38 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU5\_1b

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

### IU6\_1a - edificio di grossa taglia vetrato a nastro, orientamento Nord-Sud

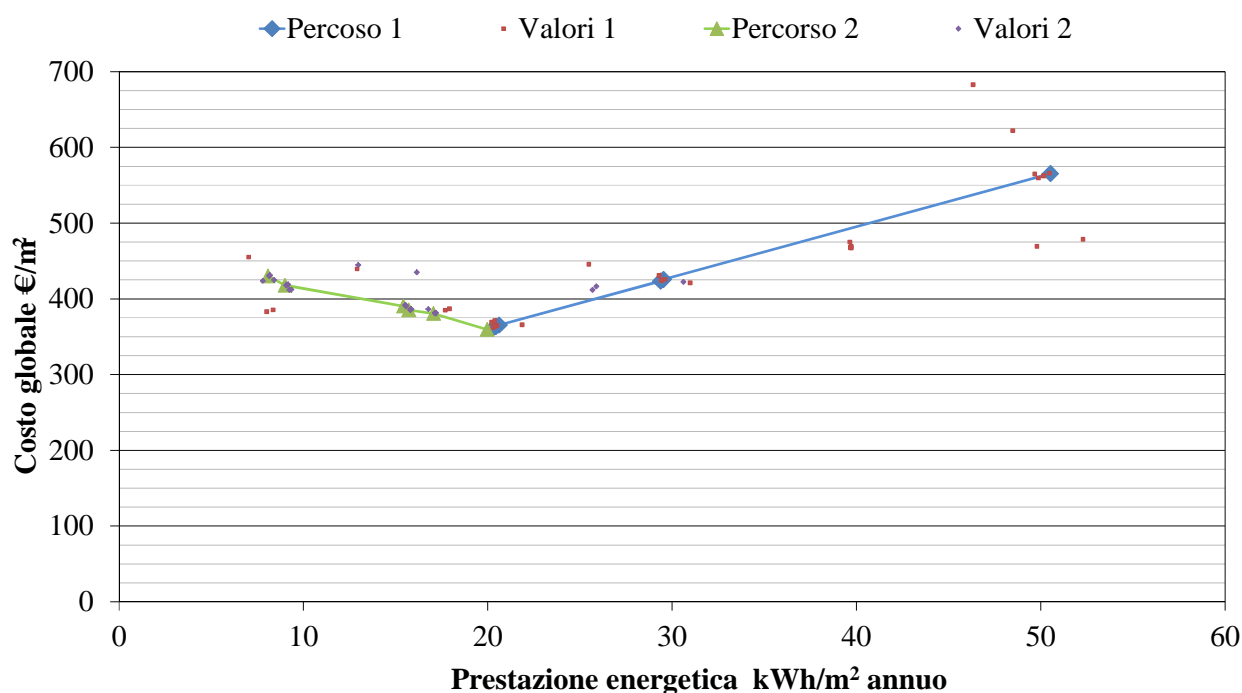


Figura 40 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU6\_1a

Tabella 39 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU6\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1



### IU6\_1b- edificio di grossa taglia vetrato a nastro, orientamento Est-Ovest

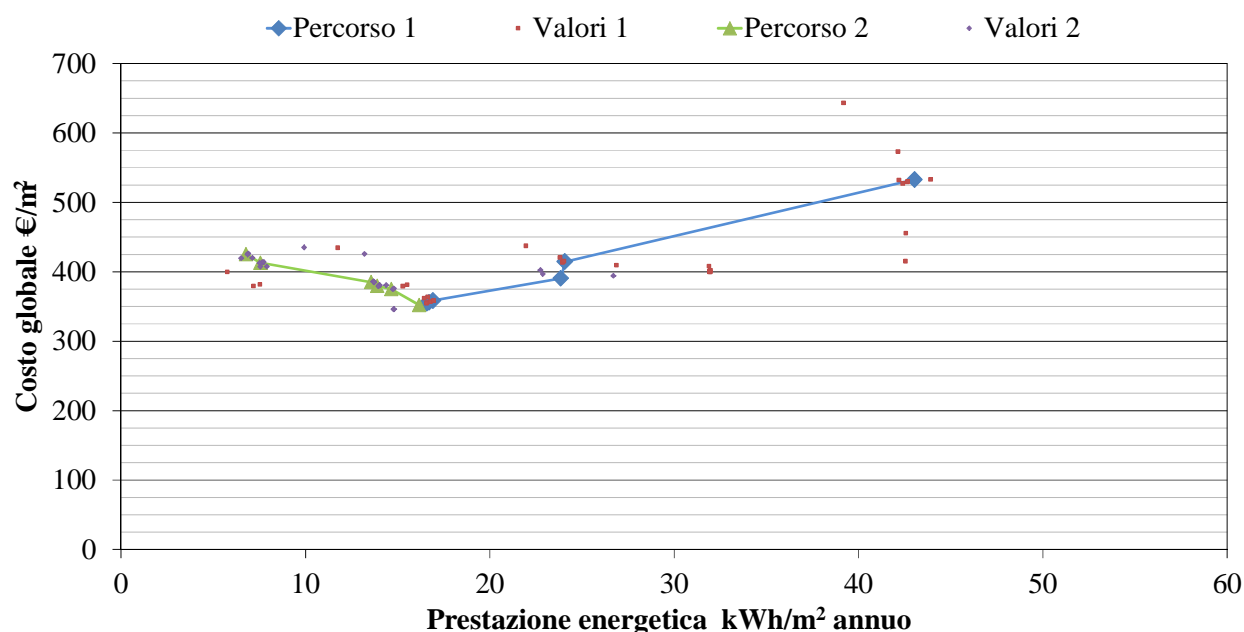


Figura 41 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU6\_1b

Tabella 40 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU6\_1b

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

### IU7\_1a - edificio di grossa taglia tutto vetro, orientamento Nord-Sud

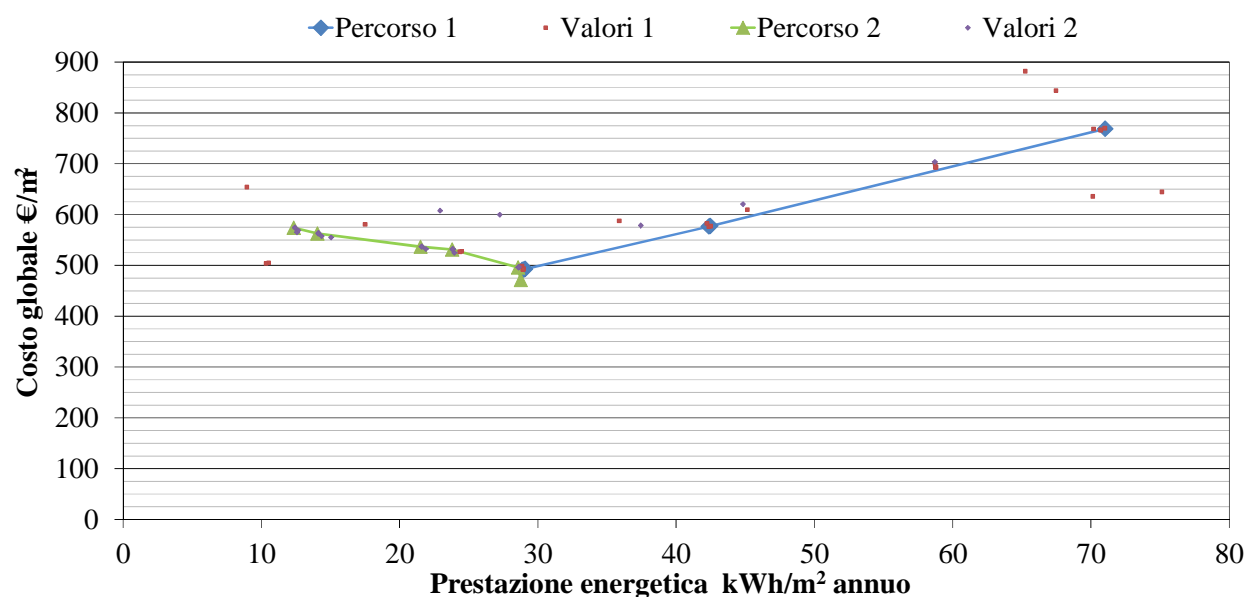


Figura 42 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU7\_1a

Tabella 41 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU7\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

### IU7\_1b - edificio di grossa taglia tutto vetro, orientamento Est-Ovest

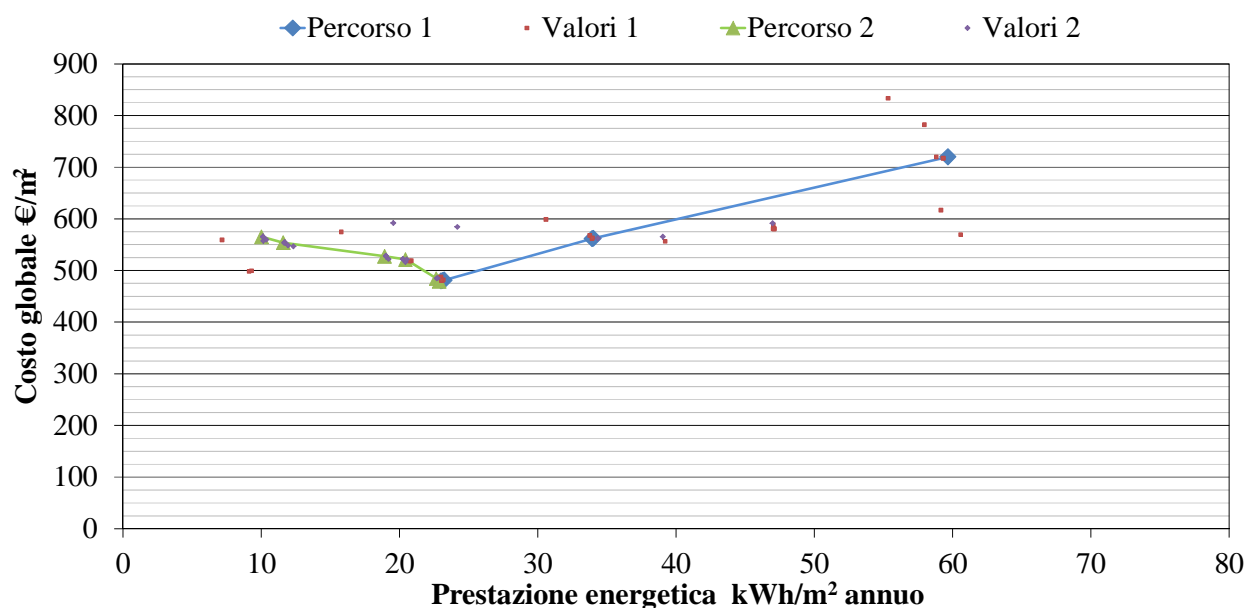


Figura 43 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU7\_1b

Tabella 42 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU7\_1b

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

IU8\_1a - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud, chiusura a secco

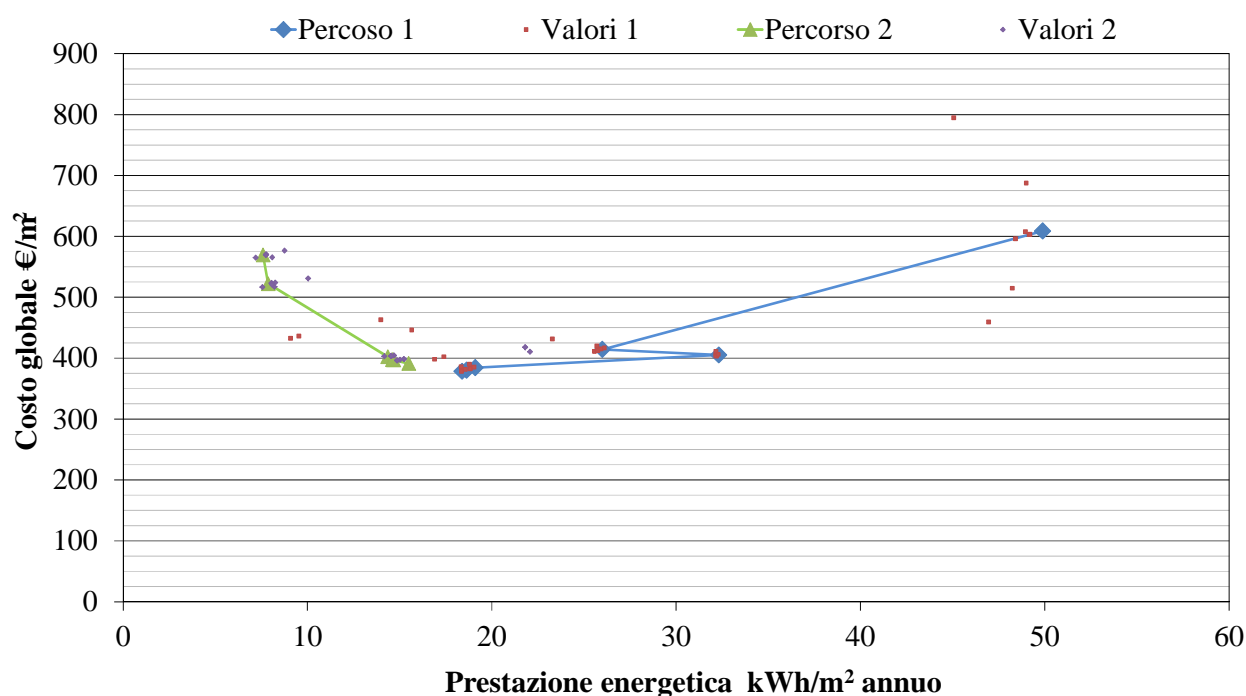
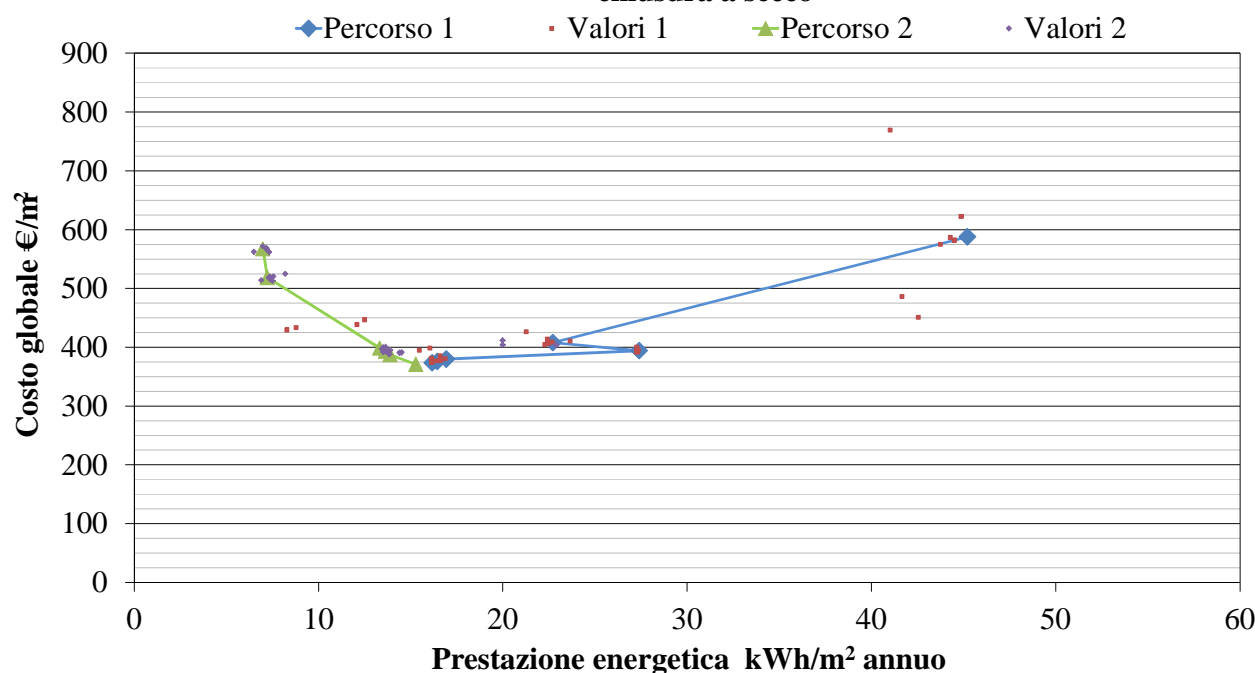


Figura 44 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8\_1a

Tabella 43 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.25	1
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.23	1
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.31	0
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Gas	0

**IU8\_1b - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura a secco**



*Figura 45 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8\_1b*

*Tabella 44 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8\_1b*

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

IU8\_2a - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud,  
chiusura tradizionale

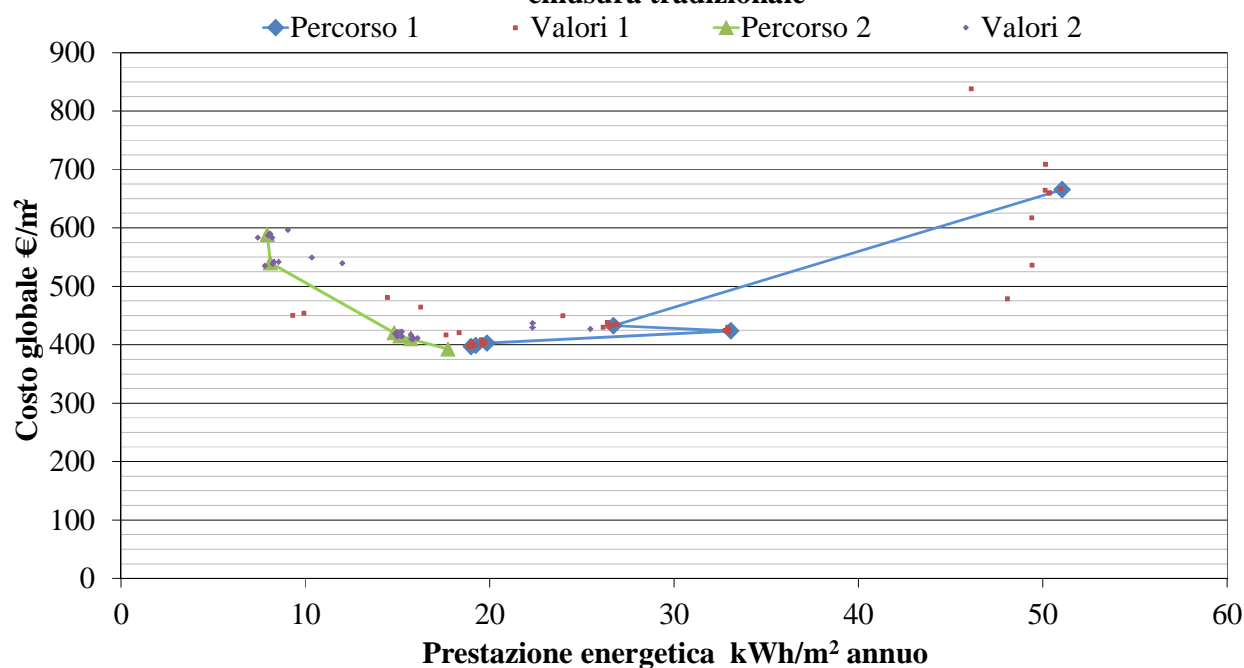


Figura 46 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8\_2a

Tabella 45 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8\_2a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

IU8\_2b - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura tradizionale

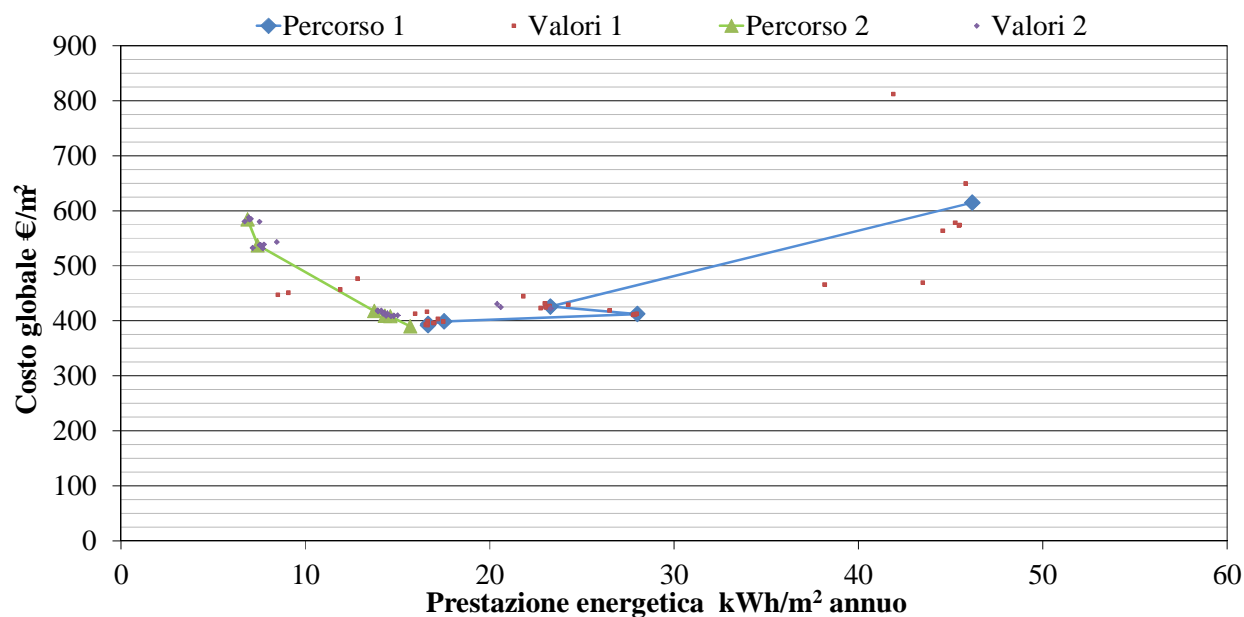


Figura 47 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU8\_2b

Tabella 46 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU8\_2b

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	\\	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

IU9\_1a - edificio di media taglia vetrato a nastro, orientamento Nord-Sud, chiusura a secco

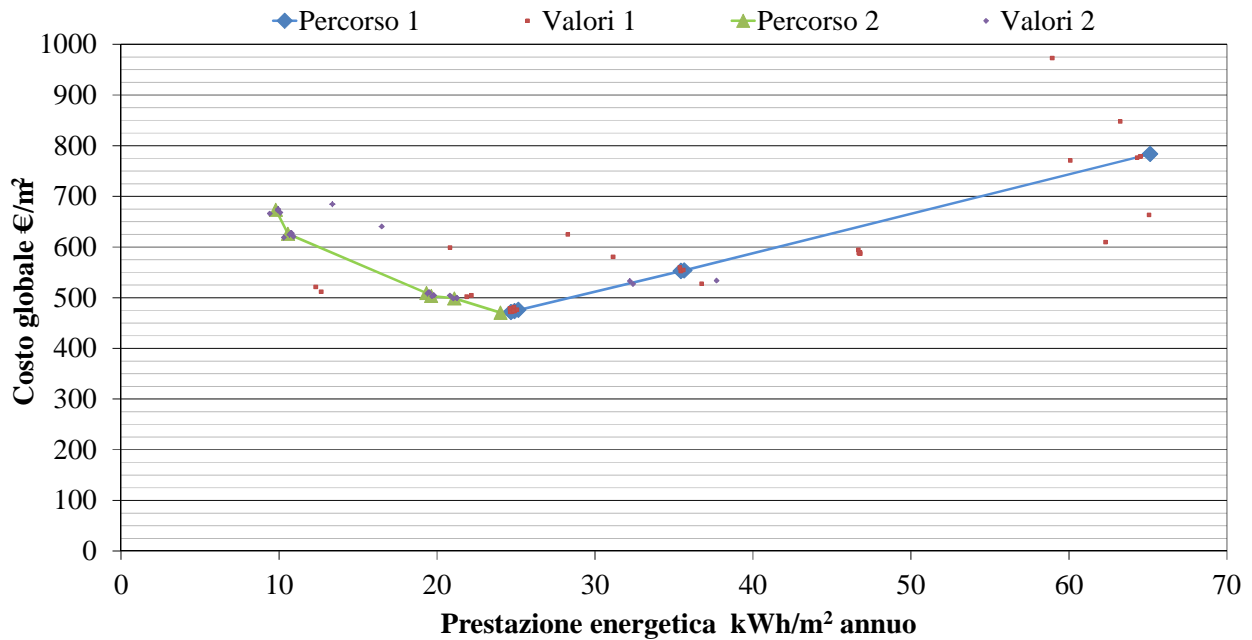


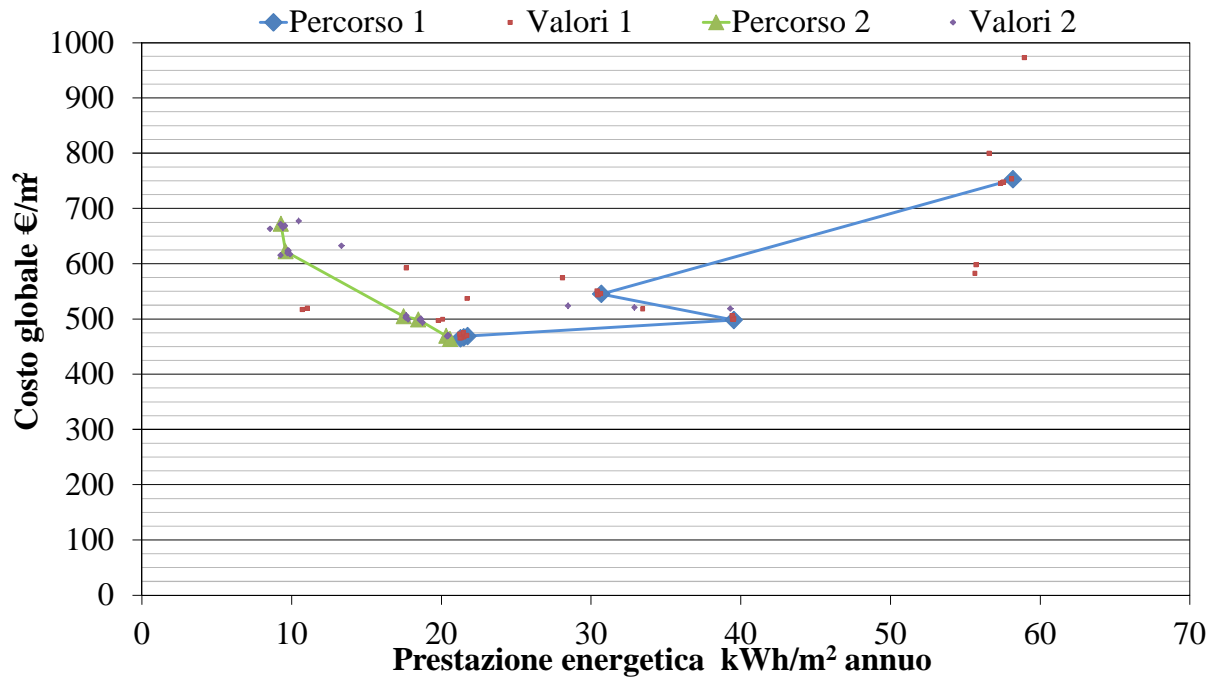
Figura 48 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9\_1a

Tabella 47 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9\_1a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1



**IU9\_1b - edificio di media taglia vetrato a nastro, orientamento Est-Ovest, chiusura a secco**



*Figura 49 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9\_1b*

*Tabella 48 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9\_1b*

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	∖∖∖	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

IU9\_2a - edificio a torre vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud, chiusura tradizionale

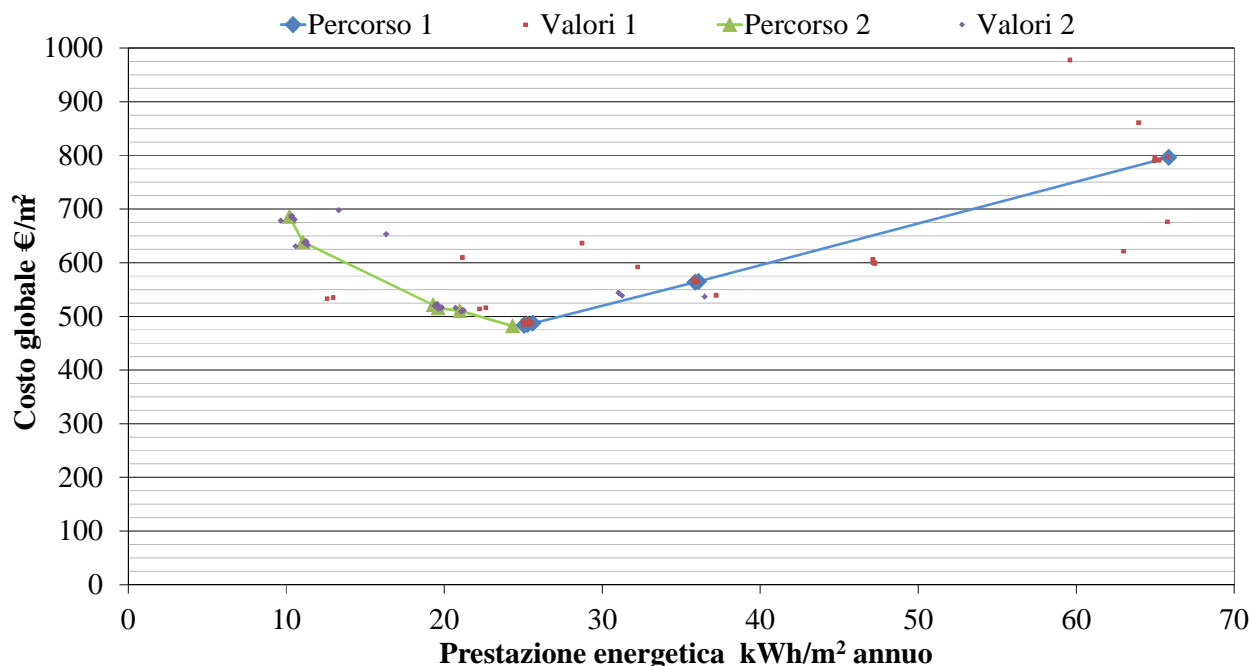
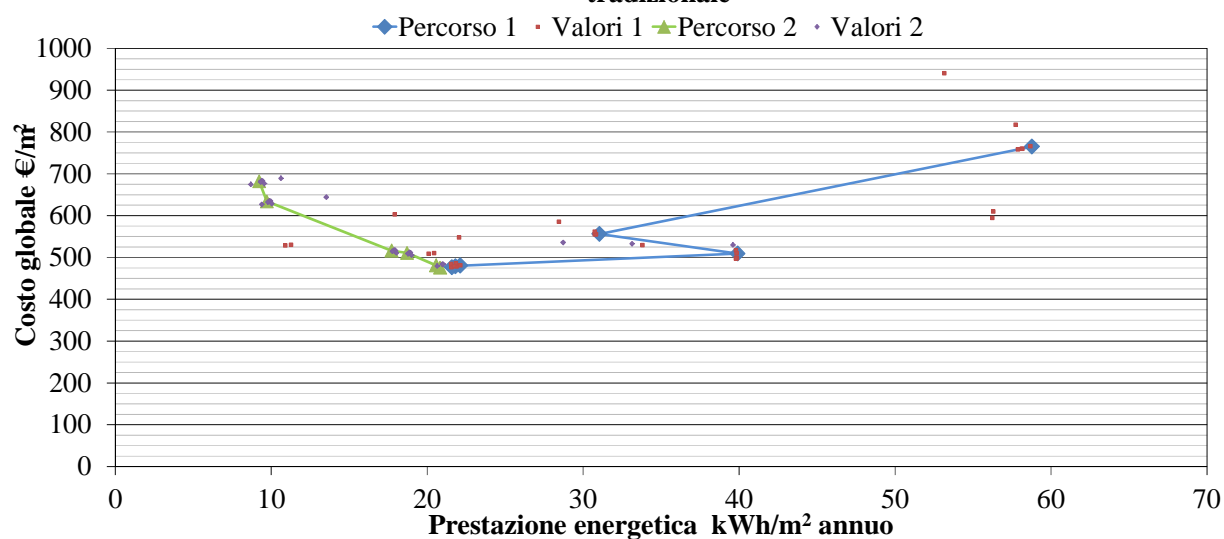


Figura 50 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9\_2a

Tabella 49 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9\_2a

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

**IU9\_2b - edificio a torre vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura tradizionale**



*Figura 51 - Valori di costo globale e prestazione energetica per i percorsi definiti dagli ottimi parziali e gli altri punti ricavati dal calcolo iterativo, combinazione IU9\_2b*

*Tabella 50 - Misure di efficienza energetica e parametri considerati per la combinazione IU9\_2b*

Cod.	Misura di efficienza energetica	Parametro	Simbolo	Valore	N. EEO
A	Isolamento termico della chiusura verticale opaca a secco	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	-	-
B	Isolamento termico della chiusura verticale opaca tradizionale	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.21	2
C	Isolamento termico della chiusura di copertura	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.19	2
D	Isolamento termico della chiusura controterra	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	0.20	2
E	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m <sup>2</sup> K)	U	1.20	2
F	Sistema di schermatura solare	Interasse lamelle (m)	m	-	0
M	Ventilazione meccanica con recuperatore di calore	Rendimento del recuperatore	η	0.87	0
N	Impianto solare fotovoltaico	Potenza di picco dei moduli	P	0	0
O	Generatore di acqua calda sanitaria	Tipologia di generazione	G	Elettrica	1

La misura di efficienza energetica che impatta maggiormente è la tipologia di generazione. La caldaia a condensazione abbinata ad un chiller tradizionale presenta la prestazione energetica peggiore, mentre se si considera una macchina ad assorbimento per la fase di raffrescamento la richiesta di energia primaria diminuisce ma vi è un sensibile aumento del costo globale. La tecnologia in pompa di calore reversibile acqua-acqua presenta i valori migliori sia in termini energetici che economici; ciò è dovuto al fatto che questo sistema presenta alti valori del COP e dell'EER (figure 19 e 20), diminuendo in tal modo la richiesta di energia elettrica, e conseguentemente primaria. Le prestazioni della pompa di calore aria-acqua si attestano in posizioni intermedie fra le precedenti (figure 17 e 18). In tabella 51 si riporta un esempio di quanto esposto in questo paragrafo, in riferimento alla prima iterazione dell'archetipo IU1\_1a per il percorso 1.

*Tabella 51 - Valori di EP e costo in funzione della tipologia di generazione riferiti alla prima iterazione del percorso 1 dell'archetipo IU1\_1a*

<b>Tipologia di generazione</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>pompa di calore reversibile aria-acqua</b>	27.51	283.99
<b>pompa di calore reversibile acqua-acqua</b>	16.07	258.59
<b>caldaia a condensazione e chiller</b>	28.14	330.31
<b>caldaia a condensazione e chiller ad assorbimento</b>	25.50	400.79

Stabilita la tipologia di generazione, si può vedere come le altre misure che portano ad un livello ottimale i consumi energetici siano gli interventi sull'involucro. Questo si traduce in incrementi dello spessore degli strati di isolante e soprattutto nell'utilizzo di serramenti ad alte prestazioni. Questi interventi sono favoriti dal basso costo, mentre l'installazione di un sistema di ventilazione con uno scambiatore ad alto rendimento non arriva a produrre benefici energetici tali da compensare il suo costo, come si può vedere alla tabella 52.

*Tabella 52 - Valori di EP e costo per i punti di partenza, gli ottimi globali e l'installazione di uno scambiatore più efficiente, riferiti alle prime tre iterazione del percorso 1 dell'archetipo IUI\_1a*

<b>Simulazione - percorso 1</b>	<b>EP [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Costo [€/m<sup>2</sup>]</b>
<b>partenza prima iterazione</b>	28.14	330.31
<b>primo ottimo parziale</b>	16.07	258.59
<b>scambiatore più efficace</b>	27.31	329.52
<b>partenza seconda iterazione</b>	16.07	258.59
<b>secondo ottimo parziale</b>	20.42	246.66
<b>scambiatore più efficace</b>	15.82	264.23
<b>partenza terza iterazione</b>	20.42	246.66
<b>terzo ottimo parziale</b>	11.82	232.06
<b>scambiatore più efficace</b>	16.03	258.89

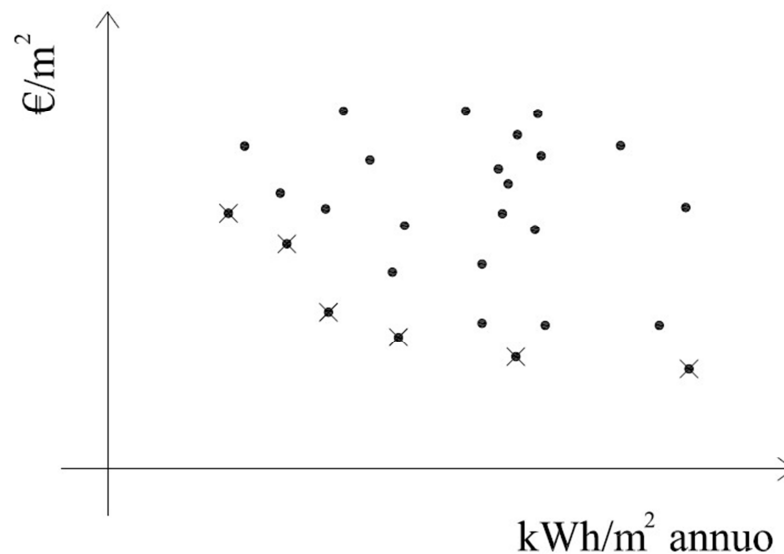
L'impianto solare fotovoltaico abbassa sensibilmente i consumi di energia primaria dell'edificio, ma presenta costi molti elevati. Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria, trattandosi della categoria di edifici ad uso ufficio, presenta dei consumi energetici poco rilevanti rispetto al corrispettivo fabbisogno per la climatizzazione (mediamente meno del 2%), l'utilizzo quindi di una tipologia di generazione piuttosto che un'altra non altera sensibilmente i valori.

## 7.3 Curve ed intervalli ottimali di prestazione

Le combinazioni di punti definite in termini di fabbisogno energetico e VAN calcolate nei percorsi iterativi precedentemente esposti vengono utilizzate per la costruzione delle curve di prestazione, che rappresentano l'involuppo dei punti trovati nelle iterazioni. Su queste curve verranno stabiliti gli intervalli ottimali.

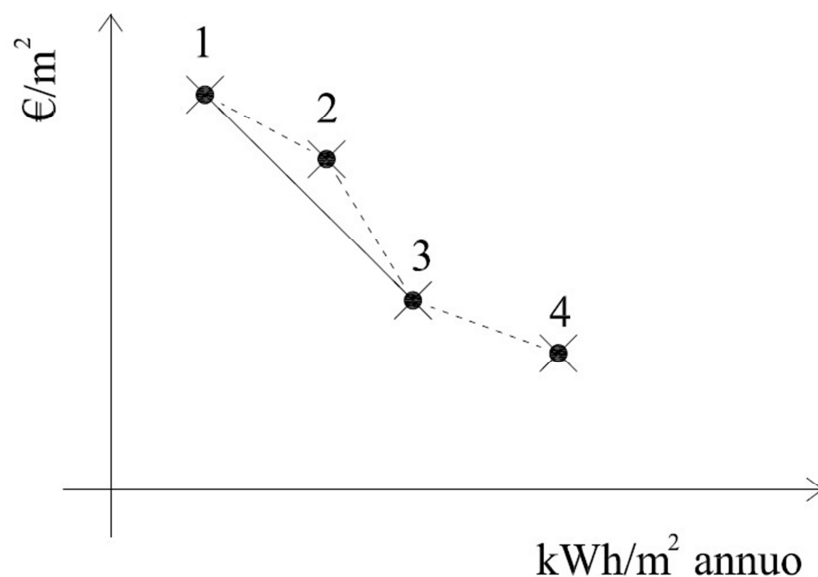
### 7.3.1 Costruzione delle curve ed individuazione degli intervalli

La costruzione delle curve parte dall'individuazione con un grafico a dispersione di tutti i punti ricavati per ogni archetipo morfologico. Della nuvola di valori presente sul grafico vengono selezionati i minimi, come si può vedere nell'esempio schematico in figura 52.



*Figura 52 - Esempio della nuvola di valori energetici ed economici in cui sono evidenziati i minimi*

I punti contrassegnate con la X sono i minimi individuati, il passo successivo è quello di eliminare i minimi non interessanti considerando le pendenze delle rette interpolanti. Questo metodo è rappresentato graficamente nella figura 53.



*Figura 53 - Scelta dei minimi interessanti sulla base della pendenza dell'interpolante*

Il percorso che unisce i punti 1, 2, 3 e 4 è evidenziato con dalla linea tratteggiata, ma considerando le pendenze interpolanti il punto 2 è da escludere in quanto non interessante, (si cercano solo quei i punti che definiscono l'involuppo). Questo perchè la pendenza della retta che interpola i punti interessanti muovendosi verso destra (si abbassa il costo globale e peggiora la prestazione energetica) tende a diminuire, come accade tra i punti 1, 3 e 4. Il punto 2 invece ha prima una pendenza minore e poi maggiore.

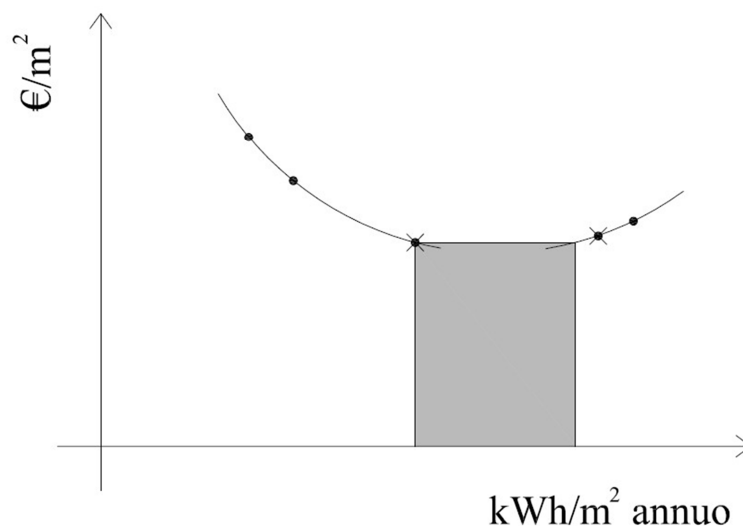
L'involuppo della nuvola di punti è approssimabile con l'interpolante dei punti scelti con il procedimento descritto. L'equazione della retta interpolante ha la generica forma di un polinomio di terzo o secondo grado:

$$y = p_1 * x^3 + p_2 * x^2 + p_3 * x + p_4$$

$$y = p_1 * x^2 + p_2 * x + p_3 * x$$

Dove  $x$  rappresenta la prestazione energetica ed  $y$  il costo globale. In alcune simulazioni sono state valutate due equazioni interpolanti, in quanto la curva della prima interpolante non rappresentava correttamente alcune parti della nuvola di punti, tendendo ad evidenziare un costo globale più basso rispetto a quello del corretto involucro. Graficamente questo si traduce in due curve sul grafico, la prima in colore nero e l'eventuale seconda interpolante in rosso.

Una volta costruita la curva, nella parte centrale (più bassa) si trovano i due punti della nuvola caratterizzati dal costo minimo, tra i quali si sceglie quello con il valore minore. Partendo da questo costo globale si trova l'intervallo di prestazione ottimale. Questo procedimento viene riportato nella figura 54.



**Figura 54 - Definizione dell'intervallo di prestazione energetica ottimale partendo dal punto della nuvola che presenta il valore globale minimo**

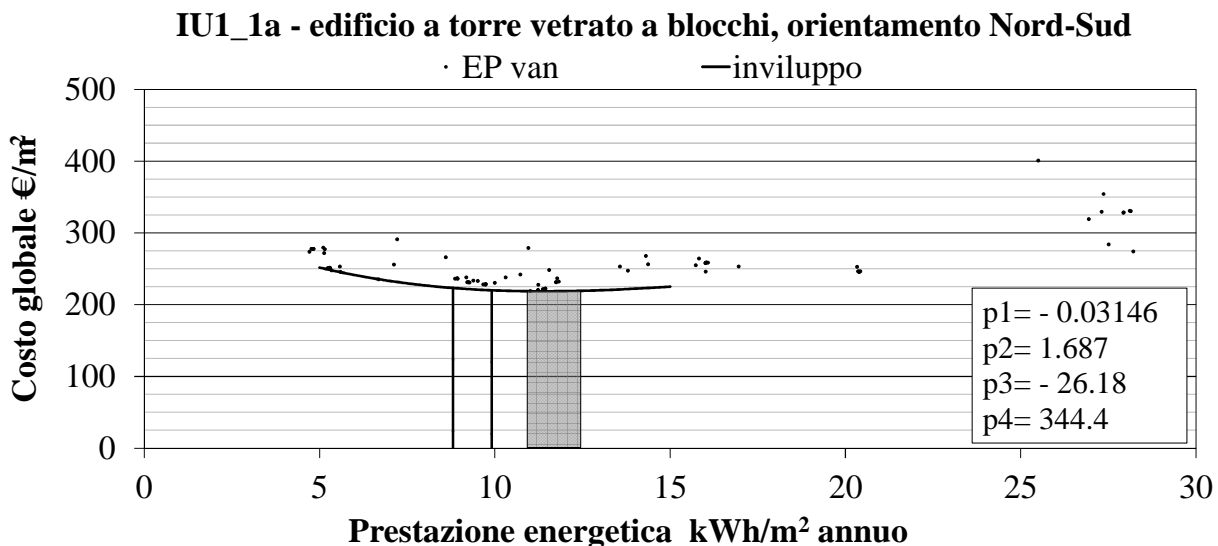
La zona centrale della curva corrispondente all'intervallo ottimale di prestazione energetica viene appiattita, in quanto l'abbassamento del costo in quei punti è dovuto all'equazione di involucro e non a punti reali della nuvola di valori.

Si evidenzia inoltre l'aumento di costo corrispondente alla diminuzione del 10% prima e del 20% del fabbisogno di energia primaria, rispetto al valore minimo di prestazione energetica dell'intervallo.

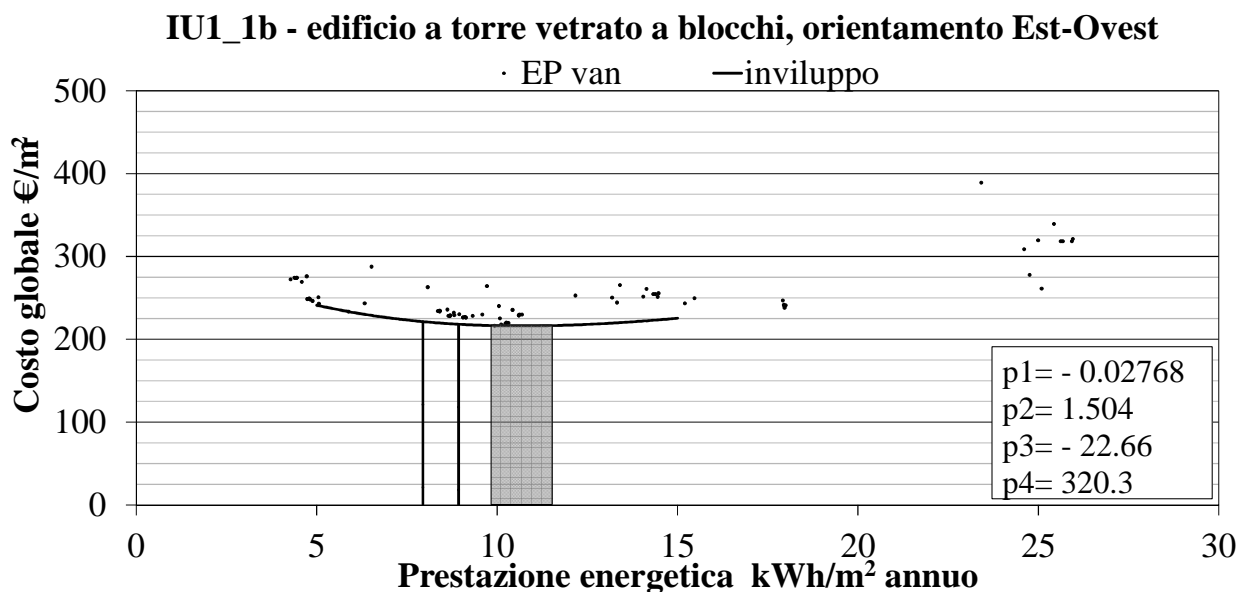


### 7.3.2 Grafici delle curve e degli intervalli ottimali di prestazione

Si riportano le curve e gli intervalli ottimali di prestazione per ognuna delle 24 combinazioni, nella casella di testo all'interno di ogni grafico si riportano i coefficienti delle equazioni degli involuipi.

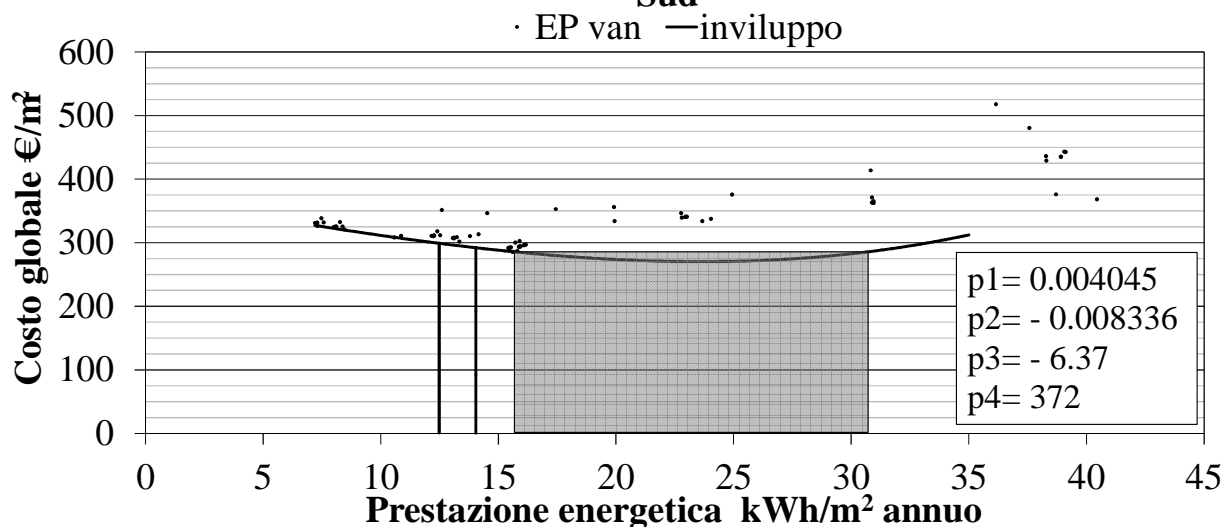


*Figura 55 - Combinazione IU1\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*



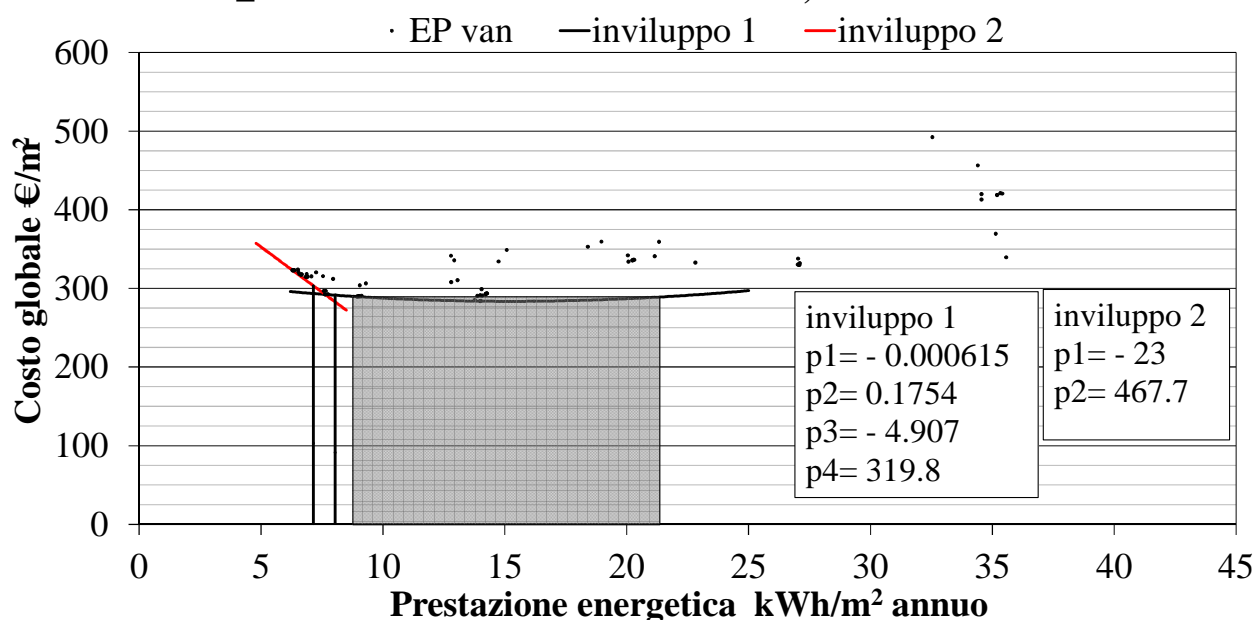
*Figura 56 - Combinazione IU1\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU2\_1a - edificio a torre vetrato a nastro, orientamento Nord-Sud**



*Figura 57 - Combinazione IU2\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU2\_1b - edificio a torre vetrato a nastro, orientamento Est-Ovest**



*Figura 58 - Combinazione IU2\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

### IU3\_1a - edificio a torre tuttovetro, orientamento Nord-Sud

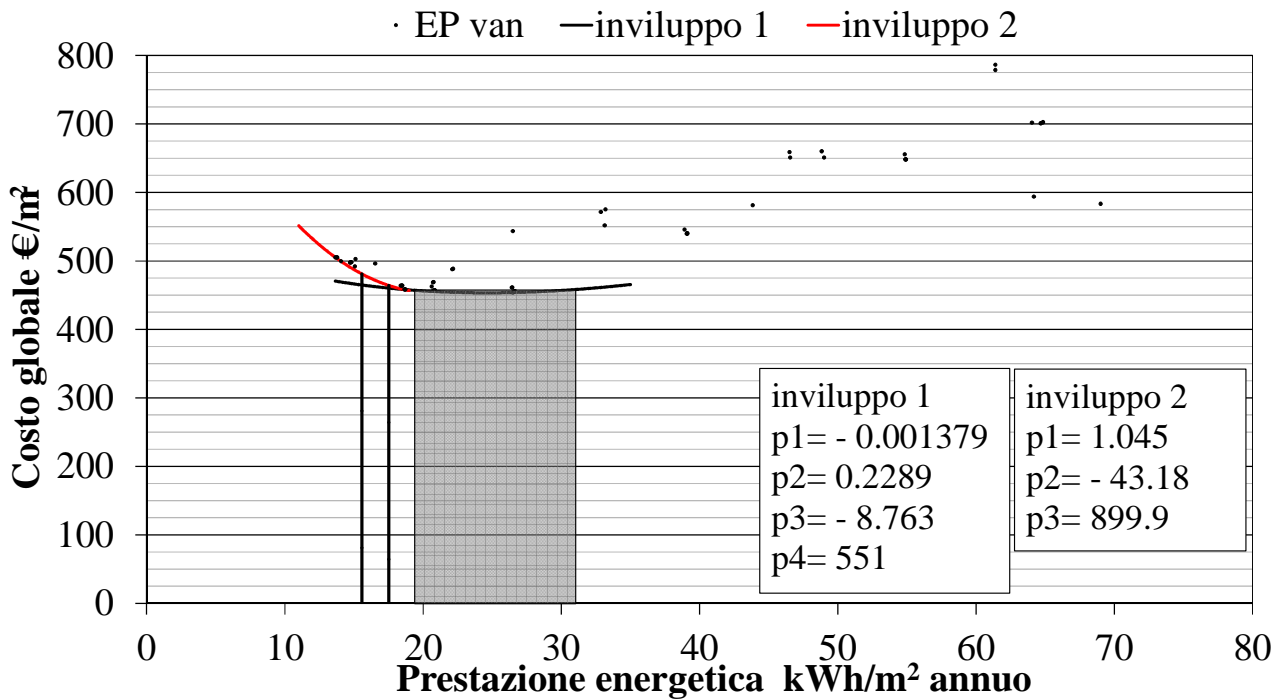


Figura 59 - Combinazione IU3\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%

### IU3\_1b - edificio a torre tuttovetro, orientamento Est-Ovest

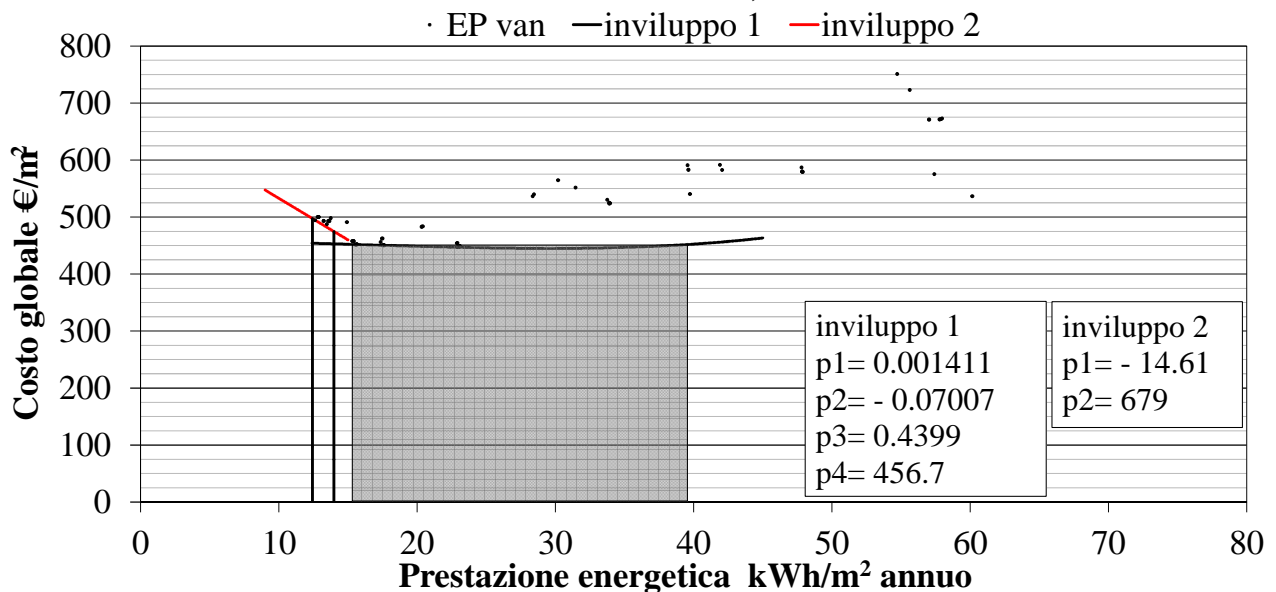
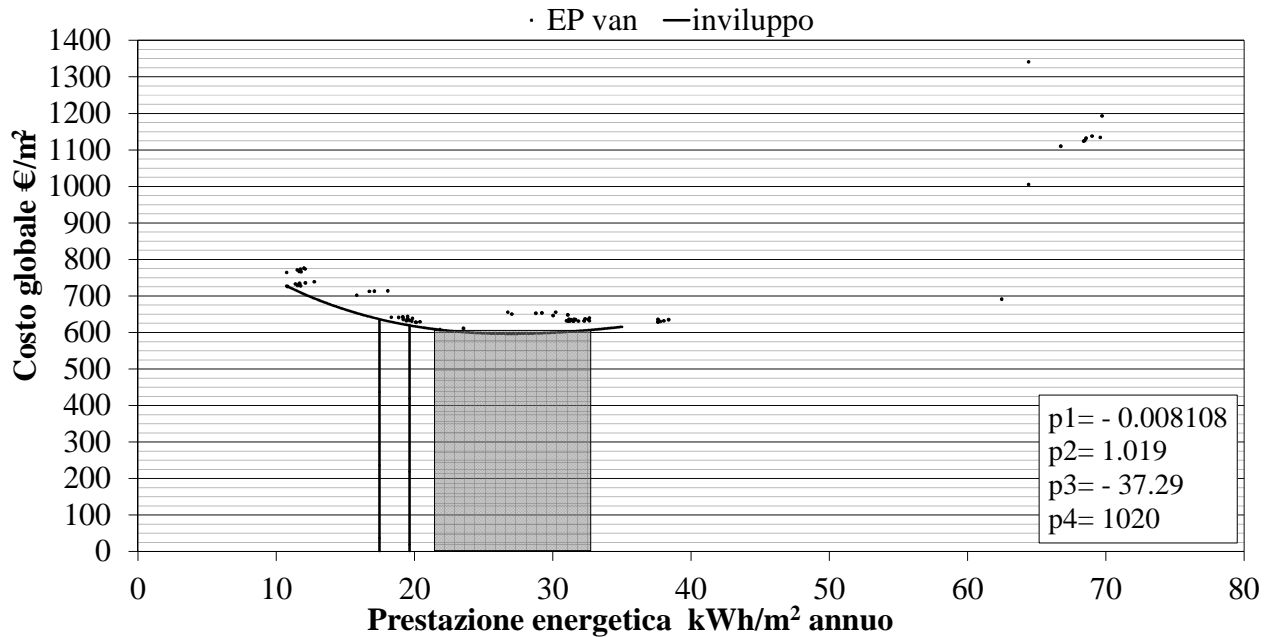


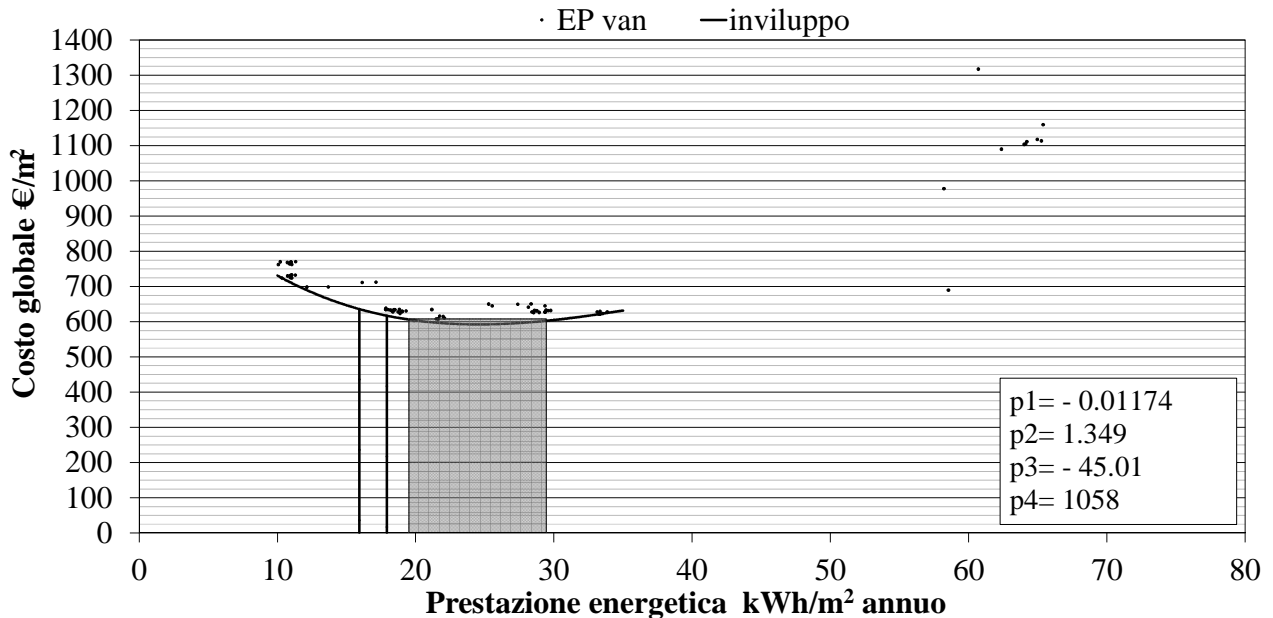
Figura 60 - Combinazione IU3\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%

**IU4\_1a - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud, chiusura a secco**



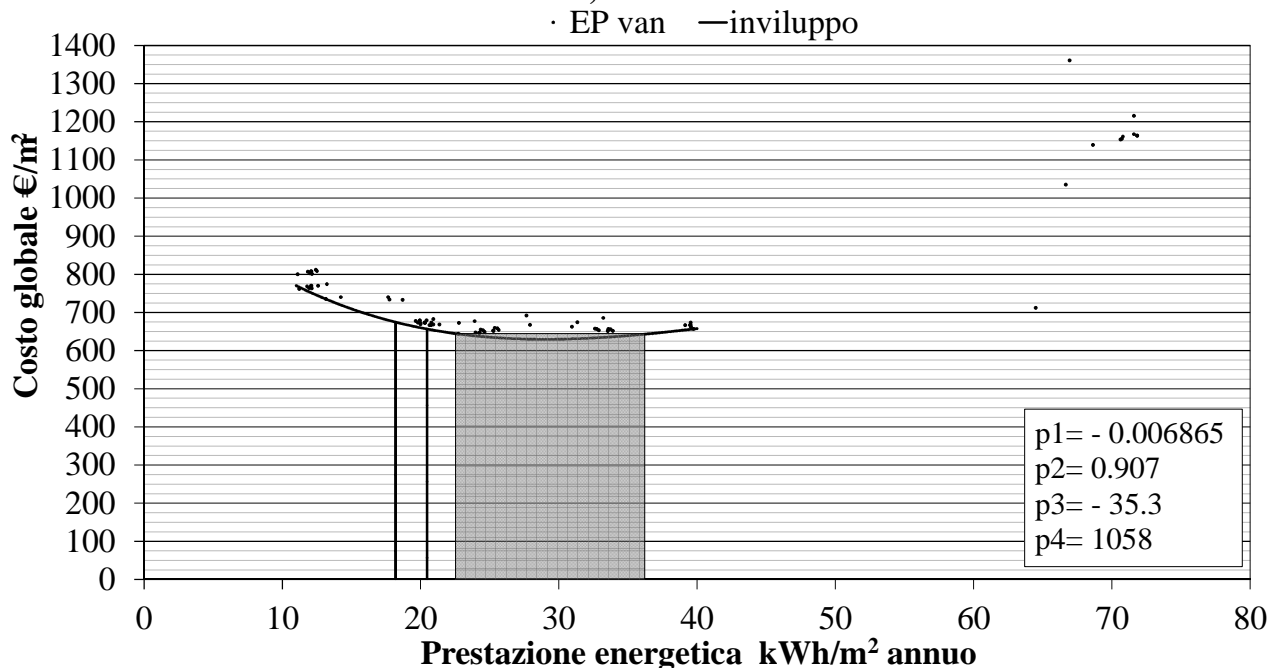
*Figura 61 - Combinazione IU4\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU4\_1b - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura a secco**



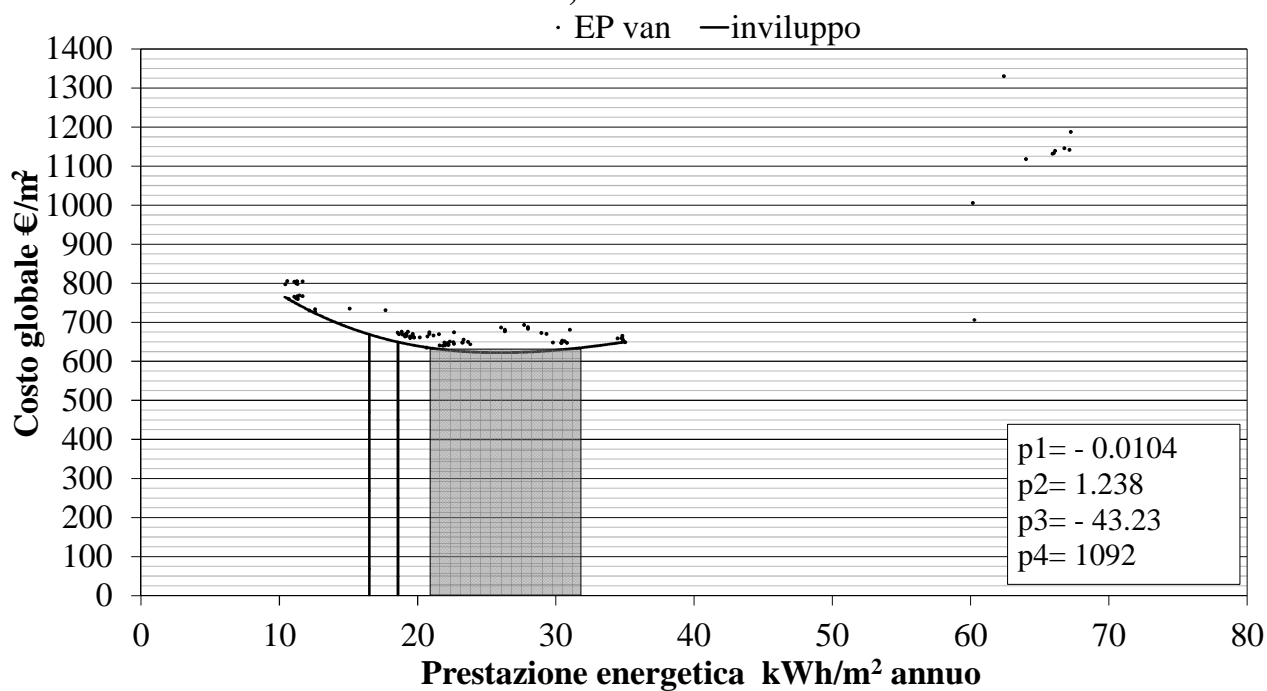
*Figura 62 - Combinazione IU4\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU4\_2a - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud, chiusura tradizionale**



*Figura 63 - Combinazione IU4\_2a: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU4\_2b - edificio di piccola taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura tradizionale**

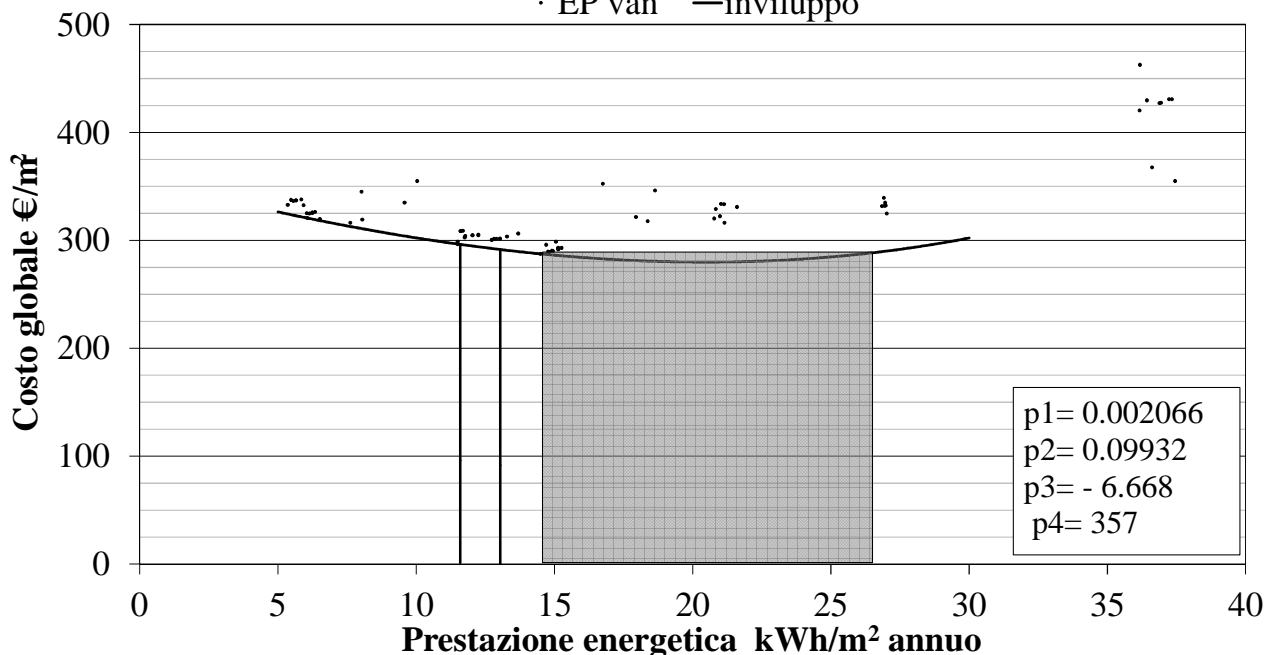


*Figura 64 - Combinazione IU4\_2b: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU5\_1a - edificio di grossa taglia vetrato a blocchi, orientamento**

**Nord-Sud**

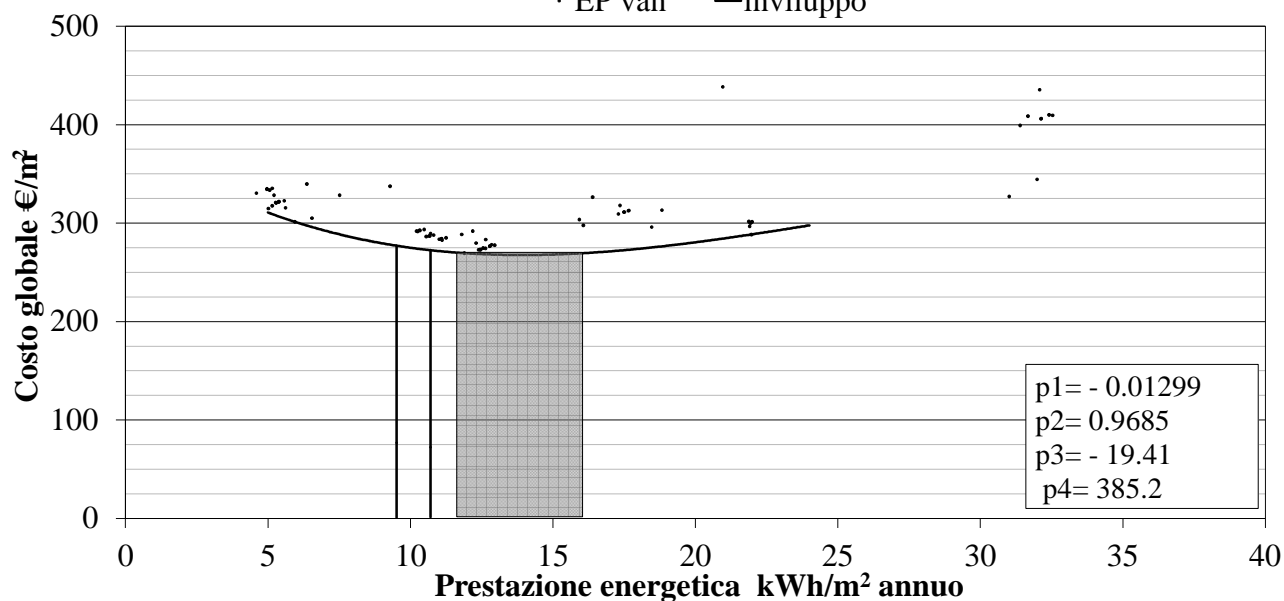
· EP van —involuppo



*Figura 65 - Combinazione IU5\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

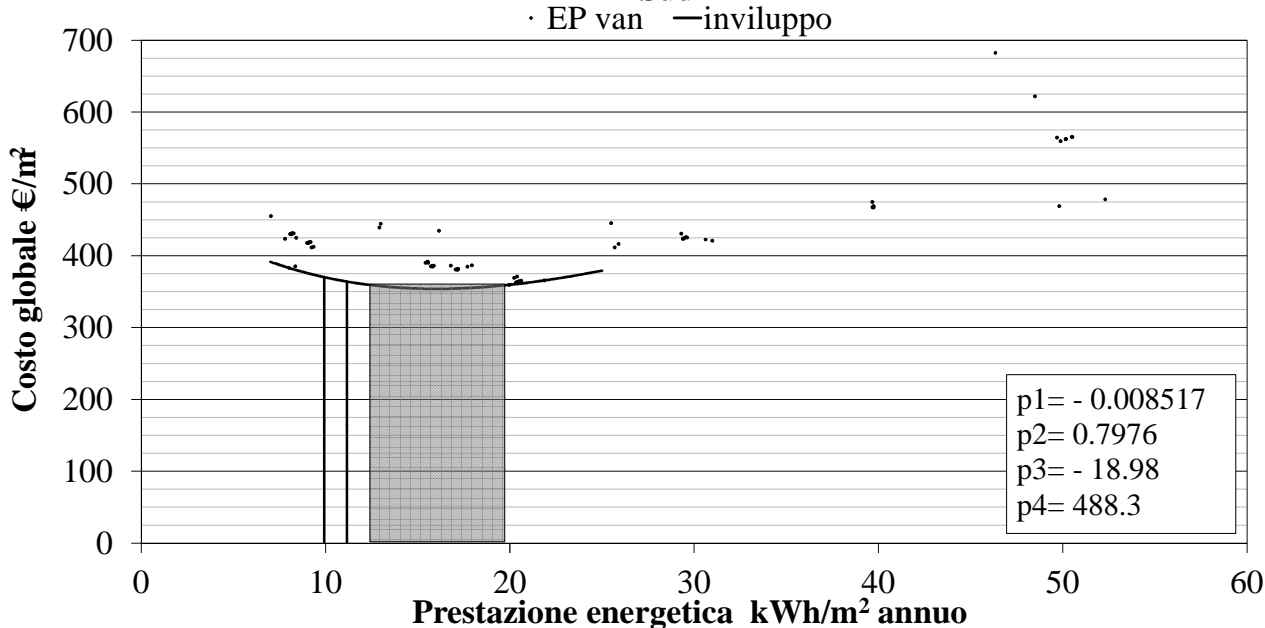
**IU5\_1b - edificio di grossa taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest**

· EP van —involuppo



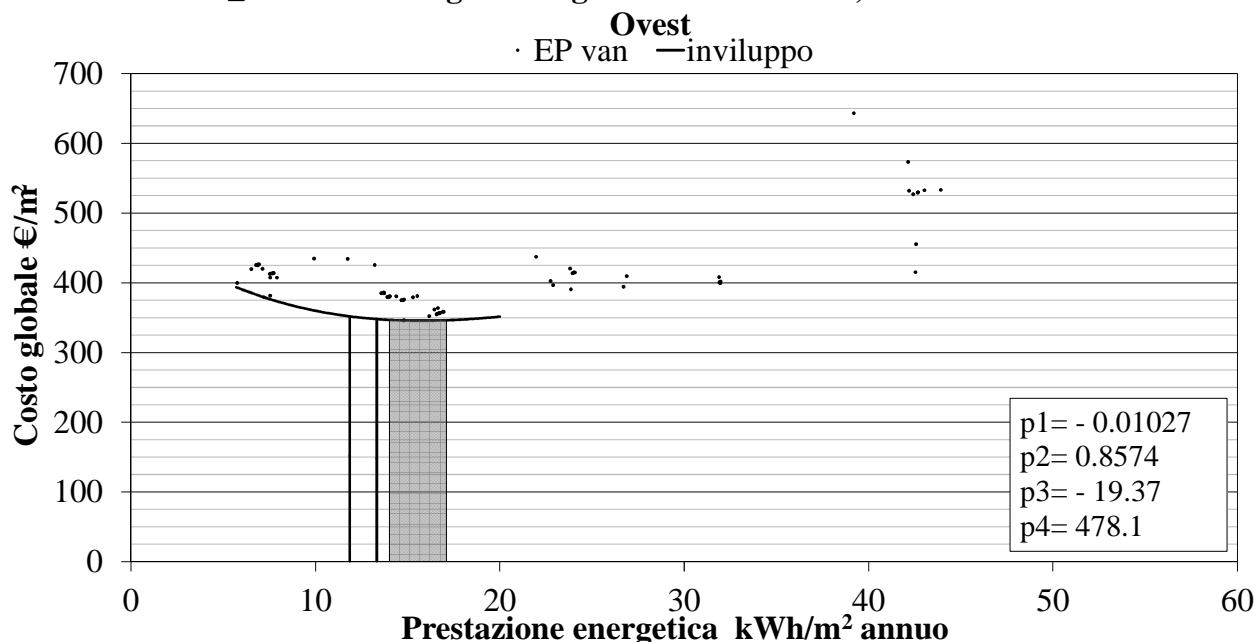
*Figura 66 - Combinazione IU5\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU6\_1a - edificio di grossa taglia vetrato a nastro, orientamento Nord-Sud**



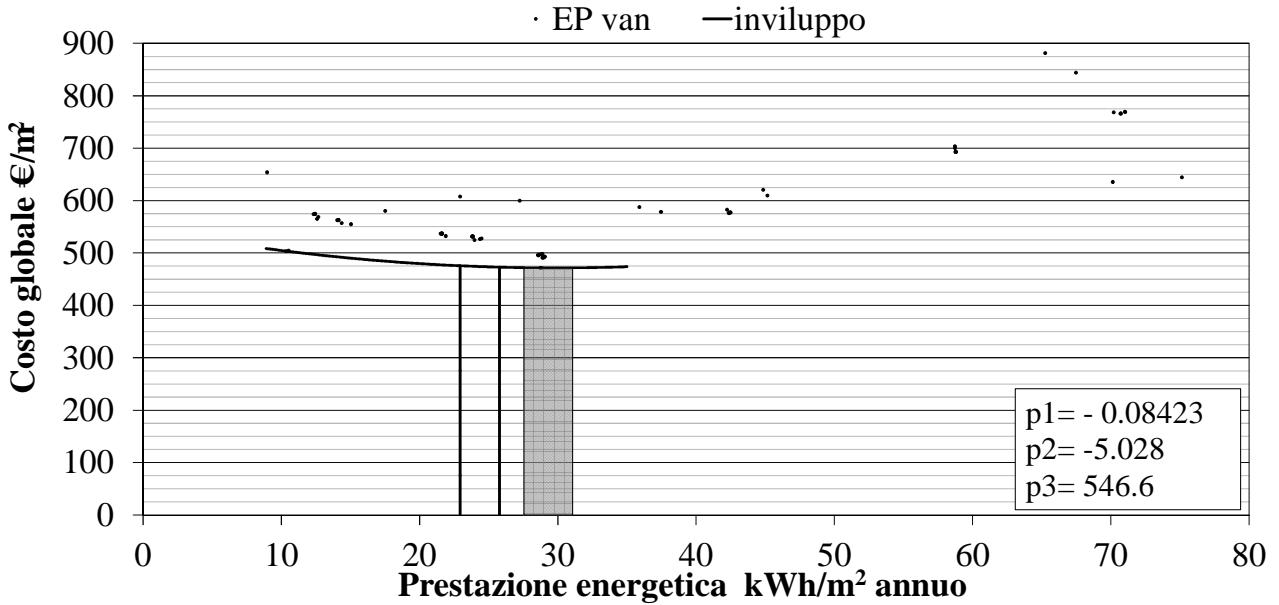
*Figura 67 - Combinazione IU6\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU6\_1b- edificio di grossa taglia vetrato a nastro, orientamento Est-Ovest**



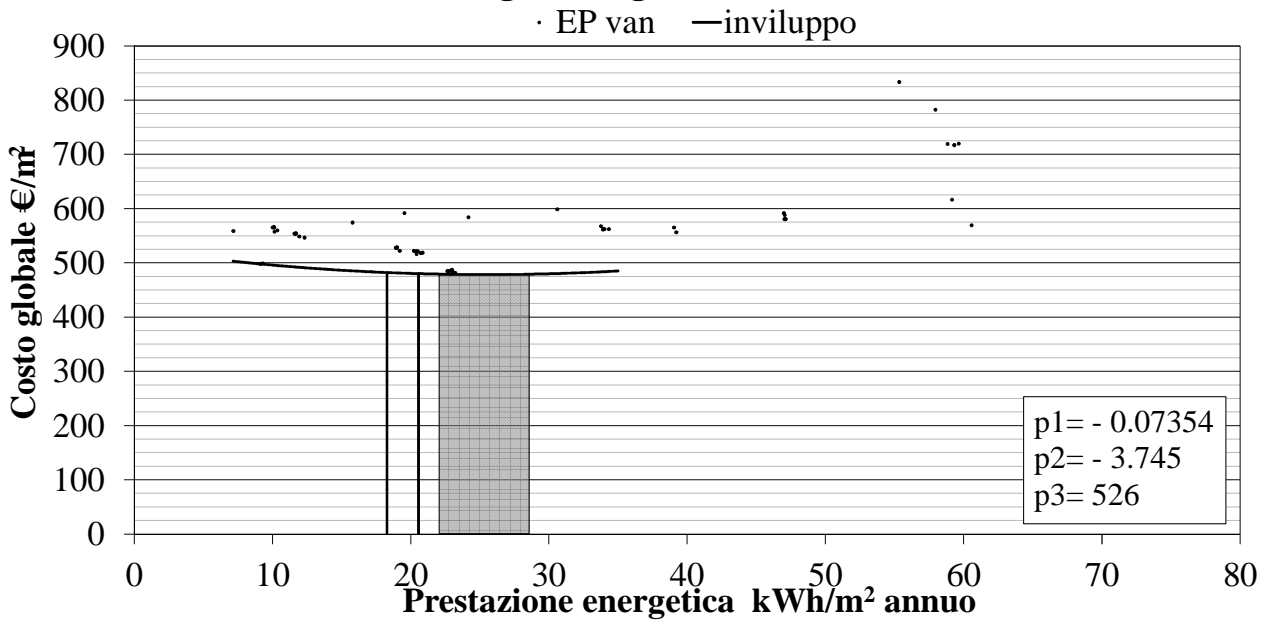
*Figura 68 - Combinazione IU6\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU7\_1a - edificio di grossa taglia tutto vetro, orientamento Nord-Sud**



*Figura 69 - Combinazione IU7\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

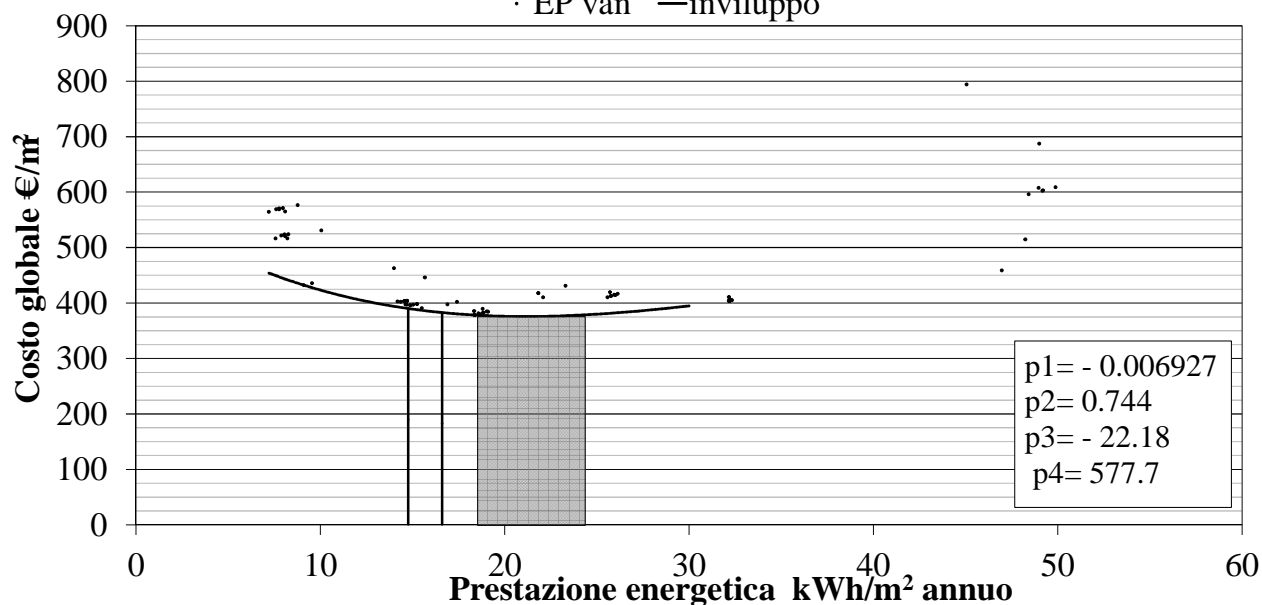
**IU7\_1b - edificio di grossa taglia tutto vetro, orientamento Est-Ovest**



*Figura 70 - Combinazione IU7\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

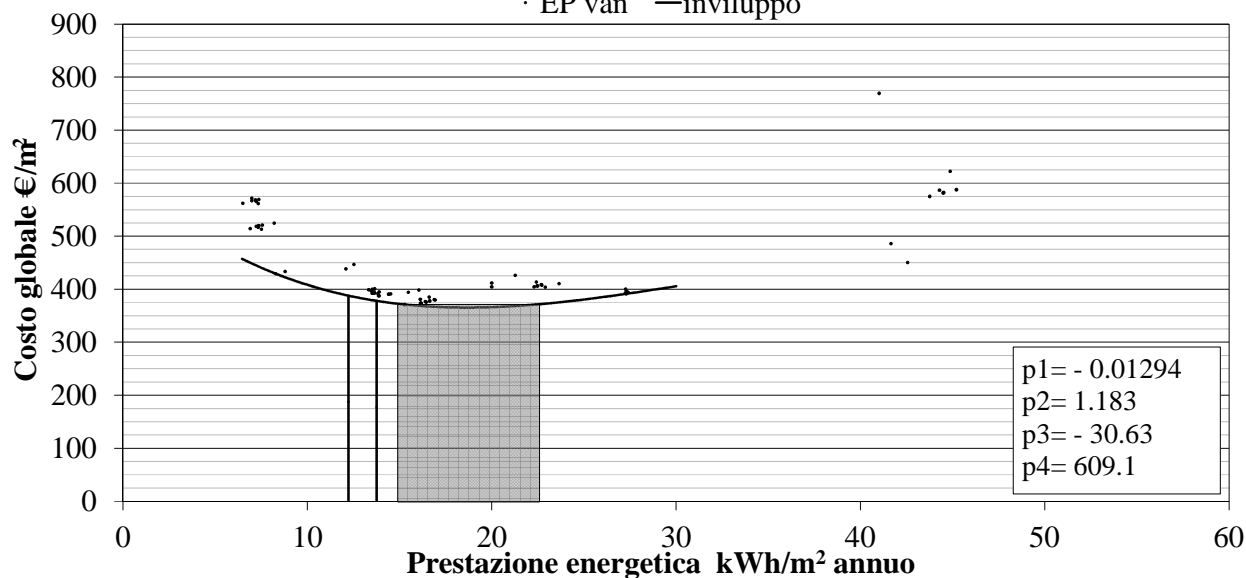


**IU8\_1a - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud, chiusura a secco**  
 · EP van —inviluppo



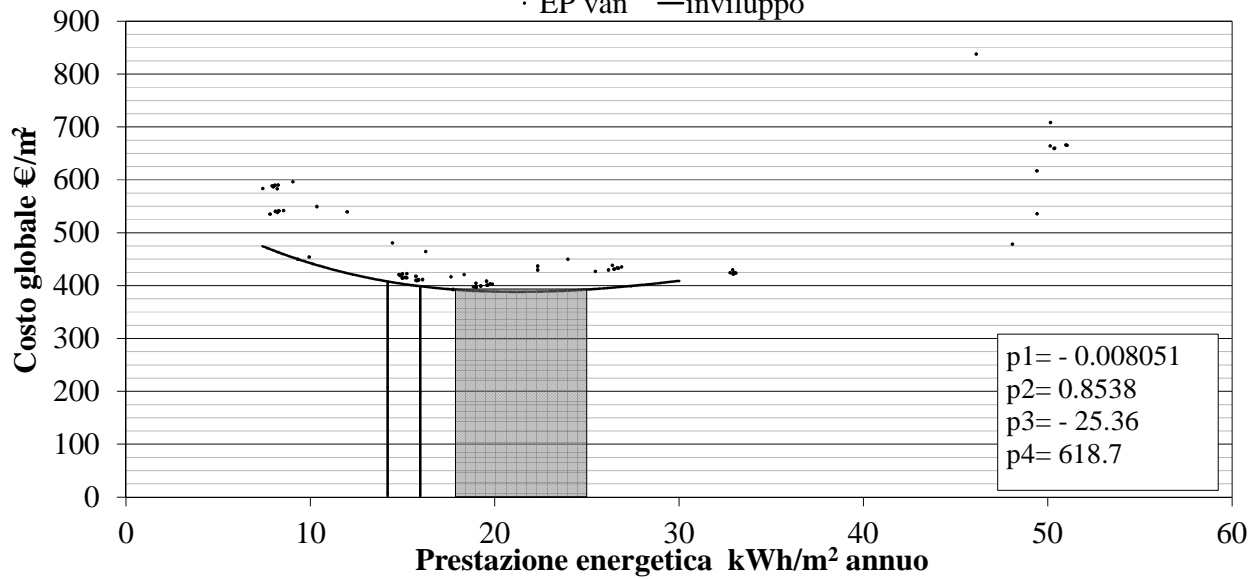
*Figura 71 - Combinazione IU8\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1, p_2, p_3, p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU8\_1b - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest, chiusura a secco**  
 · EP van —inviluppo



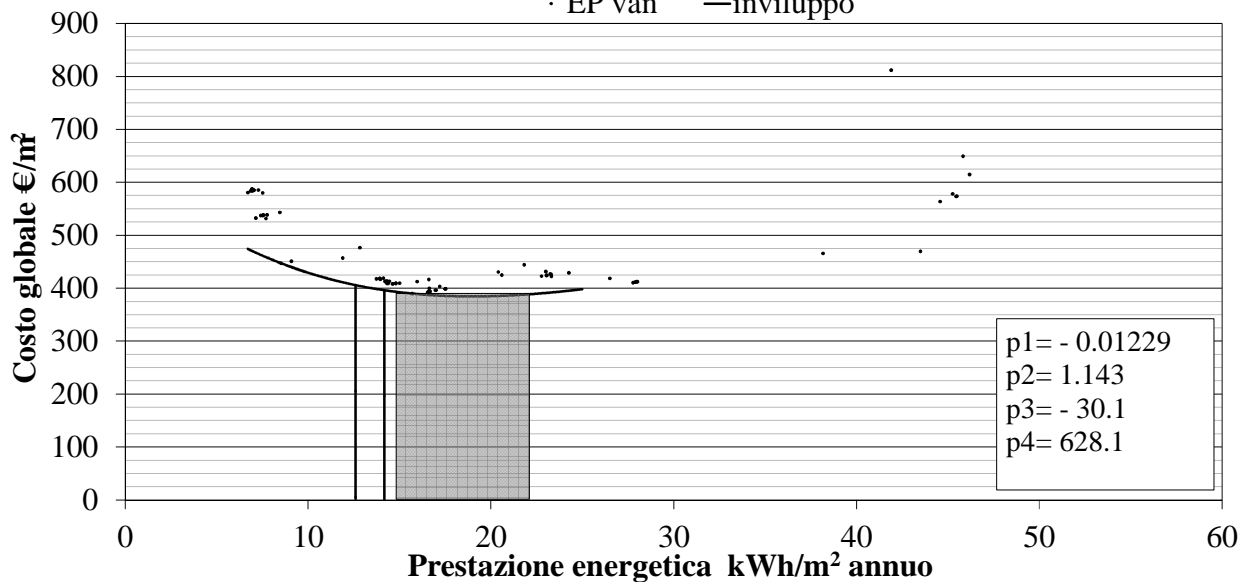
*Figura 72 - Combinazione IU8\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p_1, p_2, p_3, p_4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU8\_2a - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud,  
chiusura tradizionale**  
· EP van —inviluppo



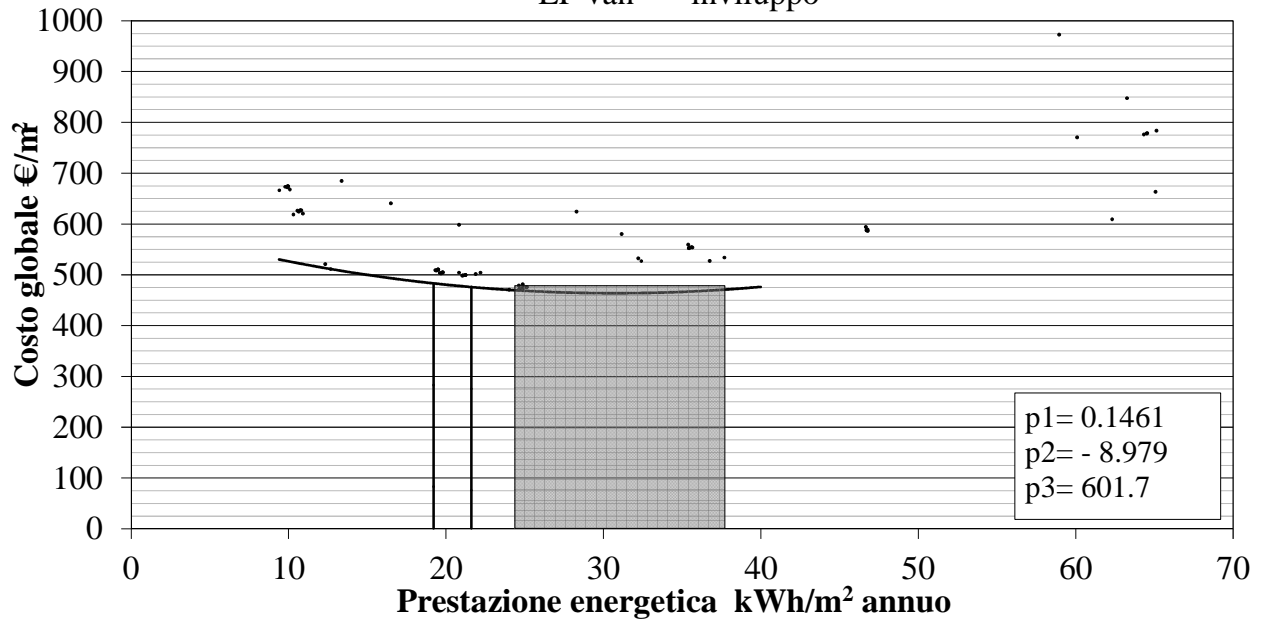
*Figura 73 - Combinazione IU8\_2a: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU8\_2b - edificio di media taglia vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest,  
chiusura tradizionale**  
· EP van —inviluppo



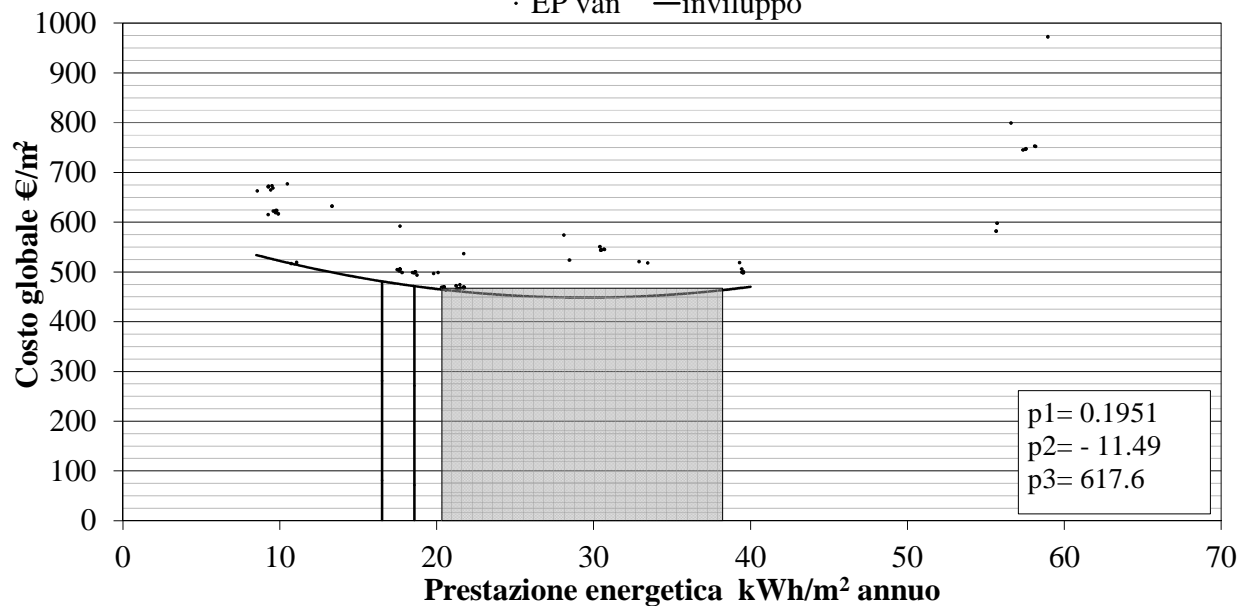
*Figura 74 - Combinazione IU8\_2b: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU9\_1a - edificio di media taglia vetrato a nastro, orientamento Nord-Sud, chiusura a secco**  
 · EP van —inviluppo



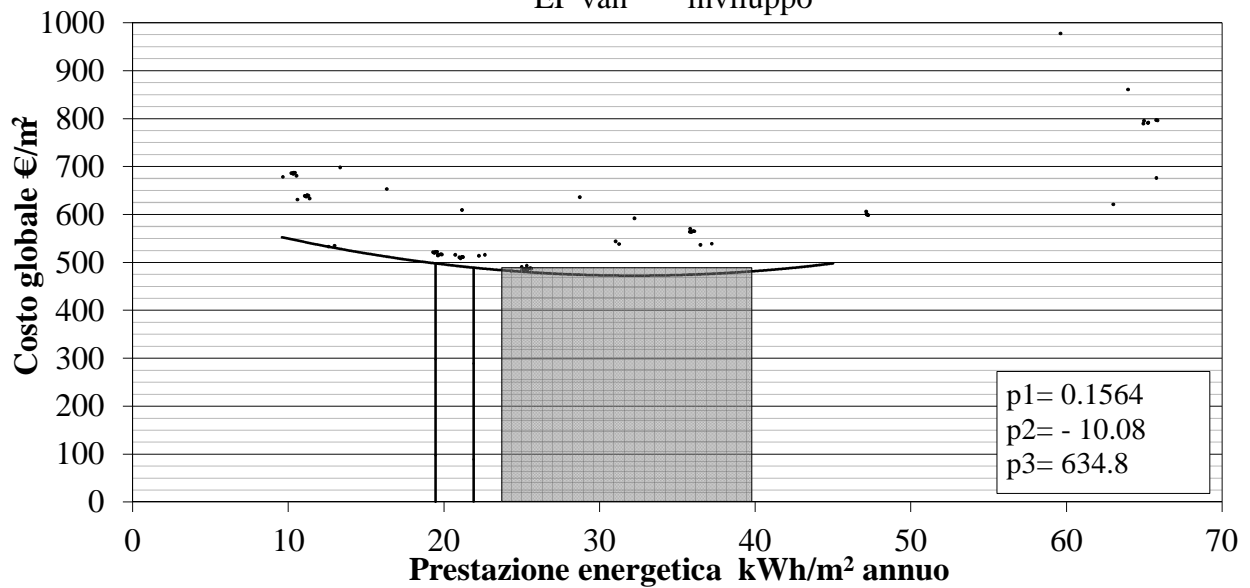
*Figura 75 - Combinazione IU9\_1a: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU9\_1b - edificio di media taglia vetrato a nastro, orientamento Est-Ovest, chiusura a secco**  
 · EP van —inviluppo



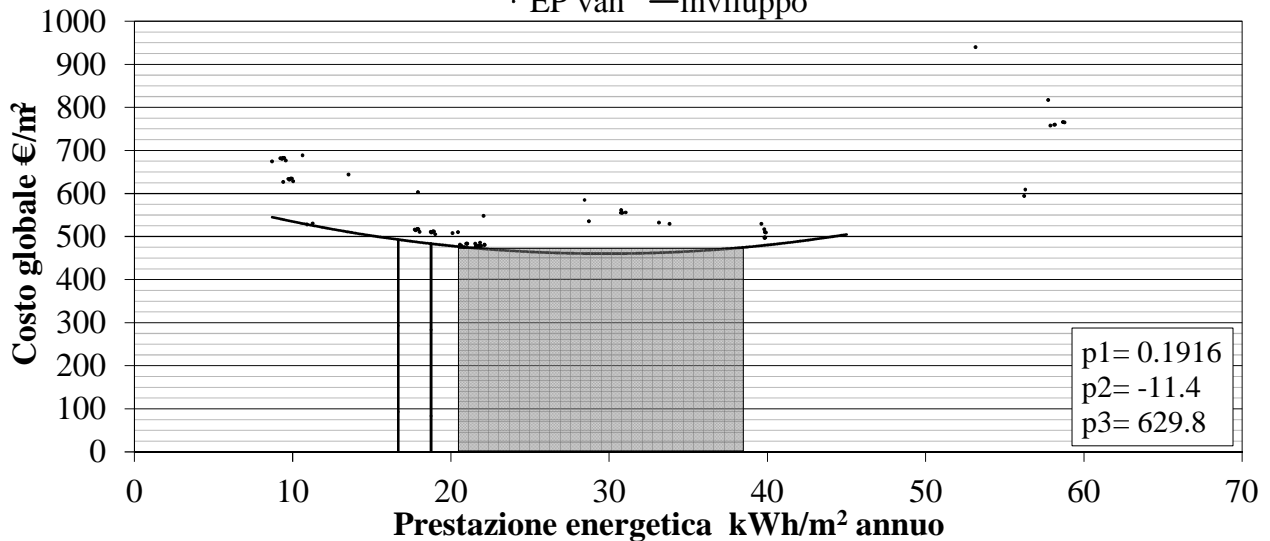
*Figura 76 - Combinazione IU9\_1b: punti, curva (con i relativi coefficienti p1, p2, p3, p4) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU9\_2a - edificio a torre vetrato a blocchi, orientamento Nord-Sud,  
chiusura tradizionale**  
· EP van —inviluppo



*Figura 77 - Combinazione IU9\_2a: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p1, p2, p3, p4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

**IU9\_2b - edificio a torre vetrato a blocchi, orientamento Est-Ovest,  
chiusura tradizionale**  
· EP van —inviluppo



*Figura 78 - Combinazione IU9\_2b: punti, curva (con i relativi coefficienti  $p1, p2, p3, p4$ ) ed intervallo ottimale di prestazione energetica corrispondente al minimo costo, valori del fabbisogno diminuito del 10% e 20%*

Nelle figure sono riportate, per ognuna delle 24 combinazioni di archetipi morfologici e misure di efficienza energetica, le curve ottimali di prestazione (con i coefficienti delle loro equazioni), il range di consumi energetici corrispondente al minimo costo globale e la variazione dei valori imponendo una diminuzione del fabbisogno energetico prima del 10% e poi del 20%.

Per i commenti relativi alle figure esposte si rimanda al paragrafo 7.4.

## 7.4 Confronto con la normativa e commenti

La tabella 53 riassume i risultati delle figure del paragrafo 7.3.2. Per ogni combinazione si riportano l'intervallo ottimale di prestazione energetica che minimizza il costo globale ed i valori dei punti che corrispondono ad una diminuzione del fabbisogno energetico del 10% e del 20%. I codici presenti sono di seguito elencati e descritti.

- Cod., codice della combinazione;
- CGM, costo globale minimo [ $\text{€}/\text{m}^2$ ];
- Range PECGM, range di prestazione energetica in corrispondenza del costo globale minimo [ $\text{kWh}/\text{m}^2$  annuo];
- AR PECGM, ampiezza del RANGE PECGM [ $\text{kWh}/\text{m}^2$  annuo];
- FED 10%, fabbisogno di energia primaria diminuito del 10% [ $\text{kWh}/\text{m}^2$  annuo];
- CGFED 10%, costo globale in corrispondenza della diminuzione del 10% del fabbisogno di energia primaria [ $\text{€}/\text{m}^2$ ];
- FED 20%, fabbisogno di energia primaria diminuito del 10% [ $\text{kWh}/\text{m}^2$  annuo];
- CGFED 20%, costo globale in corrispondenza della diminuzione del 10% del fabbisogno di energia primaria [ $\text{€}/\text{m}^2$ ].

**Tabella 53 - Dati ricavati dalle curve ottimali di prestazione, che definiscono il range di consumo energetico al costo minimo, i valori economici e di performance in corrispondenza di una diminuzione del 10% e del 20% del fabbisogno**

<b>Cod.</b>	<b>CGM</b>	<b>Range PECGM</b>	<b>AR PECGM</b>	<b>FED 10%</b>	<b>CG FED 10%</b>	<b>FED 20%</b>	<b>CG FED 20%</b>
IU1_1a	218.70	10.95 - 11.8	0.85	9.91	220.02	8.81	223.19
IU1_1b	216.47	9.95 - 11.45	1.50	8.94	218.16	7.94	221.33
IU2_1a	285.89	15.65 - 30.75	15.10	14.04	292.10	12.48	299.05
IU2_1b	289.55	8.95 - 21.60	12.65	8.05	291.35	7.15	303.20
IU3_1a	457.02	19.45 - 30.10	10.65	17.51	464.25	15.56	481.03
IU3_1b	451.91	15.60 - 39.60	24.00	13.98	474.68	12.43	497.39
IU4_1a	607.60	21.75 - 32.95	11.20	19.65	619.21	17.46	636.37
IU4_1b	603.84	19.95 - 29.75	9.80	17.91	617.15	15.92	635.98
IU4_2a	643.98	22.70 - 36.45	13.75	20.46	656.65	18.19	674.72
IU4_2b	635.50	20.70 - 31.95	11.25	18.58	649.43	16.52	668.83
IU5_1a	287.54	14.50 - 26.15	11.65	13.04	291.51	11.59	296.27
IU5_1b	269.40	11.95 - 16.00	4.05	10.70	272.48	9.51	277.02
IU6_1a	359.49	12.40 - 19.95	7.55	11.16	363.98	9.92	370.19
IU6_1b	346.00	14.75 - 16.80	2.05	13.33	347.93	11.85	351.88
IU7_1a	471.69	28.65 - 31.05	2.40	25.79	472.95	22.92	475.61
IU7_1b	478.86	22.80 - 28.10	5.30	20.57	480.08	18.29	482.11
IU8_1a	378.26	18.45 - 24.05	5.60	16.61	382.83	14.76	390.13
IU8_1b	371.07	15.30 - 22.35	7.05	13.76	377.93	12.23	387.79
IU8_2a	392.60	17.75 - 25.00	7.25	15.96	398.68	14.19	407.75
IU8_2b	389.67	15.75 - 22.55	6.80	14.18	396.09	12.60	405.72
IU9_1a	470.28	24.05 - 37.40	13.35	21.61	475.88	19.21	483.12
IU9_1b	463.66	20.65 - 38.25	17.60	18.59	471.45	16.52	481.03
IU9_2a	482.24	24.30 - 40.15	15.85	21.90	489.05	19.47	497.84
IU9_2b	475.42	20.85 - 38.65	17.80	18.75	483.41	16.67	493.02

In generale si nota che il range di prestazione al minimo costo tende a spostarsi verso sinistra con la variazione dell'orientamento principale. Questo rispecchia il comportamento esposto precedentemente, ovvero il fatto che i consumi energetici ed i costi aumentino incrementando le superfici vetrate sui lati Est ed Ovest rispetto alle facciate Sud e Nord. Questo effetto diminuisce nelle simulazioni in cui sono presenti schermature solari.

I valori dei costi globali minimi, in riferimento al codice CGM della tabella 53, si attestano tra 218.70 e 643.98 €/m<sup>2</sup>. Questi tendono a diminuire con l'aumentare della taglia dei fabbricati, in particolare tende ad un valore minimo per gli edifici a torre mentre ad un massimo in quelli di piccola taglia. Ciò è legato al rapporto superficie/volume (S/V [m<sup>-1</sup>]), come si può vedere nella tabella 54, in cui si riporta la media dei costi globali minimi (media CGM) rispetto ad S/V.

*Tabella 54 - Media del costo globale minimo (media CGM) rispetto al rapporto superficie/volume (S/V [m<sup>-1</sup>])*

	S/V	media CGM
<b>edifici a torre</b>	0.17	319.92
<b>parallelepipedi di grossa taglia</b>	0.21	368.83
<b>parallelepipedi di media taglia</b>	0.31	427.90
<b>parallelepipedi di piccola taglia</b>	0.53	555.69

Si ha un incremento di esborso economico con l'aumentare delle superfici vetrate, ovvero considerando prima un archetipo morfologico vetrato a blocchi, poi a nastro ed infine tutto vetro. Questo effetto si può notare dalla combinazione IU1\_1a alla IU3\_1b, nelle quali il valore passa da 218.70 a 451.91 €/m<sup>2</sup>.



Il DGR VIII/8745 del 2008 [3], riporta i valori limiti di prestazione per gli edifici ad uso ufficio, espressi in kWh/m<sup>3</sup> annuo e dipendenti dal rapporto superficie/volume (S/V) e dai gradi giorno (GG). La norma utilizza come riferimento i kWh/m<sup>3</sup>, che sono stati convertiti in kWh/m<sup>2</sup> nella tabella 55, ipotizzando un'altezza media dei locali di 3 metri. Si studia la zona climatica E in quanto, come riportato precedentemente, rappresenta la maggior parte del territorio della Lombardia.

**Tabella 55 - Limiti dei consumi energetici per la zona climatica E in kWh/m<sup>2</sup> annuo, in funzione del rapporto superficie/volume e dei gradi giorno (GG)**

Zona climatica E		
S/V	2101 [GG]	3000 [GG]
≤ 0.2	28.8	38.1
≥ 0.9	67.5	93

Questi limiti sono stati riportati in termini di kWh/m<sup>2</sup> annuo e considerando la media dei GG (2,550.5) viene confrontato il valore intermedio dell'intervallo di prestazione corrispondente al costo minimo (RANGE PECGM della tabella 53) con quelli proposti dall'attuale normativa per il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale. Tale confronto è riportato alla tabella 56.

**Tabella 56 - Confronto tra i limiti di consumo per la climatizzazione invernale espressi in kWh/m<sup>2</sup> annuo di energia primaria, calcolati in funzione del rapporto superficie/volume, con il fabbisogno delle 24 combinazioni studiate**

Cod.	Tipologia	S/V	Range PECGM	Valore medio range PECGM	Limite norma
IU1_1a	edifici a torre	0.17	10.95 - 11.8	11.375	29.71
IU1_1b	edifici a torre	0.17	9.95 - 11.45	10.7	29.71
IU2_1a	edifici a torre	0.17	15.65 - 30.75	23.2	29.71
IU2_1b	edifici a torre	0.17	8.95 - 21.60	15.275	29.71
IU3_1a	edifici a torre	0.17	19.45 - 30.10	24.775	29.71

segue a pag.161

<b>Cod.</b>	<b>Tipologia</b>	<b>S/V</b>	<b>Range PECGM</b>	<b>Valore medio range PECGM</b>	<b>Limite norma</b>
IU3_1b	edifici a torre	0.17	15.60 - 39.60	27.6	29.71
IU4_1a	parallelepipedo di piccola taglia	0.53	21.75 - 32.95	27.35	57.1
IU4_1b	parallelepipedo di piccola taglia	0.53	19.95 - 29.75	24.85	57.1
IU4_2a	parallelepipedo di piccola taglia	0.53	22.70 - 36.45	29.575	57.1
IU4_2b	parallelepipedo di piccola taglia	0.53	20.70 - 31.95	26.325	57.1
IU5_1a	parallelepipedo di grossa taglia	0.21	14.50 - 26.15	20.325	35.62
IU5_1b	parallelepipedo di grossa taglia	0.21	11.95 - 16.00	13.975	35.62
IU6_1a	parallelepipedo di grossa taglia	0.21	12.40 - 19.95	16.175	35.62
IU6_1b	parallelepipedo di grossa taglia	0.21	14.75 - 16.80	15.775	35.62
IU7_1a	parallelepipedo di grossa taglia	0.21	28.65 - 31.05	29.85	35.62
IU7_1b	parallelepipedo di grossa taglia	0.21	22.80 - 28.10	25.45	35.62
IU8_1a	parallelepipedo di media taglia	0.31	18.45 - 24.05	21.25	42.33
IU8_1b	parallelepipedo di media taglia	0.31	15.30 - 22.35	18.825	42.33
IU8_2a	parallelepipedo di media taglia	0.31	17.75 - 25.00	21.375	42.33
IU8_2b	parallelepipedo di media taglia	0.31	15.75 - 22.55	19.15	42.33
IU9_1a	parallelepipedo di media taglia	0.31	24.05 - 37.40	30.725	42.33
IU9_1b	parallelepipedo di media taglia	0.31	20.65 - 38.25	29.45	42.33
IU9_2a	parallelepipedo di media taglia	0.31	24.30 - 40.15	32.225	42.33
IU9_2b	parallelepipedo di media taglia	0.31	20.85 - 38.65	29.75	42.33

In tabella 56 si può notare come sia il valore medio che gli estremi degli intervalli di prestazione energetica rispettino i limiti posti dalla norma in termini di fabbisogno per la climatizzazione invernale, espresso in kWh/m<sup>2</sup> annuo. Occorre inoltre considerare che i consumi dei modelli studiati comprendono anche il raffrescamento, quindi i limiti posti dalla normativa risultano essere molto generosi rispetto ai valori calcolati con la cost optimality.

In riferimento al codice RANGE PECGM della tabella 56 l'intervallo di prestazione corrispondente al costo minimo presenta dei range che oscillano tra gli 0,85 ed i 24 kWh/m<sup>2</sup> annuo. Considerando i valori medi degli estremi, si può stabilire che l'intervallo medio ottimale della prestazione energetica degli edifici ad uso ufficio si attesti tra 17.82 e 27.62 kWh/m<sup>2</sup> annuo. Questi valori possono essere confrontati la classificazione energetica attualmente in vigore nella regione Lombardia, per i quali ci si riferisce alla seguente tabella del DGR VIII/8745 del 2008 [3]. I valori proposti dalla norma in kWh/m<sup>3</sup> sono riportati in kWh/m<sup>2</sup> nella tabella 57.

*Tabella 57 - Classificazione energetica in termini di EP<sub>H</sub> per la regione Lombardia, espressi in kWh/m<sup>2</sup> annuo*

<b>Classe energetica</b>	<b>Limiti</b>
A +	$EP_H < 9$
A	$9 \leq EP_H < 18$
B	$18 \leq EP_H < 33$
C	$33 \leq EP_H < 81$
D	$81 \leq EP_H < 129$
E	$129 \leq EP_H < 162$
F	$162 \leq EP_H < 195$
G	$EP_H \geq 195$

In tabella 57 vengono considerati i limiti di  $EP_H$  per la definizione delle classi energetiche nella zona climatica E, ovvero il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale o riscaldamento, espresso in termini di  $kWh/m^2$  annuo. I valori degli estremi del range medio di prestazione ottimale si attestano tra 17.82 e 27.62  $kWh/m^2$  annuo, corrispondente alla classe B. Occorre però ricordare che i valori di  $EP_H$  sono riferiti solo alla climatizzazione invernale, mentre nel nostro caso è stato valutato anche il consumo legato alla stagione estiva, che nelle simulazioni risulta essere mediamente più elevato rispetto a quello invernale (all'incirca del 50%). Questo ci porta a dire che i valori ottimali di prestazione energetica si attesteranno verso la classe A dell'attuale normativa vigente.

Gli intervalli (range) non presentano significative differenze di ampiezza per quanto riguarda edifici di taglia piccola e media. Gli archetipi a torre presentano un aumento del range con l'incremento delle superfici vetrate (da 0,85 a 24  $kWh/m^2$  annuo), mentre per i parallelepipedi di grossa taglia l'ampiezza dell'intervallo tende a diminuire con l'aumento degli elementi trasparenti (da 11.65 a 5.3  $kWh/m^2$  annuo).

Risultano interessanti quei modelli che presentano un ampio range di prestazione energetica al costo globale minimo, in quanto evidenziano il fatto che un'attenta progettazione delle misure di efficienza energetica porti a minori consumi con lo stesso costo globale.

Nella tabella 58 si riportano per ogni modello i valori di riferimento del consumo energetico minimo (EP) al costo globale minimo (CGM), per i quali si valuta una diminuzione dei consumi prima del 10% e poi del 20%, calcolando i nuovi costi globali minimi ed i loro aumenti percentuali rispetto al caso di riferimento (CGM(%)).

**Tabella 58 - Aumento percentuale del costo globale corrispondente ad una diminuzione del fabbisogno energetico del 10% e del 20%.**

Cod.	Riferimento		-10%			-20%		
	EP	CGM	EP	CGM	CGM(%)	EP	CGM	CGM(%)
IU1_1a	10.95	218.7	9.91	220.02	0.6	8.81	223.19	2.05
IU1_1b	9.95	216.47	8.94	218.16	0.78	7.94	221.33	2.24
IU2_1a	15.65	285.89	14.04	292.1	2.17	12.48	299.05	4.6
IU2_1b	8.95	289.55	8.05	291.35	0.62	7.15	303.2	4.71
IU3_1a	19.45	457.02	17.51	464.25	1.58	15.56	481.03	5.25
IU3_1b	15.6	451.91	13.98	474.68	5.04	12.43	497.39	10.06
IU4_1a	21.75	607.6	19.65	619.21	1.91	17.46	636.37	4.73
IU4_1b	19.95	603.84	17.91	617.15	2.2	15.92	635.98	5.32
IU4_2a	22.7	643.98	20.46	656.65	1.97	18.19	674.72	4.77
IU4_2b	20.7	635.5	18.58	649.43	2.19	16.52	668.83	5.24
IU5_1a	14.5	287.54	13.04	291.51	1.38	11.59	296.27	3.03
IU5_1b	11.95	269.4	10.7	272.48	1.14	9.51	277.02	2.83
IU6_1a	12.4	359.49	11.16	363.98	1.25	9.92	370.19	2.98
IU6_1b	14.75	346	13.33	347.93	0.56	11.85	351.88	1.7
IU7_1a	28.65	471.69	25.79	472.95	0.27	22.92	475.61	0.83
IU7_1b	22.8	478.86	20.57	480.08	0.26	18.29	482.11	0.68
IU8_1a	18.45	378.26	16.61	382.83	1.21	14.76	390.13	3.14
IU8_1b	15.3	371.07	13.76	377.93	1.85	12.23	387.79	4.51
IU8_2a	17.75	392.6	15.96	398.68	1.55	14.19	407.75	3.86
IU8_2b	15.75	389.67	14.18	396.09	1.65	12.6	405.72	4.12
IU9_1a	24.05	470.28	21.61	475.88	1.19	19.21	483.12	2.73
IU9_1b	20.65	463.66	18.59	471.45	1.68	16.52	481.03	3.75
IU9_2a	24.3	482.24	21.9	489.05	1.41	19.47	497.84	3.23
IU9_2b	20.85	475.42	18.75	483.41	1.68	16.67	493.02	3.7
media					1.51			3.75

L'aumento percentuale del costo globale per una diminuzione del fabbisogno energetico del 10% si attesta tra lo 0.27% (IU7\_1a) ed il 5.04% (IU3\_1b) con un valore medio pari a 1.51%. Per quanto riguarda invece una riduzione dei consumi del 20% i valori economici variano da 0.68% (IU7\_1b) ed il 10.06% (IU3\_1b), con una media del 3.75%.

Considerando i valori medi, si può vedere come l'esborso economico legato ad un miglioramento della prestazione energetica rappresenti una percentuale molto bassa del costo globale (1.52% e 3.75%).

Valutando invece la variazione della percentuale nelle singole combinazioni, si può notare come per gli edifici di piccola e media taglia i valori non cambino sensibilmente. Si svara infatti dall'1.21% al 2.20% per un diminuzione della prestazione del 10%, mentre dal 3.14% al 5.32% per una riduzione dei consumi di 20% (riferendosi agli archetipi morfologici IU4, IU8 ed IU9).

Gli edifici a torre (IU1, IU2 ed IU3) presentano invece un incremento dei valori all'aumentare delle superfici vetrate, mentre l'effetto opposto si ha negli edifici di grossa taglia a forma di parallelepipedo (IU4, IU5 ed IU6), come si può notare alla tabella 59.

**Tabella 59 - Percentuale di incremento del costo con la diminuzione del fabbisogno energetico in funzione della tipologia di chiusure trasparenti**

Cod.	Archetipo morfologico	chiusura trasparente	-10%	-20%
			CGM(%)	CGM(%)
IU1_1a	edifici a torre	a blocchi	0.6	2.05
IU1_1b	edifici a torre	a blocchi	0.78	2.24
IU2_1a	edifici a torre	a fasce	2.17	4.6
IU2_1b	edifici a torre	a fasce	0.62	4.71
IU3_1a	edifici a torre	tutto vetro	1.58	5.25
IU3_1b	edifici a torre	tutto vetro	5.04	10.06
IU5_1a	parallelepipedi di grossa taglia	a blocchi	1.38	3.03
IU5_1b	parallelepipedi di grossa taglia	a blocchi	1.14	2.83
IU6_1a	parallelepipedi di grossa taglia	a fasce	1.25	2.98
IU6_1b	parallelepipedi di grossa taglia	a fasce	0.56	1.7
IU7_1a	parallelepipedi di grossa taglia	tutto vetro	0.27	0.83
IU7_1b	parallelepipedi di grossa taglia	tutto vetro	0.26	0.68

Questi andamenti evidenziano il fatto che le curve di prestazione per gli edifici a torre hanno una ripida salita con il diminuire dei consumi energetici, invece i fabbricati di grossa taglia più compatti mostrano una curva con minore pendenza. In altre parole lo stesso miglioramento percentuale della prestazione energetica per edifici di grossa taglia risulta essere più costoso se si considerano edifici a torre rispetto a fabbricati dalla forma più compatta.

## CONCLUSIONI

Con questa trattazione sono stati rivalutati i limiti sul fabbisogno di energia primaria per edifici ad uso ufficio, utilizzando la metodologia della cost optimality. I riferimenti normativi di partenza sono la relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica “ [2] ed i DGR VIII/8745 del 2008 [3] e DGR VIII/5796 del 2009 [4] della regione Lombardia.

Si introduce ed analizza il contesto normativo storico ed attuale sulla base del quale viene descritta la procedura di calcolo (capitolo 1). La metodologia presuppone la costruzione di sistemi di edificio-impianto virtuali (archetipi), i quali fungono da riferimento per i calcoli successivamente svolti. Il risultato del procedimento è l’ottimo globale, definito da due indicatori, uno economico, ovvero il costo globale, ed uno prestazionale in termini di fabbisogno energetico.

La definizione degli archetipi si fonda sul confronto delle caratteristiche dimensionali (capitolo 2) degli edifici ad uso ufficio presenti nel CEER [17] con una ricerca sui fabbricati del terziario [16]. Tramite un’analisi statistica delle superfici e dei volumi ricavati dal CEER [17] sono state verificate le dimensioni proposte nella ricerca, ottenendo in questo modo 9 archetipi, che si suddividono in edifici a torre, parallelepipedi di piccola, media e grossa taglia. La distribuzione delle chiusure trasparenti, definita partendo dalla ricerca, ha portato a stabilirne tre tipologie, a blocchi, fasce e tutto vetro. In questo modo è stato possibile ricavare la morfologia degli edifici virtuali oggetto dell’analisi.

Si valutano le soluzioni tecniche da utilizzare per l’involucro dei modelli (capitolo 3), basandosi sulla ricerca sopracitata [16] e nel rispetto degli attuali limiti normativi. Vengono descritte le chiusure ed i loro componenti, i serramenti e le schermature solari. Sono valutate sia una tecnologia a secco che una tradizionale (laterizi e calcestruzzo) per le chiusure opache verticali. Per quanto riguarda i serramenti vengono studiate tre tipologie di

vetrocamera, singola e doppia con aria in intercapedine oppure argon nel primo caso. Per ogni stratigrafia o soluzione tecnica si evidenziano gli elementi che ne definiscono la prestazione energetica e le possibili migliorie, ottenendo così i parametri su cui agire per valutare il fabbisogno (spessore dell'isolante, vetrocamera, interasse lamelle). Sarà così possibile valutare gli effetti delle eventuali modifiche ai valori sul fabbisogno energetico e sul costo globale.

Studiando le tipologie di generazione del CEER [17] (capitolo 4) si individuano i sistemi più diffusi, punti di partenza per la definizione della configurazione impiantistica. Per ricavare la tipologia di emissione viene analizzata l'altezza netta dei locali, mentre per quanto riguarda regolazione e distribuzione sono state fatte delle ipotesi progettuali. Oltre a questi si valuta l'impianto di ventilazione, la produzione di acqua calda sanitaria ed il solare fotovoltaico. Per ognuno di questi componenti viene descritta la tecnologia ed il funzionamento, in particolare per quanto riguarda la generazione si analizzano caldaia a condensazione, pompa di calore, chiller tradizionale e ad assorbimento. In questo modo per ognuno dei sistemi impiantistici si ottiene il rendimento e le relative possibili migliorie, analogamente a quanto fatto per le tecnologie d'involucro.

Sono così ricavati tutti i parametri che caratterizzano il comportamento energetico degli archetipi morfologici oggetto di studio, sia in termini di involucro che di impianto.

Viene studiata la modellazione (capitolo 5) dei sistemi finora esposti, analizzando prima il fabbisogno di energia termica ed in seguito gli impianti. Con l'utilizzo del software Trnsys, ed in particolare dell'interfaccia Trnbuild, si calcolano il fabbisogno di energia termica ora per ora, partendo dalle caratteristiche morfologiche e tecnologiche dei fabbricati. Per i sistemi impiantistici si riportano le equazioni e metodologie per il calcolo dei rendimenti, approfondendo lo studio dei sistemi di generazione sopracitati, per i quali sono analizzate le curve di rendimento.



Quanto presentato in questi capitoli ci permette di calcolare, per i modelli considerati, il fabbisogno di energia primaria ( $\text{kWh/m}^2$  annuo) al quale sarà affiancato il corrispettivo costo globale.

La metodologia cost optimality si applica calcolando il Valore Attuale Netto (capitolo 6) in termini di costo globale. Questo procedimento si basa sull'attualizzazione di flussi di cassa distanti nel tempo, che in altra maniera non sarebbero confrontabili. Sono sommati i costi dell'investimento iniziale (relativi solo agli elementi che caratterizzano la prestazione del sistema edificio-impianto) ai consumi energetici e di manutenzione calcolati nell'arco dei 20 anni di vita utile considerata del bene. In questo modo si arriva a definire il fattore economico ( $\text{€/m}^2$ ) da abbinare al corrispettivo valore energetico.

Vengono stabilite delle combinazioni di involucro ed impianto per le quali, variando i parametri esposti precedentemente, si calcolano e riportano graficamente il fabbisogno di energia primaria ed il costo globale. Questo procedimento iterativo (per la cui descrizione si rimanda al capitolo 7) consta nella costruzione di due percorsi, uno che parte da una soluzione di edificio-impianto ad alto consumo, l'altra invece da una molto efficiente energeticamente. Entrambe presentano un alto costo globale, dovuto nel primo caso ai costi energetici, e nel secondo all'investimento iniziale. Il processo prevede, variando una alla volta i parametri, di scegliere la simulazione che presenta il minor costo globale ed utilizzarla come punto di partenza della successiva iterazione. Quando i valori dei punti dei due percorsi presentano differenze minime il risultato è stato raggiunto e si può stabilire l'ottimo globale, in corrispondenza del quale il costo è minimo. Studiando tutti i valori ricavati vengono costruite le curve di involuppo, rappresentanti i valori minimi delle nuvole di punti considerate, sulle quali si definiscono gli intervalli ottimali di prestazione energetica corrispondenti al costo minimo.

Attraverso l'analisi degli ottimi parziali e delle curve sono ottenute le prestazioni energetiche da confrontare con i limiti attuali. I valori degli intervalli ottimali si attestano al di sotto della soglia posta dalla norma per la climatizzazione invernale, ma considerando il fatto che la metodologia valuta anche i consumi estivi, si può affermare che i modelli studiati con la cost optimality presentino prestazioni molto più elevate rispetto ai minimi di legge.

Riferendosi alla media dei valori calcolati, il fabbisogno in termini di energia primaria si attesta tra i 17.82 ed i 27.62 kWh/m<sup>2</sup> annuo.

Inoltre un miglioramento della prestazione energetica ottenuto con una diminuzione dei consumi nell'ordine del 10% e del 20% presenta costi modesti, pari rispettivamente al 1.51% ed al 3.75% del costo globale.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Direttiva Comunitaria 2012/31/UE (EPBD recast);*
- [2] *Relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica”;*
- [3] *DGR VIII/8745 del 2008, regione Lombardia;*
- [4] *DGR VIII/5796 del 2009, regione Lombardia;*
- [5] *CONVENZIONE QUADRO SUI CAMBIAMENTI CLIMATICI DELLE NAZIONI; UNITE, Earth Summit, Rio De Janeiro, 1992;*
- [6] *PROTOCOLLO DI KYOTO Conferenza COP3 della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), Kyoto, 1997;*
- [7] *Direttiva Comunitaria 2002/91/UE “Energy Performance of Buildings Directive“ (EPBD);*
- [8] *Legge italiana n.373 del 30 marzo 1976;*
- [9] *Legge italiana n.10 del 9 gennaio 1991;*
- [10] *Decreto Legislativo italiano n.192 del 19 agosto 2005;*
- [11] *Legge Regionale 24/2006, regione Lombardia;*
- [12] *DGR VIII/5018 del 2007, regione Lombardia;*
- [13] *DGR VIII/5773 del 2007, regione Lombardia;*
- [14] *Regolamento Delegato UE 244 del 16 gennaio 2012;*
- [15] *Linee Guida del Regolamento Delegato 244/2012, scritte il 19/4/2012;*
- [16] *Ricerca sulle caratteristiche dimensionali e tecnologiche degli edifici ad uso ufficio, ricavata dal lavoro di tesi di L.Canobbio e A. Epinati dal titolo “Caratterizzazione tipologica dell’edilizia per uffici ai fini energetici”;*
- [19] *Decreto del Presidente della Repubblica italiano n.412 del 26 agosto 1993.*
- [20] *UNI EN ISO 6946:2008, “Componenti ed elementi per edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo”;*
- [21] *UNI 10351:1994, “Materiali da costruzione - Valori della conduttività termica e della permeabilità al vapore”;*

- [22] UNI-TS 11300/parte 2:2008, “Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”;
- [23] UNI 10339:1995, “Impianti aeraulici a fini di benessere”;
- [24] SIA 382/1:2007, “Impianti di climatizzazione – Basi generali e esigenze”;
- [25] UNI EN ISO 13789:2008, “Prestazione energetica degli edifici, calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento”;
- [26] Busato F. - Lazzarin R.M. - Minchio F articolo dal titolo “Analisi delle prestazioni stagionali delle caldaie a condensazione applicate a diversi tipi di impianti, in varie zone climatiche italiane” del 60° Congresso Nazionale ATI di Roma 2005 di giugno 2012.;
- [27] UNI EN 15459:2008, “Prestazione energetica degli edifici - Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici”.
- [28] Prezziario DEI Tipografia del Genio Civile 2013;
- [29] Luigi De Paoli articolo dal titolo ”Protocollo di Kyoto e sviluppo energetico sostenibile“ di martedì 1 marzo 2005;
- [33] Lucia Ceccherini Nelli, Eugenio D'Audino, Antonella Trombadore ebook “Schermature solari”;
- [34] Maria Francesca Massa articolo dal titolo “La riduzione 2013 dei prezzi di un impianto fotovoltaico: costi e tabelle di confronto di impianti italiani ed esteri”;
- [35] ABB SACE manuale tecnico dal titolo ”Quaderni di applicazione tecnica n.10 Impianti fotovoltaici” di Luglio 2013;;
- [36] Mario Beccali report tecnico del subtask D, Task38 Solar Air-Conditioning and Refrigeration, IEA SHC Solar Heating & Cooling programme, International Energy Agency, dal titolo “Life Cycle Assessment of Solar Cooling Systems” di Dicembre 2010;
- [37] The CLIMASOL Project articolo dal titolo “Solar Cooling” del 23 Maggio 2014;
- [38] , Cesare Maria Joppolo Calogero Leone Luca Molinaroli presentazione dal titolo “Recuperatori di calore aria-aria: tecnologie e prestazioni”;

- [39] *Idraulica Caleffi pubblicazione periodica di informazione tecnico-professionale dal titolo “Gli impianti a pannelli solari, tecniche e schemi di realizzazione” di Dicembre 2005;*
- [40] *Idraulica Caleffi pubblicazione periodica di informazione tecnico-professionale dal titolo “Le pompe di calore” di Dicembre 2007;*
- [41] *Provincia di Milano linee guida dal titolo “L’utilizzo della risorsa idrica sotterranea a fini geotermici nella Provincia di Milano: Normativa, procedure e spunti di riflessione.”.*
- [42] *Listino prezzi Vaillant Aprile 2013;*
- [43] *Listino prezzi Vaillant Ottobre 2013;*
- [49] *Listino prezzi Rotex Aprile 2014;*
- [50] *Listino prezzi Deltateamsrl Aprile 2012;*
- [51] *Listino prezzi Daikin preliminare 2013;*
- [52] *Listino prezzi Aermec Febbraio 2013;*
- [53] *Listino prezzi Rossato Group Settembre 2013.*

## **Sitografia**

- [17] *<http://www.cened.it/ceer> , sito del Catasto Energetico Edifici Regionale (CEER);*
- [18] *<http://www.catasto.it/categorie.html> , sito del Catasto Italiano;*
- [30] *<http://www.trnsys.com/> , sito dedicato al software Trnsys;*
- [31] *<http://www.cened.it/home> , sito dedicato alla Certificazione Energetica Degli Edifici;*
- [32] *<http://windows.lbl.gov/software/window/6/> , sito dedicato al software Window;*