



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Rapporto sulla validazione del modulo edificio

*Paola Caputo, Gaia Costa, Valentina Zanotto*



## RAPPORTO SULLA VALIDAZIONE DEL MODULO EDIFICIO

Paola Caputo, Gaia Costa, Valentina Zanotto (Politecnico di Milano, Dipartimento BEST)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'Uso dell'Energia Elettrica

Progetto: Studi e Valutazioni sull'Uso Razionale dell'Energia: Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi

Responsabile progetto: Ilaria Bertini, ENEA

# Indice

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>DEFINIZIONE DEGLI EDIFICI</b>	<b>6</b>
3.1	Caratteristiche geometriche	7
3.2	Caratteristiche termofisiche	8
3.3	Edificio pesante	8
3.4	Edificio leggero	9
3.5	Caratteristiche termo-fisiche complessive per edificio-tipo	11
3.6	Definizione dei parametri di occupazione e gestione degli edifici	14
	3.6.1 Occupazione	14
	3.6.2 Ventilazione	14
<b>4</b>	<b>ANALISI DELLE PROCEDURE DI SIMULAZIONE DEI SOFTWARE DINAMICI TRNSYS ED ENERGYPLUS</b>	<b>17</b>
4.1	File climatico	18
	4.1.1 Radiazione solare	19
4.2	Comportamento termico dell'edificio	22
	4.2.1 Coefficienti di adduzione	22
	4.2.2 Convezione	23
	4.2.3 Irraggiamento	25
	4.2.4 Radiazione solare trasmessa dagli elementi trasparenti	28
4.3	Considerazioni complessive	30
<b>5</b>	<b>SIMULAZIONI DEI NUOVI EDIFICI IN TRNSYS E ENERGYPLUS</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>ANALISI E CONFRONTO DEI RISULTATI CONSEGUITI CON GLI ESITI DI ODESSE</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>RAPPRESENTAZIONE DETTAGLIATA DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI</b>	<b>38</b>
7.1	Domanda termica	39
7.2	Potenze di picco	42
7.3	Approfondimento relativo al metodo di calcolo della convezione	45
	7.3.1 Simulazioni condotte con ventilazione costante pari a 0.50 vol/h e senza carichi termici interni	45
	7.3.2 Simulazioni condotte con ventilazione come da profilo di occupazione e con i carichi termici interni precedentemente definiti	51
7.4	Approfondimento relativo all'impatto dei profili di ventilazione e gestione (carichi interni) sulle domande di heating e cooling	57

# 1 Premessa

Il presente rapporto fa riferimento alla collaborazione in corso tra ENEA e il Dipartimento BEST del Politecnico di Milano, nata in seno all'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2008-2009, Progetto 3.1 : “*Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi*” e avente come oggetto: “*Valutazioni e simulazioni per l'ottimizzazione del paradigma energetico a scala di distretto*”.

Come descritto nell'allegato tecnico concordato, il contributo del gruppo di lavoro BEST riguarda i seguenti temi:

**A. Validazione del modulo edificio** (*Deliverable: rapporto sulla validazione del modulo edificio*):

- individuazione di nuovi edifici benchmark che, a differenza di quelli considerati nell'attività della precedente annualità, sono per profili di utilizzo, forma e caratteristiche strutturali rappresentativi del parco edilizio;
- analisi del modello in oggetto in relazione alle diverse tipologie edilizie sopra menzionate. A tal scopo saranno completate simulazioni comparative mediante i *tools* TRNSYS e Energy plus.

**B. Supporto nella messa a sistema dei moduli domanda/generazione** (*Deliverable: rapporto sul comportamento della piattaforma in relazione al corretto abbinamento tra curve di domanda e sistemi di generazione e controllo*):

- analisi dei moduli di impianto e indicazioni sulle relative configurazioni di sistema;
- supporto in merito alla definizione delle curve di domanda elettrica e termica e all'architettura complessiva della piattaforma ai fini dell'implementazione di un modello a scala di distretto.

Nell'ambito del punto A, il gruppo di lavoro ha prodotto i seguenti contributi, che vengono descritti nei capitoli del presente rapporto:

- scelta, definizione e implementazione dei nuovi edifici in TRNSYS e EnergyPlus (geometria ecc.);
- definizione delle modalità di occupazione e gestione degli edifici;
- analisi delle procedure di simulazione dei due software e loro confronto;
- definizione dei parametri utili a sviluppare simulazioni il più possibile coerenti con i due strumenti, anche in rapporto alle caratteristiche del modulo edificio di Odesse;
- simulazioni dei nuovi edifici in TRNSYS e EnergyPlus con l'inserimento dei relativi parametri di gestione e utilizzo (guadagni interni, ventilazione, occupazione ecc.);
- analisi dei risultati conseguiti e confronto con quelli ottenuti con Odesse.

## 2 Introduzione

Le attività svolte consentono di completare le valutazioni relative alle annualità precedenti. In particolare, vengono introdotti nuovi edifici, vengono affinate le procedure di calcolo e di comparazione con gli strumenti TRNSYS ed EnergyPlus (valutandone in maniera approfondita gli algoritmi di calcolo) e vengono definite le condizioni di gestione degli edifici (nelle precedenti annualità analizzati sempre in assenza di carichi interni), individuando dei plausibili profili di occupazione, ventilazione e domanda elettrica, come descritto nella *Deliverable B*.

### 3 Definizione degli edifici

Nell'ultima annualità, a valle delle esperienze precedenti e a seguito di diverse considerazioni, si è deciso di implementare tre edifici-tipo differenti per dimensioni, fattore di forma (variabile tra  $0,37 \text{ m}^{-1}$  o  $0,73 \text{ m}^{-1}$  a seconda dell'edificio), percentuale di superficie vetrata e destinazione d'uso. Al fine di verificare come gli algoritmi di calcolo dei software affrontino soluzioni costruttive diverse, per ogni edificio sono state considerate due versioni:

- una caratterizzata da soluzioni d'involucro leggere, quali muratura con soluzione a sandwich isolato e copertura poco massiva;
- una caratterizzata da soluzioni d'involucro pesanti, quali muratura in mattoni pieni con cappotto esterno e copertura molto massiva.

In conformità alle percentuali di superficie finestrata considerate, agli edifici sono state anche assegnate le destinazioni d'uso residenziale o terziaria (ad uso uffici).

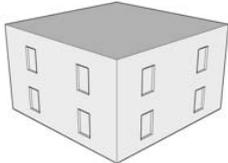
Gli edifici sono stati introdotti come semplici parallelepipedi; i volumi sono stati modellati come singole zone termiche, non si è provveduto quindi a una ripartizione vera e propria in piani e zone termiche (scelta conforme all'obiettivo di testare il modulo Odesse monozona). I solai intermedi presenti negli edifici sono stati presi in considerazione soltanto in quanto massa termica interna.

Rispetto alle superfici vetrate, l'edificio A presenta il 10% di superficie trasparente lungo tutte e quattro le pareti verticali; l'edificio B presenta il 25%, ma solo lungo le pareti esposte a Nord e Sud (ciò corrisponde al 18% come media su tutta la facciata) e l'edificio C presenta il 63%, ma solo lungo le esposizioni Nord e Sud (ciò corrisponde al 45% come media su tutta la facciata).

I paragrafi successivi riportano nel dettaglio le caratteristiche relative agli edifici implementati.

### 3.1 Caratteristiche geometriche

Tabella 1: Caratteristiche geometriche principali degli edifici analizzati.

Dati		Edificio "piccolo" (A)	Edificio "In linea" (B)	Edificio "In linea" (C)
				
Finestratura		RAI: 1/8	RAI: 1/8	Fascia finestrata con altezza [m]: 1.90
Altezza (h)	m	6	15	15
Lunghezza (L)	m	10	30	30
Profondità (P)	m	10	12	12
Numero piani		2	5	5
Superficie finestrata per piano, NORD/SUD	m <sup>2</sup>	3.13	22.50	57.00
Superficie finestrata per piano, EST/OVEST	m <sup>2</sup>	3.13	0.00	0.00
<b>PARETI NORD/SUD</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	60.00	450.00	450.00
Superficie Opaca	m <sup>2</sup>	53.75	337.50	165.00
Superficie Trasparente	m <sup>2</sup>	6.25	112.50	285.00
Superficie Vetro		4.44	79.88	202.35
<b>PARETI EST/OVEST</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	60.00	180.00	180.00
Superficie Opaca	m <sup>2</sup>	53.75	180.00	180.00
Superficie Trasparente	m <sup>2</sup>	6.25	0.00	0.00
Superficie Vetro		4.44	0.00	0.00
<b>SOLAIO DI COPERTURA</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	100	360	360
<b>SOLAIO CONTRO TERRA</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	100	360	360
<b>SOLAI INTERMEDI</b>				
Superficie Totale	m <sup>2</sup>	100	1440	1440
Superficie disperdente totale	m <sup>2</sup>	440	1980	1980
Volume	m <sup>3</sup>	600	5400	5400
S/V		0.73	0.37	0.37
Superficie utile (riscaldata)	m <sup>2</sup>	200	1800	1800

### 3.2 Caratteristiche termofisiche

Gli edifici fanno riferimento a due differenti pacchetti murari (uno leggero e uno pesante) e al medesimo tipo di finestre delle quali si riportano, nella tabella seguente, le caratteristiche.

<b>Finestre</b>					
		Percentuale	Trasmittanza		T <sub>vis</sub>
			[W/m <sup>2</sup> K]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	
Vetro	doppio, basso emissivo, aria	80%	2.465		0.571
Telaio	PVC	20%	1.900	10.103	0.767
<b>TOTALE</b>		<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>2.35</b>		

### 3.3 Edificio pesante

Le seguenti tabelle riportano le caratteristiche termofisiche dei materiali che costituiscono le stratigrafie delle componenti opache per l'edificio pesante.

<b>Muro pesante</b>								
		coefficiente di assorbimento 0.6			emissività 0.9			
	spessore	conducibilità	resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica	
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>i</sub>			0.13					
Intonaco di calce e gesso (97)	0.015	0.700	2.520	0.02	1400	21.00	1.09	23
Mattoni pieni (108)	0.380	0.720	2.592	0.53	1800	684.00	0.84	575
Pannelli semirigidi (77)	0.070	0.040	0.144	1.75	55	3.85	0.67	3
Intonaco di calce e gesso (97)	0.015	0.700	2.520	0.02	1400	21.00	1.09	23
1/h <sub>e</sub>			0.04					
<b>TOTALE</b>	<b>0.480</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.49</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>729.85</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>622.92</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.40</b>				

<b>Solaio di copertura pesante</b>								
		coefficiente di assorbimento 0.7			emissività 0.9			
	spessore	conducibilità	resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica	
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>e</sub>			0.04					
Pavimento CLS (22)	0.030	1.910	6.876	0.02	2400	72.00	0.92	66
Massetto pendenza (31)	0.050	0.160	0.576	0.31	500	25.00	0.88	22
Pannelli semirigidi (77)	0.080	0.040	0.144	2.00	55	4.40	0.67	3
Massetto (61)	0.050	0.940	3.384	0.05	1800	90.00	0.88	79
Solaio laterocemento (151)	0.220	0.667	2.400	0.33	918.182	202.00	1.00	202
Intonaco di calce e gesso (97)	0.015	0.700	2.520	0.02	1400	21.00	1.09	23
1/h <sub>i</sub>			0.10					
<b>TOTALE</b>	<b>0.445</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.87</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>414.40</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>395.28</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.35</b>				

### Solai intermedi

	spessore	conducibilità		resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>i</sub>				0.17				
Piastrelle ceramica (237)	0.020	1.000	3.600	0.02	2300	46.00	0.80	37
Massetto (61)	0.050	0.940	3.384	0.05	1800	90.00	0.88	79
Pannelli semirigidi (77)	0.072	0.040	0.144	1.80	55	3.96	0.67	3
Solaio laterocemento (151)	0.220	0.667	2.400	0.33	918.182	202.00	1.00	202
Intonaco di calce e gesso (97)	0.015	0.700	2.520	0.02	1400	21.00	1.09	23
1/h <sub>i</sub>				0.10				
<b>TOTALE</b>	<b>0.377</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.49</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>362.96</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>343.54</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.40</b>				

<b>Solaio a terra</b>								
	spessore	conducibilità		resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>i</sub>				0.17				
Piastrelle ceramica (237)	0.020	1.000	3.600	0.02	2300	46.00	0.80	37
Massetto (61)	0.050	0.940	3.384	0.05	1800	90.00	0.88	79
Pannelli semirigidi (77)	0.072	0.040	0.144	1.80	55	3.96	0.67	3
Solaio laterocemento (151)	0.220	0.667	2.400	0.33	918.182	202.00	1.00	202
<b>TOTALE</b>	<b>0.362</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.37</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>341.96</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>320.65</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.42</b>				

### 3.4 Edificio leggero

Le seguenti tabelle riportano le caratteristiche termofisiche dei materiali che costituiscono le stratigrafie delle componenti opache per l'edificio leggero.

<b>Muro leggero</b>								
	spessore	conducibilità		resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>i</sub>				0.13				
Cartongesso (65)	0.013	0.210	0.756	0.06	900	11.70	1.09	13
Pannelli semirigidi (77)	0.090	0.040	0.144	2.25	55	4.95	0.67	3
Fibrocemento (15)	0.013	0.600	2.160	0.02	1800	23.40	1.00	23
1/h <sub>e</sub>				0.04				
<b>TOTALE</b>	<b>0.116</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.50</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>40.05</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>39.47</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.40</b>				

<b>Solaio di copertura leggero</b>								
				coefficiente di assorbimento 0.7		emissività 0.9		
	spessore	conducibilità		resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>e</sub>				0.04				
Bitume (133)	0.040	0.170	0.612	0.24	1200	48.00	1.47	71
Solaio laterocemento (151)	0.220	0.667	2.400	0.33	918.182	202.00	1.00	202
Pannelli semirigidi (77)	0.085	0.040	0.144	2.13	55	4.68	0.67	3
Intonaco di calce e gesso (97)	0.015	0.700	2.520	0.02	1400	21.00	1.09	23
1/h <sub>i</sub>				0.10				
<b>TOTALE</b>	<b>0.360</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.85</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>275.68</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>298.58</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.35</b>				

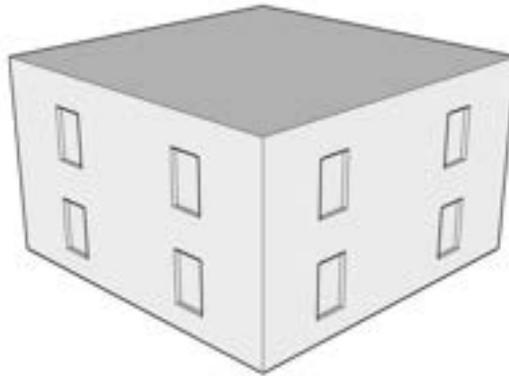
<b>Solai intermedi</b>								
				coefficiente di assorbimento 0.7		emissività 0.9		
	spessore	conducibilità		resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>i</sub>				0.17				
Piastrelle ceramica (237)	0.020	1.000	3.600	0.02	2300	46.00	0.80	37
Massetto (61)	0.050	0.940	3.384	0.05	1800	90.00	0.88	79
Pannelli semirigidi (77)	0.072	0.040	0.144	1.80	55	3.96	0.67	3
Solaio laterocemento (151)	0.220	0.667	2.400	0.33	918.182	202.00	1.00	202
Intonaco di calce e gesso (97)	0.015	0.700	2.520	0.02	1400	21.00	1.09	23
1/h <sub>i</sub>				0.10				
<b>TOTALE</b>	<b>0.377</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.49</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>362.96</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>343.54</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.40</b>				

<b>Solaio a terra</b>								
				coefficiente di assorbimento 0.7		emissività 0.9		
	spessore	conducibilità		resistenza	densità	massa superficiale	calore specifico	capacità termica
	[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[m]
1/h <sub>i</sub>				0.17				
Piastrelle ceramica (237)	0.020	1.000	3.600	0.02	2300	46.00	0.80	37
Massetto (61)	0.050	0.940	3.384	0.05	1800	90.00	0.88	79
Pannelli semirigidi (77)	0.072	0.040	0.144	1.80	55	3.96	0.67	3
Solaio laterocemento (151)	0.220	0.667	2.400	0.33	918.182	202.00	1.00	202
<b>TOTALE</b>	<b>0.362</b>		<b>R [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>2.37</b>	<b>m [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>341.96</b>	<b>C [kJ/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>320.65</b>
			<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.42</b>				

### 3.5 Caratteristiche termo-fisiche complessive per edificio-tipo

I parametri termo-fisici degli edificio-tipo implementati come rappresentativi del parco edilizio su cui si intende operare sono sinteticamente riportati nelle successive tabelle.

<b>Edificio piccolo</b>	<b>(A)</b>	Superficie utile (riscaldata)	200 [m <sup>2</sup> ]
		Superficie disperdente	440 [m <sup>2</sup> ]
		Volume riscaldato	600 [m <sup>3</sup> ]

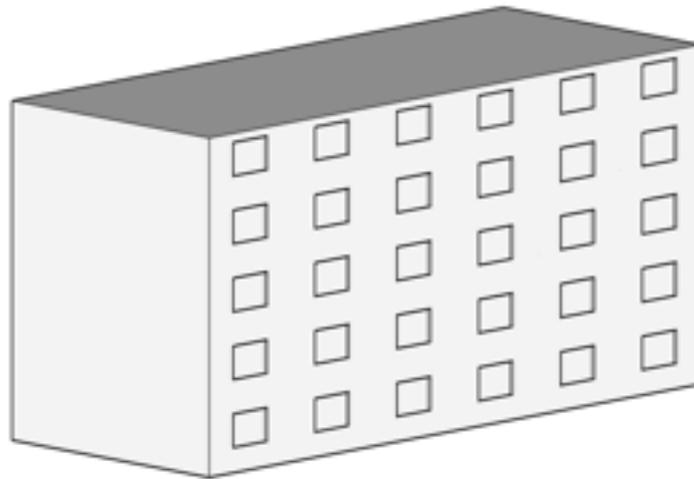


<b>AP</b>		<b>Pesante</b>					
<b>A</b>		<b>U</b>	<b>M<sub>s</sub></b>	<b>C</b>	<b>Htr</b>	<b>M</b>	<b>C</b>
[m <sup>2</sup> ]		[W/(m <sup>2</sup> K)]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kJ/(m <sup>2</sup> K)]	[W/K]	[10 <sup>3</sup> kg]	[MJ/K]
Pareti opache	215	0.40	729.85	622.92	86.32	156.92	133.93
Finestre	25	2.35	-	-	58.80	-	-
Copertura	100	0.35	414.40	395.28	34.81	41.44	39.53
Basamento	100	0.42	341.96	320.65	42.14	34.20	32.07
Solai intermedi	100		362.96	343.54		36.30	34.35
<b>TOTALE</b>					<b>222.07</b>	<b>232.55</b>	<b>205.52</b>
		<b>Trasmittanza media involucro [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>0.50</b>	
		<b>Massa superficiale media involucro [kg/m<sup>2</sup>]</b>				<b>529</b>	
		<b>Capacità termica media involucro [kJ/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>467</b>	

<b>AL</b>		<b>Leggero</b>					
<b>A</b>		<b>U</b>	<b>M<sub>s</sub></b>	<b>C</b>	<b>Htr</b>	<b>M</b>	<b>C</b>
[m <sup>2</sup> ]		[W/(m <sup>2</sup> K)]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kJ/(m <sup>2</sup> K)]	[W/K]	[10 <sup>3</sup> kg]	[MJ/K]
Pareti opache	215	0.40	40.05	39.47	85.88	8.61	8.49
Finestre	25	2.35	-	-	58.80	-	-
Copertura	100	0.35	275.68	298.58	35.07	27.57	29.86
Basamento	100	0.42	341.96	320.65	42.14	34.20	32.07
Solai intermedi	100		362.96	343.54		36.30	34.35
<b>TOTALE</b>					<b>221.88</b>	<b>70.37</b>	<b>70.41</b>
		<b>Trasmittanza media involucro [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>0.50</b>	
		<b>Massa superficiale media involucro [kg/m<sup>2</sup>]</b>				<b>160</b>	
		<b>Capacità termica media involucro [kJ/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>160</b>	

<b>Edificio in linea tradizionale (1/8)</b>	Superficie utile (riscaldata)	1,800 [m <sup>2</sup> ]
---	-------------------------------	-------------------------

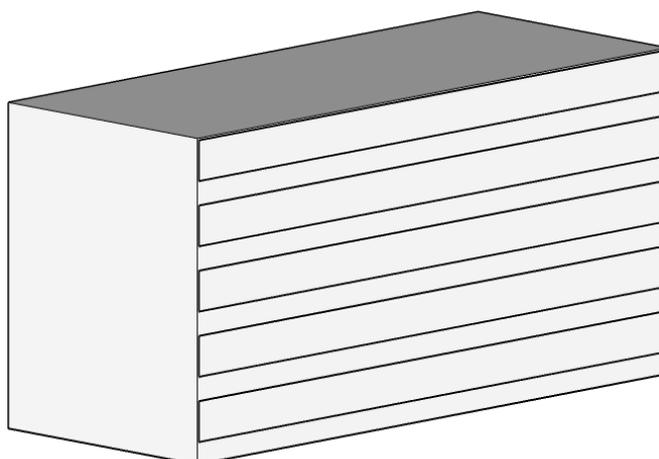
<b>(B)</b>	Superficie disperdente	1,980 [m <sup>2</sup> ]
	Volume riscaldato	5,400 [m <sup>3</sup> ]



<b>BP</b>		<b>Pesante</b>					
		U [W/(m <sup>2</sup> K)]	M <sub>s</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/(m <sup>2</sup> K)]	Htr [W/K]	M [10 <sup>3</sup> kg]	C [MJ/K]
	A [m <sup>2</sup> ]						
Pareti opache	1,035	0.40	729.85	622.92	415.56	755.39	644.72
Finestre	225	2.35	-	-	529.20	-	-
Copertura	360	0.35	414.40	395.28	125.31	149.18	142.30
Basamento	360	0.42	341.96	320.65	151.69	123.11	115.44
Solai intermedi	1,440		362.96	343.54		522.66	494.70
TOTALE					1,221.76	1,027.68	902.46
		<b>Trasmittanza media involucro [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>0.62</b>	
		<b>Massa superficiale media involucro [kg/m<sup>2</sup>]</b>				<b>519</b>	
		<b>Capacità termica media involucro [kJ/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>456</b>	

<b>BL</b>		<b>Leggero</b>					
		U [W/(m <sup>2</sup> K)]	M <sub>s</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/(m <sup>2</sup> K)]	Htr [W/K]	M [10 <sup>3</sup> kg]	C [MJ/K]
	A [m <sup>2</sup> ]						
Pareti opache	1,035	0.40	40.05	39.47	413.41	41.45	40.85
Finestre	225	2.35	-	-	529.20	-	-
Copertura	360	0.35	275.68	298.58	126.24	99.24	107.49
Basamento	360	0.42	341.96	320.65	151.69	123.11	115.44
Solai intermedi	1,440		362.96	343.54		522.66	494.70
TOTALE					1,220.54	263.80	263.78
		<b>Trasmittanza media involucro [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>0.62</b>	
		<b>Massa superficiale media involucro [kg/m<sup>2</sup>]</b>				<b>133</b>	
		<b>Capacità termica media involucro [kJ/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>133</b>	

<b>Edificio in linea vetrato</b>	<b>(C)</b>	Superficie utile (riscaldata)	1,800 [m <sup>2</sup> ]
		Superficie disperdente	1,980 [m <sup>2</sup> ]
		Volume riscaldato	5,400 [m <sup>3</sup> ]



<b>CP</b>		<b>Pesante</b>					
<b>A</b>		<b>U</b>	<b>M<sub>s</sub></b>	<b>C</b>	<b>Htr</b>	<b>M</b>	<b>C</b>
[m <sup>2</sup> ]		[W/(m <sup>2</sup> K)]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kJ/(m <sup>2</sup> K)]	[W/K]	[10 <sup>3</sup> kg]	[MJ/K]
Pareti opache	690	0.40	729.85	622.92	277.04	503.60	429.81
Finestre	570	2.35	-	-	1,340.64	-	-
Copertura	360	0.35	414.40	395.28	125.31	149.18	142.30
Basamento	360	0.42	341.96	320.65	151.69	123.11	115.44
Solai intermedi	1,440		362.96	343.54		522.66	494.70
<b>TOTALE</b>					1,894.68	775.89	687.55
		<b>Trasmittanza media involucro [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>0.96</b>	
		<b>Massa superficiale media involucro [kg/m<sup>2</sup>]</b>				<b>392</b>	
		<b>Capacità termica media involucro [kJ/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>347</b>	

<b>CL</b>		<b>Leggero</b>					
<b>A</b>		<b>U</b>	<b>M<sub>s</sub></b>	<b>C</b>	<b>Htr</b>	<b>M</b>	<b>C</b>
[m <sup>2</sup> ]		[W/(m <sup>2</sup> K)]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kJ/(m <sup>2</sup> K)]	[W/K]	[10 <sup>3</sup> kg]	[MJ/K]
Pareti opache	690	0.40	40.05	39.47	275.61	27.63	27.23
Finestre	570	2.35	-	-	1,340.64	-	-
Copertura	360	0.35	275.68	298.58	126.24	99.24	107.49
Basamento	360	0.42	341.96	320.65	151.69	123.11	115.44
Solai intermedi	1,440		362.96	343.54		522.66	494.70
<b>TOTALE</b>					1,894.18	249.98	250.16
		<b>Trasmittanza media involucro [W/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>0.96</b>	
		<b>Massa superficiale media involucro [kg/m<sup>2</sup>]</b>				<b>126</b>	
		<b>Capacità termica media involucro [kJ/(m<sup>2</sup> K)]</b>				<b>126</b>	

## 3.6 Definizione dei parametri di occupazione e gestione degli edifici

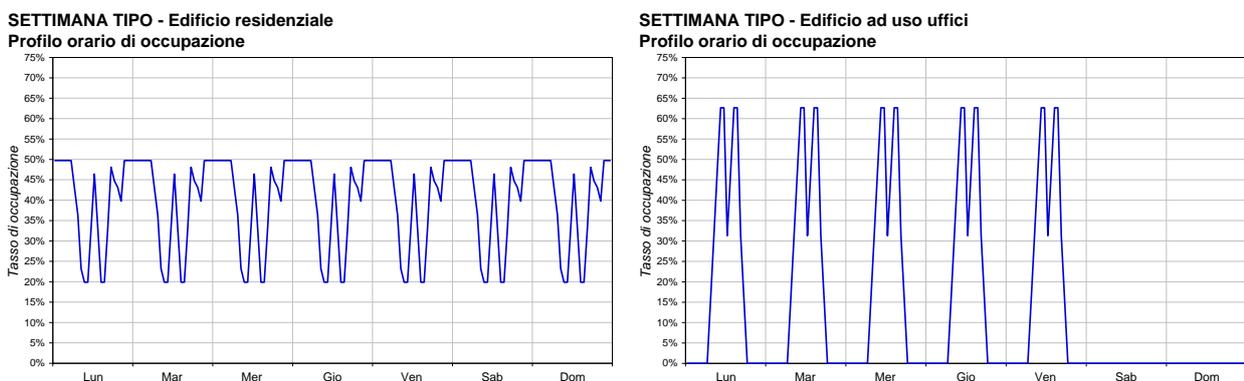
### 3.6.1 Occupazione

All'interno del bilancio termico dell'edificio, i dati relativi all'occupazione riguardano sia il carico termico interno relativo alla presenza di persone, sia la definizione del profilo di utilizzo dell'edificio, che determina anche il funzionamento di apparecchiature/luci (per una descrizione dettagliata si rimanda alla Deliverable B) e il tipo di ventilazione (vedere il paragrafo seguente).

I tassi di occupazione sono stati elaborati sulla base delle indicazioni riportate nel quaderno tecnico SIA 2024<sup>1</sup>, in coerenza con le considerazioni che hanno portato allo sviluppo dei profili di carico elettrico.

Per quanto riguarda gli edifici a destinazione d'uso residenziale, sono stati utilizzati gli stessi profili di occupazione minimo e medio indicati dal quaderno tecnico per i diversi locali, elaborandoli sulla base della composizione dell'abitazione media nazionale. Il risultato è un indice di  $38.6 \text{ m}^2/\text{persona}$  nel caso dell'edificio A e un indice di  $29.4 \text{ m}^2/\text{persona}$  per l'edificio B, corrispondenti rispettivamente a  $1.85 \text{ W/m}^2$  e  $2.43 \text{ W/m}^2$  di carico termico, che si sviluppano sulla base del profilo orario riportato in **Figura 1**.

Per quanto riguarda gli edifici ad uso terziario, il quaderno tecnico riporta un indice di affollamento di  $11 \text{ m}^2/\text{persona}$  per i locali adibiti ad ufficio. Sulla base di quanto indicato nella specifica tecnica UNI TS 11300-1 (2008), la superficie totale dell'edificio è stata considerata per il 60% occupata da veri e propri locali ad uso ufficio e per il 40% da ambienti di servizio e distribuzione, privi di occupazione: l'indice di affollamento risultante è perciò di  $18.3 \text{ m}^2/\text{persona}$ , con un carico termico corrispondente di  $3.90 \text{ W/m}^2$ , da applicare secondo il profilo orario riportato in **Figura 1**.



**Figura 1: Profili orari, di occupazione degli edifici a destinazione d'uso residenziale e terziario; valori percentuali rispetto al valore massimo.**

Per la definizione dei carichi elettrici e dei relativi guadagni interni, si rimanda alla *Deliverable B*.

### 3.6.2 Ventilazione

I flussi che intervengono nel bilancio termico dell'edificio sono quelli relativi alla ventilazione naturale, caratterizzati dalle condizioni termo-igrometriche dell'ambiente esterno.

I ricambi d'aria sono stati definiti sulla base delle indicazioni della specifica tecnica UNI TS 11300-1 (2008) per valutazioni adattate all'utenza, che, al fine di determinare la portata di ventilazione necessaria per soddisfare l'esigenza di qualità dell'aria interna, richiama la norma UNI EN 15251

<sup>1</sup> Merkblatt 2024. Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik, SIA, 2006.

(2008), che riporta i criteri di determinazione dei parametri relativi all'ambiente interno da considerare nelle valutazioni delle prestazioni energetiche degli edifici.

In particolare, all'interno dell'Appendice B sono suggeriti alcuni metodi di valutazione per la determinazione dei tassi di ricambio d'aria<sup>2</sup> necessari a mantenere un livello adeguato di qualità dell'aria interna, che sono diversi per edifici residenziali e per edifici ad uso terziario.

Per entrambe le destinazioni d'uso residenziale e terziaria si è deciso di impostare un tasso di **infiltrazione** costante 0.20 vol/h. Tale valore, oltre ad essere coerente con dati convenzionali di infiltrazione naturale dell'aria attraverso l'involucro edilizio, corrisponde a 0.17 l/(s m<sup>2</sup>), valore compatibile con l'intervallo minimo di tassi di ventilazione richiesto dalla norma per i periodi di non-occupazione al fine di garantire un sufficiente livello di qualità dell'aria all'inizio del periodo di occupazione (0.10-0.20 l/(s m<sup>2</sup>)).

### *Edifici residenziali*

Per quanto riguarda gli edifici a destinazione d'uso residenziale, la norma UNI EN 15251 riconosce le difficoltà di una valutazione accurata del tasso di ventilazione, se questa è naturale. Ciononostante, consente di utilizzare le valutazioni dei ricambi d'aria di progetto dei sistemi di ventilazione meccanica anche per la valutazione dei tassi minimi di ricambio per la ventilazione naturale, distinguendo anche in funzione della tipologia dei diversi locali che compongono l'edificio.

Vengono proposti diversi valori di riferimento per il calcolo dei tassi di ventilazione necessari a mantenere un sufficiente livello di qualità dell'aria interna:

- un valore al m<sup>2</sup> per l'intero edificio;
- un valore per persona relativo ai soli locali abitabili;
- un valore al m<sup>2</sup> relativo ai soli locali abitabili.

Nel caso i diversi metodi diano risultati differenti, la norma suggerisce di assumere il più alto: per l'edificio residenziale medio considerato in questo studio, i tre metodi consentono di arrivare, rispettivamente, ai seguenti valori finali di ricambi orari: 0.504 vol/h, 0.286 vol/h e 0.762 vol/h.

È stato perciò assunto il terzo valore, risultante dal calcolo al m<sup>2</sup> per i soli locali abitabili.

Si è deciso di applicare tale ricambio d'aria in modo costante, indipendentemente dal profilo di occupazione degli edifici residenziali, poiché per tale destinazione d'uso è molto più difficile individuare una corrispondenza tra occupazione e ventilazione naturale<sup>3</sup>.

In entrambi gli edifici residenziali saranno quindi imposti un tasso costante di infiltrazioni pari a 0.200 vol/h e un tasso costante di ventilazione naturale pari a 0.562 vol/h.

### *Edifici per uffici*

Per quanto riguarda gli edifici ad uso terziario, la norma indica due principali fonti di inquinanti:

- gli occupanti;
- l'edificio (mobili, finiture, detergenti, apparecchiature ...) e gli impianti.

Uno dei metodi di valutazione proposti consente di individuare separatamente il tasso di ricambio necessario per eliminare le due tipologie di inquinanti dall'aria interna, sulla base di un valore in l/s per persona nel primo caso e di un valore in l/s per m<sup>2</sup> per il secondo, e di sommarle.

Per quanto riguarda gli inquinanti prodotti dall'edificio e dagli impianti, quindi, è stato possibile individuare dei ricambi d'aria costanti da applicare durante il periodo di occupazione (pari a 0.7 l/(s m<sup>2</sup>) e a 0.84 vol/h), cui sono state sottratte le infiltrazioni che già contribuiscono al ricambio d'aria, arrivando così a un valore risultante di 0.64 vol/h.

---

<sup>2</sup> Intendiamo il valore totale come somma delle infiltrazioni e della ventilazione naturale. Ad esempio, se i ricambi d'aria sono pari a 1,5 vol/h e le infiltrazioni pari a 0,2 vol/h, avremo che la ventilazione naturale contribuisce per 1,3 vol/h. Si rammenta che le valutazioni precedentemente svolte facevano riferimento per tutti gli edifici ad un ricambio d'aria costante (imposto come infiltrazioni) pari a 0.5 volumi/ora.

<sup>3</sup> Questo è vero soprattutto per quanto riguarda le ore notturne, durante le quali dovrebbe essere garantita maggiore ventilazione, contrariamente a quanto avviene nella prassi comune.

Per quanto riguarda il contributo degli occupanti, per determinare il tasso di ventilazione è stato necessario moltiplicare l'indice di affollamento (tratto sulla base delle indicazioni contenute nel quaderno svizzero SIA 2024 relativo agli uffici open space, pari a 8 m<sup>2</sup>/persona) per i ricambi d'aria per persona indicati dalla UNI EN 15251 (7 l/s), ed è stato così ottenuto un valore nominale di 1.05 vol/h. Tale dato è stato successivamente modulato sulla base del profilo di occupazione utilizzato nella valutazione dei carichi interni.

Il numero massimo di ricambi d'aria risulta quindi pari a 1.89 vol/h, di cui 0,2 per infiltrazione, 0,64 per ventilazione naturale ai fini dell'eliminazione della contaminazione inerente all'edificio e 1,05 per ventilazione naturale ai fini dell'eliminazione della contaminazione derivante dalla presenza di persone (tutte assunte non fumatori). A quest'ultimo valore si applica la modulazione tramite lo *schedule* orario relativo alla presenza di persone; i ricambi d'aria totali risultanti per l'edificio ad uso uffici sono riportati nel grafico seguente.

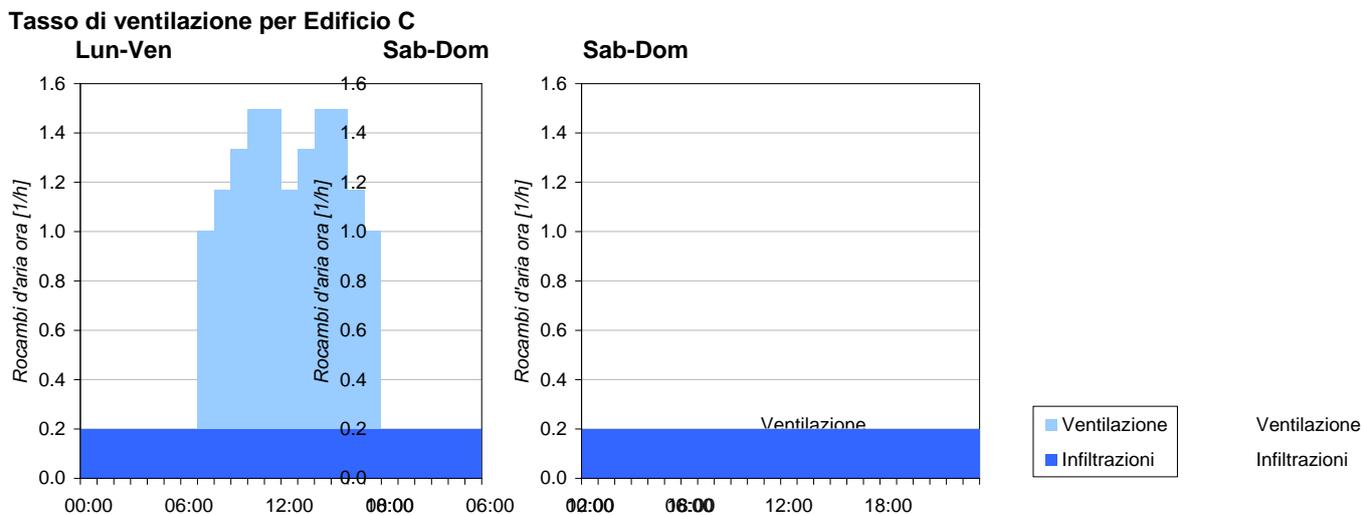
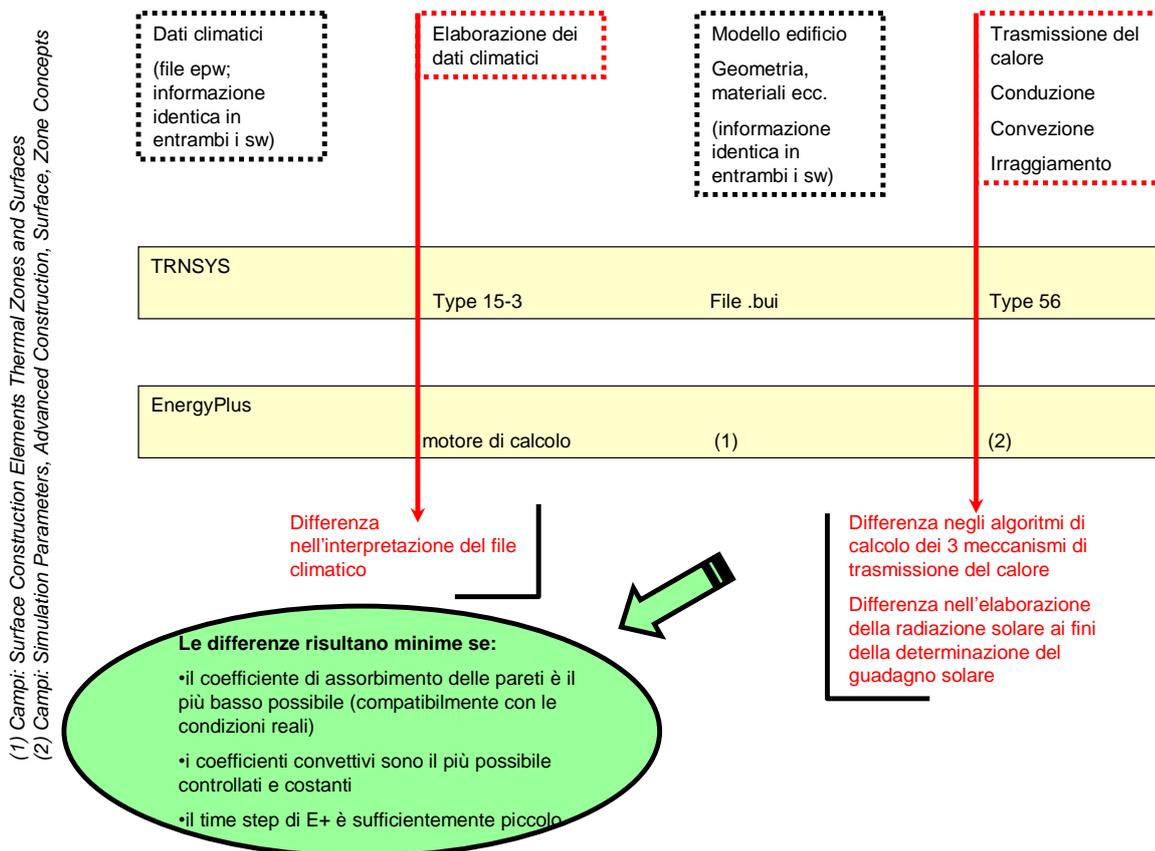


Figura 2: Profili orari del tasso di ricambio d'aria, in 1/h, per i locali ad uso ufficio.

## 4 Analisi delle procedure di simulazione dei software dinamici TRNSYS ed EnergyPlus

Date le finalità del lavoro, che implica il confronto dello strumento Odesse con i due applicativi citati, selezionati in quanto sicuramente affidabili e universalmente validati, il presente capitolo analizza e confronta le due procedure di simulazione dinamica seguite.

Nella letteratura tecnica sono disponibili diversi riferimenti in cui vengono discusse e argomentate le differenze riscontrabili non solo tra il comportamento energetico reale degli edifici e quello simulato con codici di calcolo, ma anche le differenze tra i risultati ricavati a partire con differenti strumenti, sia di tipo stazionario, sia di tipo dinamico. Pertanto, non ci si deve stupire del fatto che dalle simulazioni effettuate con TRNSYS ed EnergyPlus, si è rilevato che, nonostante gli input relativi al clima e all'edificio siano identici nei due casi, si possono ottenere risultati diversi in termini di domanda di *heating* e *cooling* per tutti gli edifici e tutte le località esaminate. Tuttavia, per comprendere meglio le motivazioni di tali differenze, è stata fatta un'accurata analisi di sensitività in relazione ai principali parametri che caratterizzano la termo-fisica degli edifici; tali osservazioni possono essere ovviamente utili anche alla calibrazione di Odesse.



**Figura 3:** schema di lavoro dei due software analizzati e indicazione dei punti in cui questi si comportano diversamente

Dalle simulazioni effettuate, si è rilevato che, nonostante gli input relativi al clima e all'edificio siano identici nei due casi, si possono ottenere risultati diversi in termini di domanda di *heating* e *cooling* per tutti gli edifici e tutte le località esaminate. Per comprendere meglio le motivazioni di tali differenze, è stata fatta un'accurata analisi di sensitività in relazione ai principali parametri che caratterizzano la termo-fisica degli edifici con particolare riferimento a:

- lettura e interpretazione dei dati climatici;

- trasmissione del calore dalle superfici degli elementi costruttivi agli ambienti interno ed esterno, dominata dai coefficienti di scambio convettivi e radiativi relativi agli strati di finitura delle strutture;
- trasmissione della radiazione solare incidente attraverso gli elementi finestrati, che dipende dalle caratteristiche termiche e ottiche delle componenti vetrate;
- conduzione termica attraverso le componenti opache, dominata dalle funzioni di trasferimento calcolate sulla base delle caratteristiche termo-fisiche degli strati che compongono gli elementi costruttivi (parte analizzata in maniera più superficiale e non inclusa nel presente rapporto).

I paragrafi successivi riportano l'analisi dei fenomeni osservati.

<u>EnergyPlus</u>	<u>TRNSYS</u>
• Dati meteo orari	• Dati meteo orari
• Interpretazione ogni 15'	• Interpretazione ogni ora
• Simulazione	• Simulazione
• Output orari	• Output orari

**Figura 4: schema di lavoro dei due software in riferimento agli intervalli temporali**

## 4.1 File climatico

Nel presente studio le analisi sono state rivolte a 3 diverse località climatiche rappresentative della realtà nazionale in base alla classificazione climatica riportata all'interno del D.P.R. 412 (1993): Milano in zona climatica E (2444 GG di riscaldamento), Roma, in zona climatica D (1415 GG di riscaldamento) e Palermo in zona climatica B (751 GG di riscaldamento). Tramite la classificazione climatica vengono anche indicati dei periodi di riscaldamento ufficiali a seconda della fascia di riferimento: in questo studio, tali periodi sono stati rispettati per quanto riguarda il calcolo del fabbisogno di riscaldamento. Per quanto riguarda la stagione estiva, il periodo di raffrescamento è imposto come complementare a quello di riscaldamento.

I dati climatici utilizzati per definire le condizioni al contorno degli edifici nelle simulazioni dinamiche hanno ovviamente una grandissima influenza sui risultati in termini di domanda di *heating* e *cooling*. In questo studio, al fine di normalizzare i risultati, per entrambi gli strumenti utilizzati sono stati adottati i file climatici in formato EPW forniti dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti<sup>4</sup>. I dati climatici delle località italiane, in particolare, derivano da un'elaborazione statistica delle rilevazioni effettuate tra il 1951 e il 1970 dalle stazioni del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare nel quadro di una ricerca promossa dal CNR, dalle quali è stata sviluppata la banca dati "Giovanni De Giorgio".

I file climatici utilizzati, quindi, sono stati i seguenti:

- per Milano: ITA\_Milano-Linate.160800\_IGDG.epw;
- per Roma: ITA\_Roma-Ciampino.162390\_IGDG.epw;
- per Palermo: ITA\_Palermo-Boccadifalco.164000\_IGDG.epw.

<sup>4</sup> Sul sito web <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> sono disponibili file climatici di riferimento per diversi Paesi.

I file climatici EPW sono espressi in un formato normalizzato sviluppato per i due software di simulazione ESP-r e EnergyPlus, ricavato dal precedente *Typical Meteorological Year 2 (TMY2)* ma reso più facilmente leggibile (Crawley et al., 1999), che comprende i seguenti dati orari:

- temperatura a bulbo secco [°C]
- temperatura di rugiada [°C]
- umidità relativa [%]
- pressione atmosferica [Pa]
- intensità della radiazione infrarossa ricevuta sull'orizzontale [Wh/m<sup>2</sup>]
- radiazione globale incidente sull'orizzontale [Wh/m<sup>2</sup>]
- radiazione diretta normale [Wh/m<sup>2</sup>]
- radiazione diffusa sull'orizzontale [Wh/m<sup>2</sup>]
- direzione del vento [°]
- velocità del vento [m/s]
- condizioni meteorologiche.

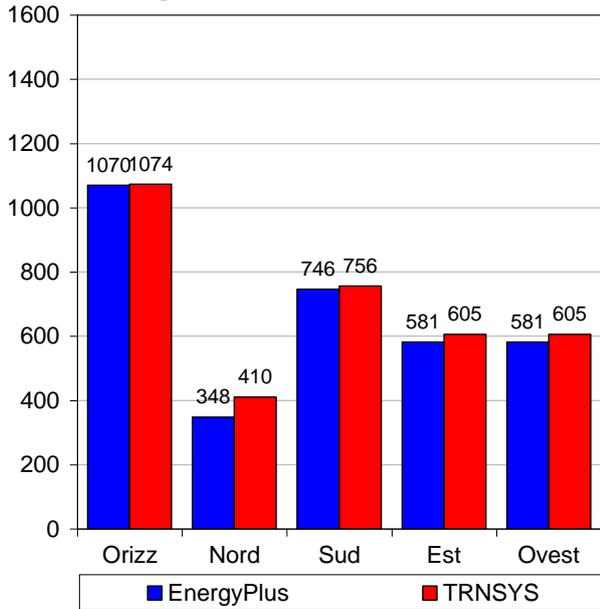
Le informazioni meteo climatiche fornite sono pertanto identiche per entrambi gli strumenti utilizzati; a seconda dello strumento, vengono effettivamente considerati ed elaborati nella simulazione alcuni dei campi contenuti nel file originario.

Un aspetto rilevante degli algoritmi di interpretazione del file climatico da parte dei due strumenti riguarda l'elaborazione dei dati di radiazione solare per ottenere le quantità incidenti sulle diverse superfici dell'edificio (vedere paragrafo successivo).

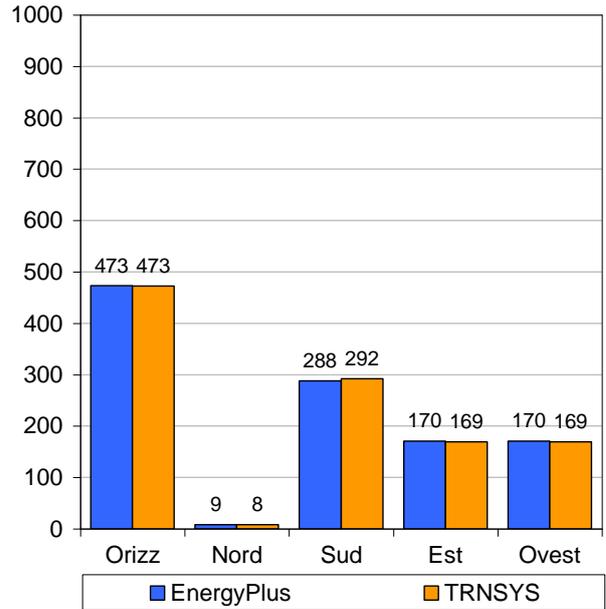
#### **4.1.1 Radiazione solare**

Un aspetto rilevante degli algoritmi di interpretazione del file climatico da parte dei due strumenti riguarda l'elaborazione dei dati di radiazione solare per ottenere le quantità incidenti sulle diverse superfici dell'edificio. I due software elaborano infatti le tre componenti globale, diretta e diffusa a partire dal file climatico considerando campi differenti: se EnergyPlus, infatti, utilizza i valori di radiazione diretta normale e diffusa sull'orizzontale, TRNSYS utilizza quelli di radiazione diretta normale e globale sull'orizzontale. Inoltre, poiché il file climatico non riporta gli angoli di incidenza relativi alla radiazione diretta, questi devono essere calcolati dai software in base a modelli geometrici che dipendono dalla posizione della località considerata. Tutto questo ha come effetto che, pur utilizzando il medesimo file climatico, i dati di radiazione solare incidente sulle superfici dell'edificio possono risultare differenti, come si evince dalla figura successiva (confronto tra i dati annuali di radiazione solare globale e diretta incidenti sulle diverse superfici che compongono l'edificio valutati dai due software).

**Radiazione globale incidente [kWh/m<sup>2</sup>], Milano**

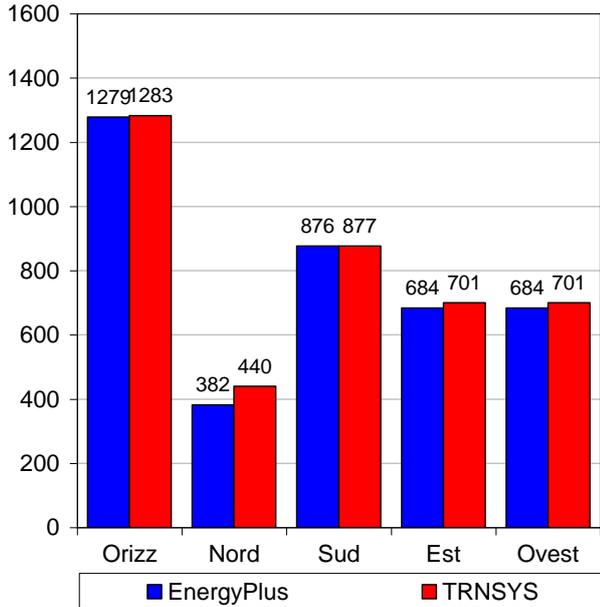


**Radiazione diretta incidente [kWh/m<sup>2</sup>], Milano**

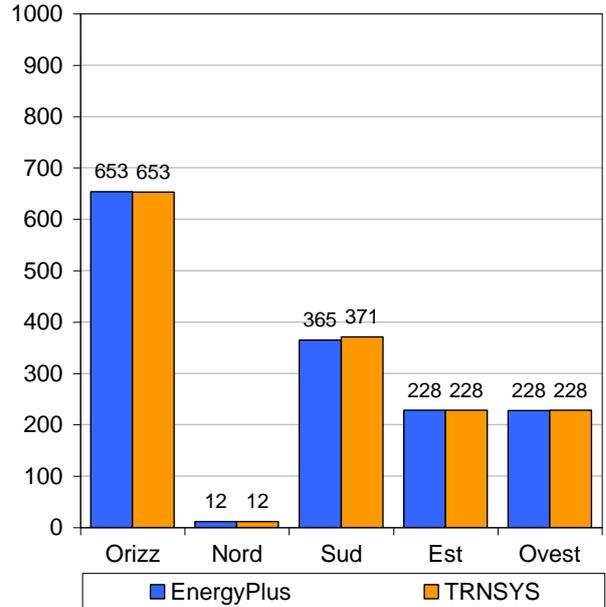


**Figura 5: Valore annuale di radiazione incidente sulle diverse superfici dell'edificio (in kWh/m<sup>2</sup>), utilizzato dai due applicativi come input nella simulazione degli edifici, Milano.**

**Radiazione globale incidente [kWh/m<sup>2</sup>], Roma**

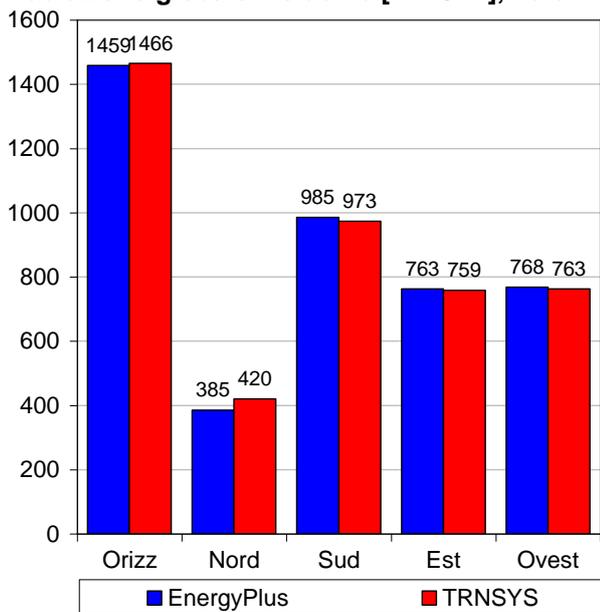


**Radiazione diretta incidente [kWh/m<sup>2</sup>], Roma**

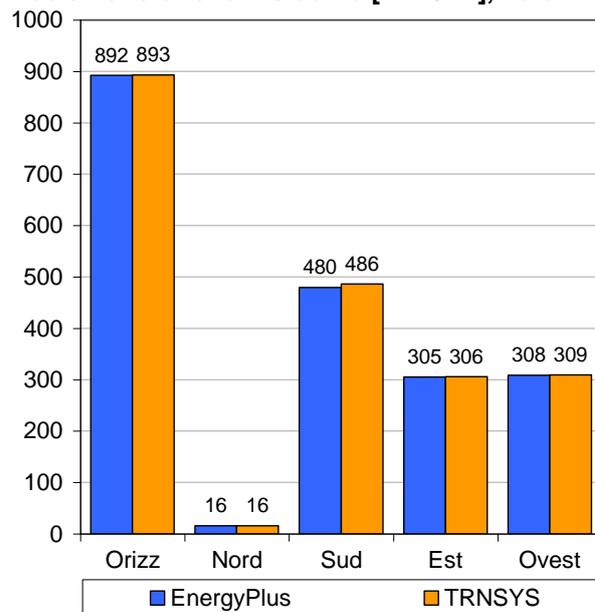


**Figura 6: Valore annuale di radiazione incidente sulle diverse superfici dell'edificio (in kWh/m<sup>2</sup>), utilizzato dai due applicativi come input nella simulazione degli edifici, Roma.**

**Radiazione globale incidente [kWh/m<sup>2</sup>], Palermo**



**Radiazione diretta incidente [kWh/m<sup>2</sup>], Palermo**



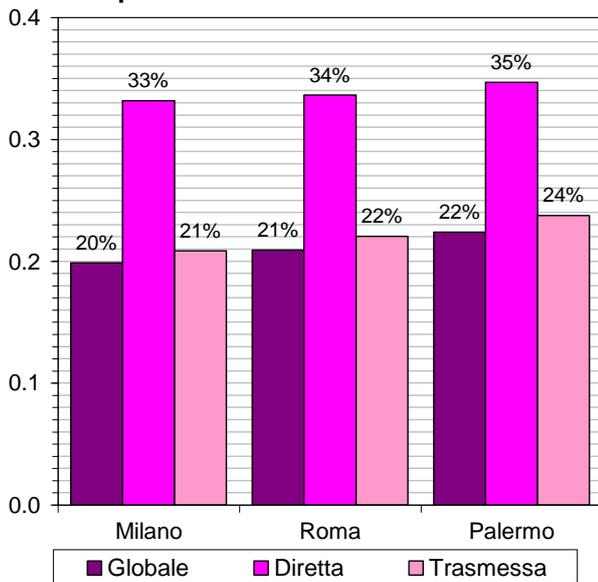
**Figura 7: Valore annuale di radiazione incidente sulle diverse superfici dell'edificio (in kWh/m<sup>2</sup>), utilizzato dai due applicativi come input nella simulazione degli edifici, Palermo.**

In generale, la radiazione solare globale incidente sulle superfici valutata da TRNSYS tende a risultare leggermente superiore a quella valutata da EnergyPlus, mentre la componente diretta risulta essere sostanzialmente coincidente.

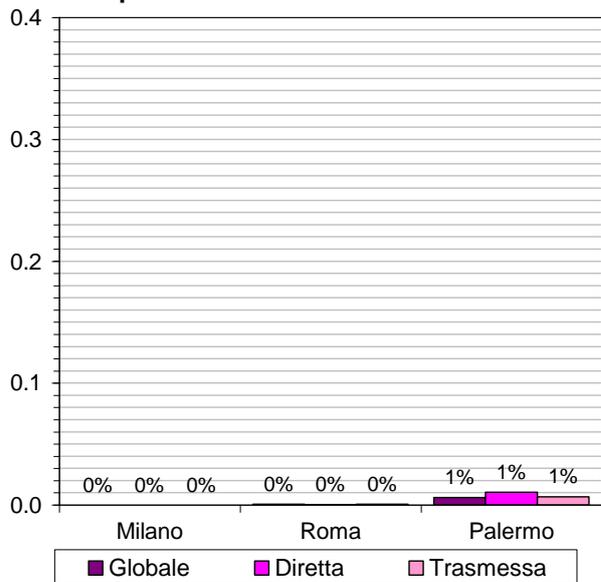
Tali risultati sono stati ottenuti a valle di un'accurata analisi delle prestazioni degli strumenti analizzati, da cui si è appresa la profonda importanza della scelta della lunghezza degli intervalli di simulazione sul modo in cui EnergyPlus elabora i dati di radiazione solare. Le prime prove infatti, facevano riferimento ad un intervallo di un'ora; dai dati sulla radiazione solare elaborata dal software, si rilevava una radiazione solare incidente a Ovest maggiore di quella incidente ad Est (20% in più nel caso della globale e 35% nel caso della componente diretta, quando il modello trigonometrico per l'elaborazione degli angoli di incidenza dovrebbe prevedere una sostanziale simmetria per queste due esposizioni; vedere anche la figura successiva).

Dalle simulazioni condotte si è rilevato che, con un numero di intervalli di simulazione all'ora pari a 4 (valore minimo consigliato anche nella manualistica di EnergyPlus) il file climatico può essere correttamente elaborato e possono essere evitati anche eventuali altri problemi connessi alla scelta del *time step*; pertanto, il *time step* definito in EnergyPlus dovrebbe essere sempre pari al massimo a 15 minuti (vedere anche la figura successiva).

**Differenza tra radiazione a Est e a Ovest**  
Time step: 1/h



**Differenza tra radiazione a Est e a Ovest**  
Time step: 4/h



**Figura 8: Differenza percentuale di radiazione incidente e trasmessa tra gli orientamenti Est e Ovest a seconda dell'intervallo di simulazione per le simulazioni in EnergyPlus.**

## 4.2 Comportamento termico dell'edificio

Uno degli aspetti più rilevanti nelle simulazioni dinamiche degli edifici riguarda la descrizione e l'interpretazione delle caratteristiche dell'edificio e dei fenomeni che ne caratterizzano il comportamento termo-fisico.

Tra questi possiamo citare, in particolare:

- trasmissione del calore dalle superfici degli elementi costruttivi agli ambienti interno ed esterno, dominata dai coefficienti di scambio convettivi e radiativi relativi agli strati di finitura delle strutture;
- trasmissione della radiazione solare incidente attraverso gli elementi finestrati, che dipende dalle caratteristiche termiche e ottiche delle componenti vetrate;
- conduzione termica attraverso le componenti opache, dominata dalle funzioni di trasferimento per le strutture calcolare dai due applicativi sulla base delle caratteristiche termo-fisiche degli strati che compongono gli elementi costruttivi.

### 4.2.1 Coefficienti di adduzione

Il coefficiente di scambio termico superficiale (o di adduzione) comprende le componenti convettiva e radiativa ed ha grande influenza sul bilancio termico dell'edificio.

In regime quasi-stazionario, convenzionalmente utilizzato per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, tale coefficiente di scambio viene rappresentato da un unico valore, detto adduzione, mentre all'interno degli applicativi utilizzati le due componenti vengono calcolate separatamente in base agli algoritmi di calcolo implementati.

Le analisi condotte riguardo al calcolo dello scambio termico superficiale, riportate in seguito, riguardano sempre il solo edificio di studio C, in entrambe le versioni leggera e pesante e per tutte le località climatiche considerate. Tale scelta è dettata dal fatto che nelle prove in assenza di profili di occupazione e carichi interni, l'edificio C, tra quelli di studio, è quello che ha rivelato le maggiori

differenze nei risultati di domanda termica di *heating* e *cooling* una volta messi a confronto gli esiti ottenuti con i due software di simulazione.

## 4.2.2 Convezione

Per quanto riguarda i coefficienti di scambio convettivo, TRNSYS consente diverse possibilità: è possibile inserire direttamente tali valori come costanti, oppure come valori “schedulati” oppure come input esterni. Per quanto riguarda le superfici rivolte verso l’interno, inoltre, è possibile lasciar valutare il coefficiente convettivo al software in modo dinamico, sulla base delle temperature delle superfici.

In EnergyPlus, diversamente, le opzioni di base per la determinazione della componente convettiva dello scambio termico superficiale comportano l’utilizzo di algoritmi di calcolo, che possono essere più o meno dettagliati (in “*Simulation Parameters*”: “*Surface Convection Algorithm: Inside*” e “*Surface Convection Algorithm: Outside*”). Oppure, per situazioni particolari di calcolo, è consentito imporre alle superfici dei coefficienti fissi da utilizzare al posto di quelli calcolati (in “*Advanced Construction, Surface, Zone Concepts*”: “*Surface property: Convection Coefficient*”).

Per valutare meglio gli effetti di tali scelte sono state condotte le simulazioni corrispondenti a ciascuna delle opzioni elencate per l’edificio C; nei grafici seguenti sono messi a confronto i risultati della valutazione in termini di fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, considerando sia la convezione “dinamica” (con coefficienti dettagliati) sia quella “stazionaria” (con coefficienti fissi).

Nel caso dinamico è importante sottolineare come il type 56 di TRNSYS (edificio) non contenga un algoritmo di calcolo per il coefficiente convettivo esterno, quindi questo è stato calcolato per tutte le superfici, come suggerito dalla norma UNI EN ISO 6946, considerando però i dati orari di velocità del vento derivati dal file climatico.

Riguardo l’impostazione dei valori costanti, per le componenti opache si è fatto riferimento alla norma EN ISO 6946, calcolando però il coefficiente esterno sulla base della velocità del vento media per le diverse località riportata all’interna della norma UNI 10349.

**Tabella 2: Coefficienti costanti di scambio convettivo per le componenti opache degli edifici valutati sulla base di quanto indicato nell’appendice A della UNI EN ISO 6946 e dei dati climatici medi annuali della UNI 10349.**

Coefficienti in $W/(m^2K)$	Interno	Esterno		
		Milano	Roma	Palermo
Pareti verticali	2.5	8.4	14.4	18.4
Copertura (ascendente)	5.0	8.4	14.4	18.4
Basamento (discendente)	0.7	0.0	0.0	0.0

Per quanto riguarda gli elementi trasparenti, invece, non essendoci norme di riferimento per il calcolo della sola componente convettiva, sono stati mantenuti i coefficienti che TRNSYS suggerisce come default ( $3.06 W/m^2K$  verso l’interno e  $17.78 W/m^2K$  verso l’esterno) in entrambi gli applicativi.

## FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici CP e CL

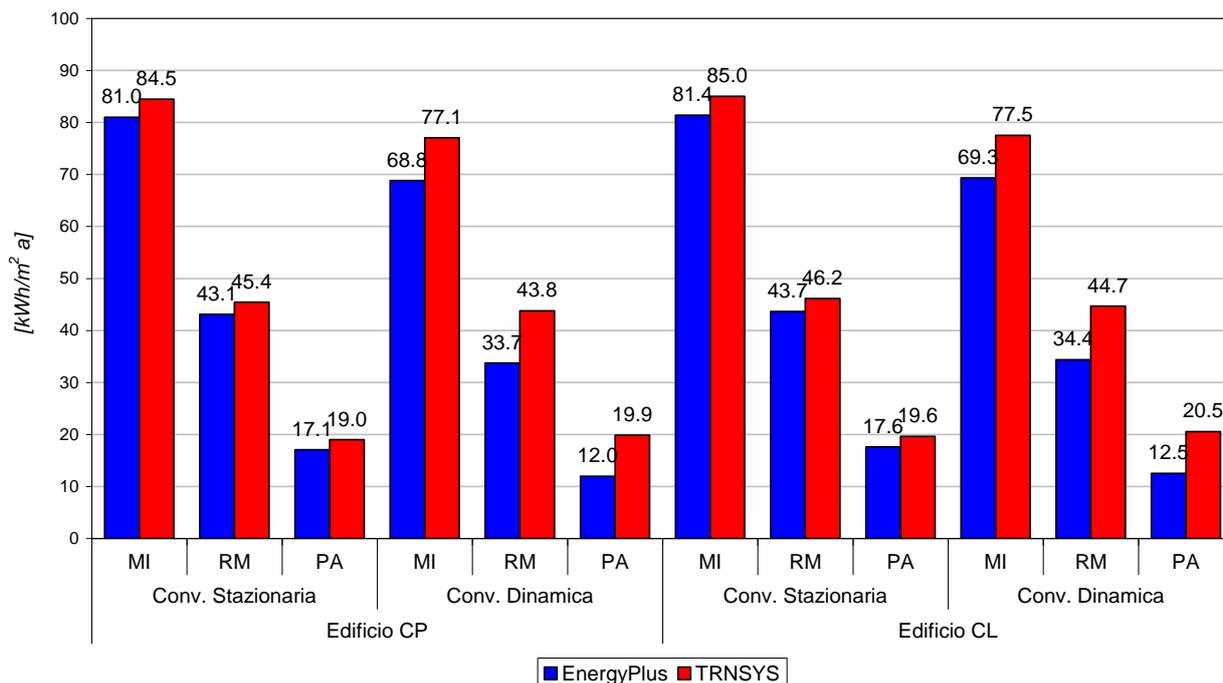


Figura 9: Fabbisogno di riscaldamento, in kWh/m<sup>2</sup>, per l'edificio C con elementi costruttivi leggeri e pesanti, valutato dai due software a partire da coefficienti di scambio convettivo costanti (convezione stazionaria) e dettagliati (convezione dinamica).

## FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici CP e CL

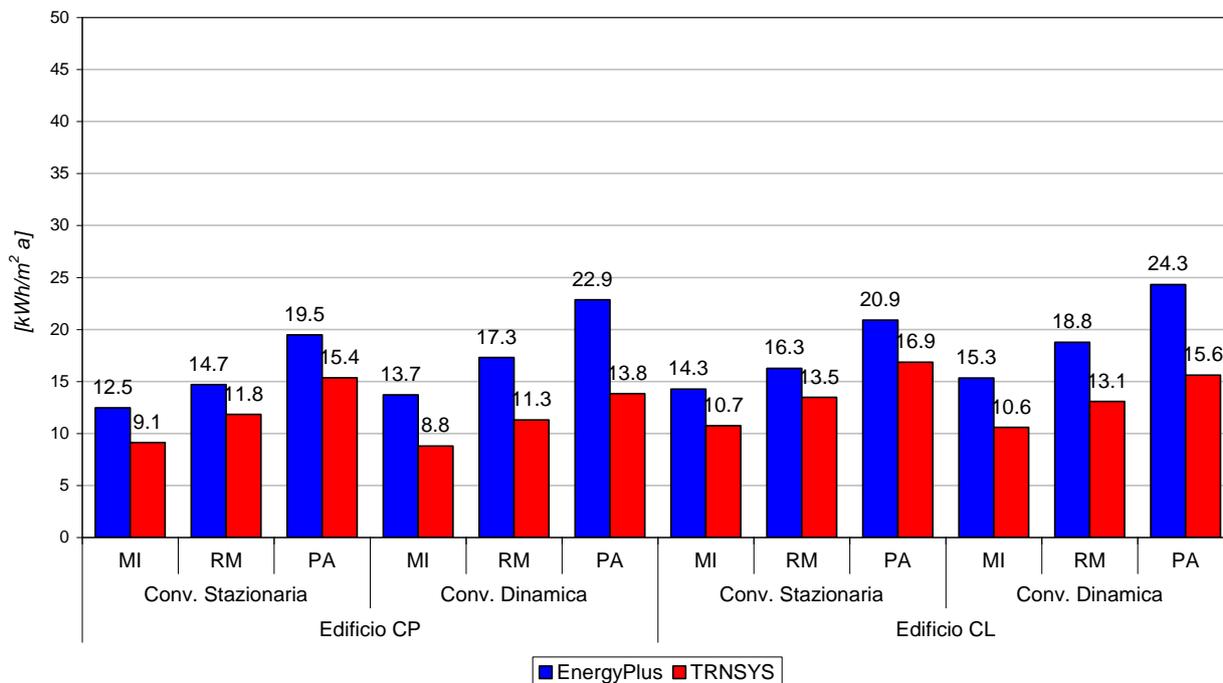


Figura 10: Fabbisogno di raffrescamento, in kWh/m<sup>2</sup>, per l'edificio C con elementi costruttivi leggeri e pesanti, valutato dai due software a partire da coefficienti di scambio convettivo (convezione stazionaria) e dettagliati (convezione dinamica).

Come si evince nelle conclusioni, il confronto tra gli esiti dei due software evidenzia differenze di valutazione in termini di domanda di *heating* e *cooling* molto più pronunciate nel caso dinamico e molto più contenute nel caso stazionario. Pertanto, al fine di minimizzare le discrepanze tra i

fabbisogni valutati dai diversi algoritmi di calcolo contemplati nei due applicativi, si suggerisce di adottare i coefficienti convettivi fissi sopra indicati.

### 4.2.3 Irraggiamento

In TRNSYS, lo scambio termico radiativo dipende delle caratteristiche superficiali delle strutture che compongono l'edificio. Il coefficiente di assorbimento può essere indicato dagli utenti all'interno dell'interfaccia per la descrizione degli strati che compongono gli elementi costruttivi, mentre per quanto riguarda il coefficiente di emissività esso viene assegnato pari a 0.9 come default dal software e non può essere modificato dagli utenti. Inoltre, TRNSYS non fa riferimento ad un modello geometrico e la radiazione solare entrante dalle superfici vetrate viene distribuita uniformemente su tutte le superfici interne della zona termica.

Anche in EnergyPlus lo scambio termico radiativo viene valutato sulla base dell'assorbimento e dell'emissività dei materiali, che vanno però singolarmente descritti. Diversamente da TRNSYS, in questo caso vi è la descrizione geometrica, quindi l'applicativo consente di richiedere diversi livelli di dettaglio nel calcolo della distribuzione della radiazione solare entrante nell'edificio. Le due opzioni principali sono:

- “*full exterior*”, che determina correttamente la distribuzione all'esterno dell'edificio (in base alle ostruzioni), ma all'interno prevede che tutta la radiazione venga assorbita e riemessa dall'elemento di pavimento (impostazione di *default*);
- “*full interior and exterior*”, che si comporta come l'opzione precedente, ma all'interno determina la corretta distribuzione della radiazione solare su tutti gli elementi costruttivi, tramite coefficienti di riflessione e caratteristiche geometriche della zona.

#### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici CP e CL

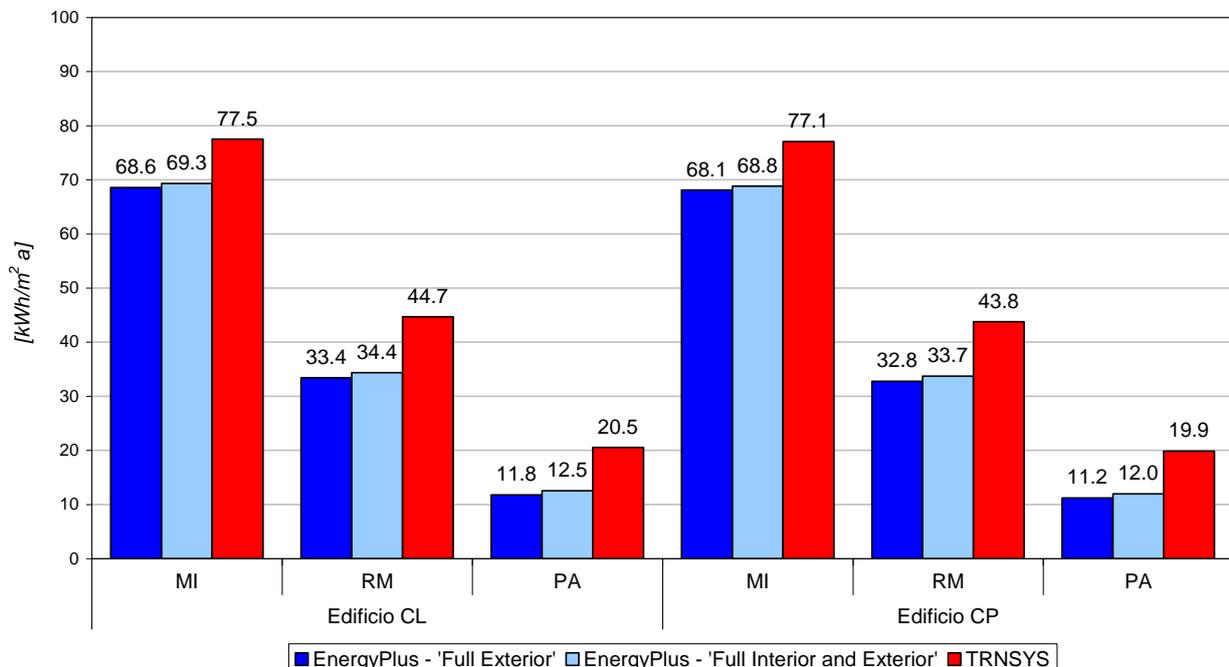
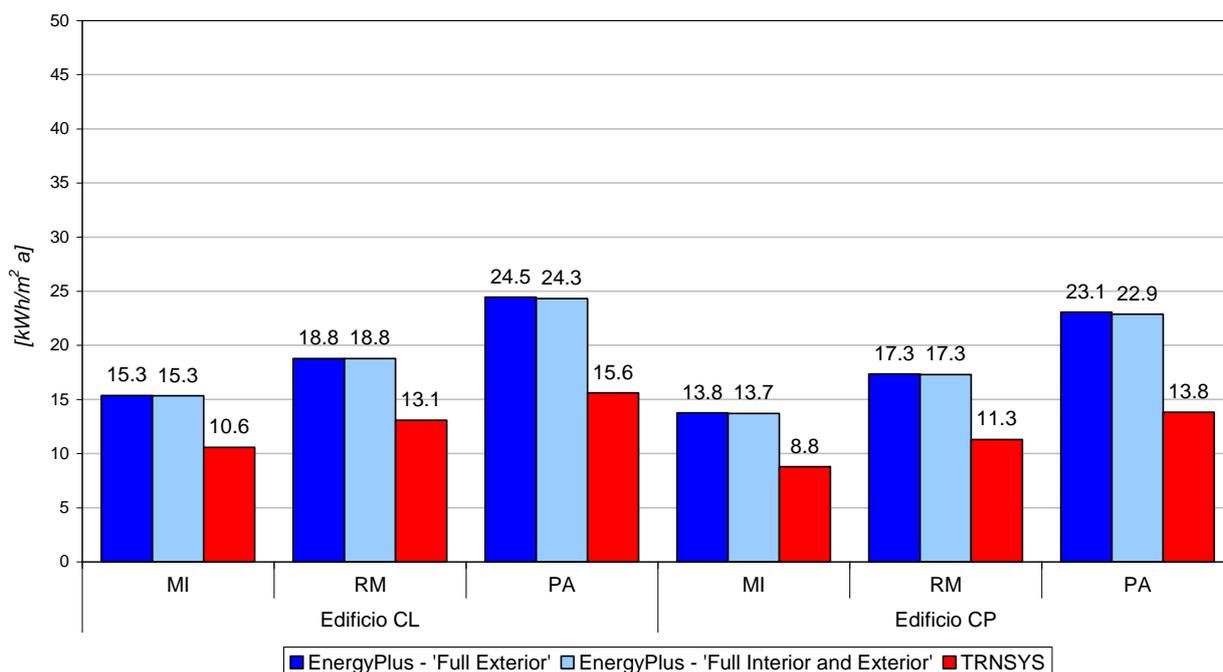


Figura 11: Confronto del fabbisogno di riscaldamento, in kWh/m<sup>2</sup>, calcolato da TRNSYS per l'edificio C (con elementi costruttivi leggeri e pesanti) con quello calcolato da EnergyPlus al variare del metodo di valutazione della distribuzione solare all'interno dell'edificio.

## FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici CP e CL



**Figura 12: Confronto del fabbisogno di raffreddamento, in kWh/m<sup>2</sup>, calcolato da TRNSYS per l'edificio C (con elementi costruttivi leggeri e pesanti) con quello calcolato da EnergyPlus al variare del metodo di valutazione della distribuzione solare all'interno dell'edificio.**

Dalle figure appena riportate appare evidente come entrambe le opzioni determinino una valutazione della componente radiativa all'interno della zona termica diversa da quella effettuata da TRNSYS, come prevedibile dalle definizioni riportate nei manuali. Sebbene la scelta tra le due impostazioni non determini cambiamenti particolarmente significativi nell'edificio considerato, si consiglia di utilizzare l'opzione "Full Interior and Exterior" per coerenza con il tipo di distribuzione utilizzato da TRNSYS.

Dalle simulazioni condotte si è rilevata inoltre la sensibilità dei risultati rispetto al parametro di assorbimento delle superfici nella valutazione della componente radiativa dello scambio termico superficiale. Per tale motivo, si è anche deciso di confrontare l'effetto che due diversi valori possono avere sulle differenze di calcolo tra i due software:

- $\alpha = 0.60$ , che può essere considerato un valore medio realistico, poiché corrisponde a cemento chiaro, mattone, pittura chiara (non bianca);
- $\alpha = 0.31$ , che corrisponde a superfici di colore bianco (valore minimo, non realistico)<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> 0,31 è il valore inizialmente suggerito da ENEA. Le corrispondenze tra i coefficienti di assorbimento e i materiali/colori di riferimento sono basati su quanto riportato in Butera (1995) "Architettura e ambiente" (pag. 59) e nel manuale *on line* di TRNSYS (pag. 6-41).

## FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici CP e CL

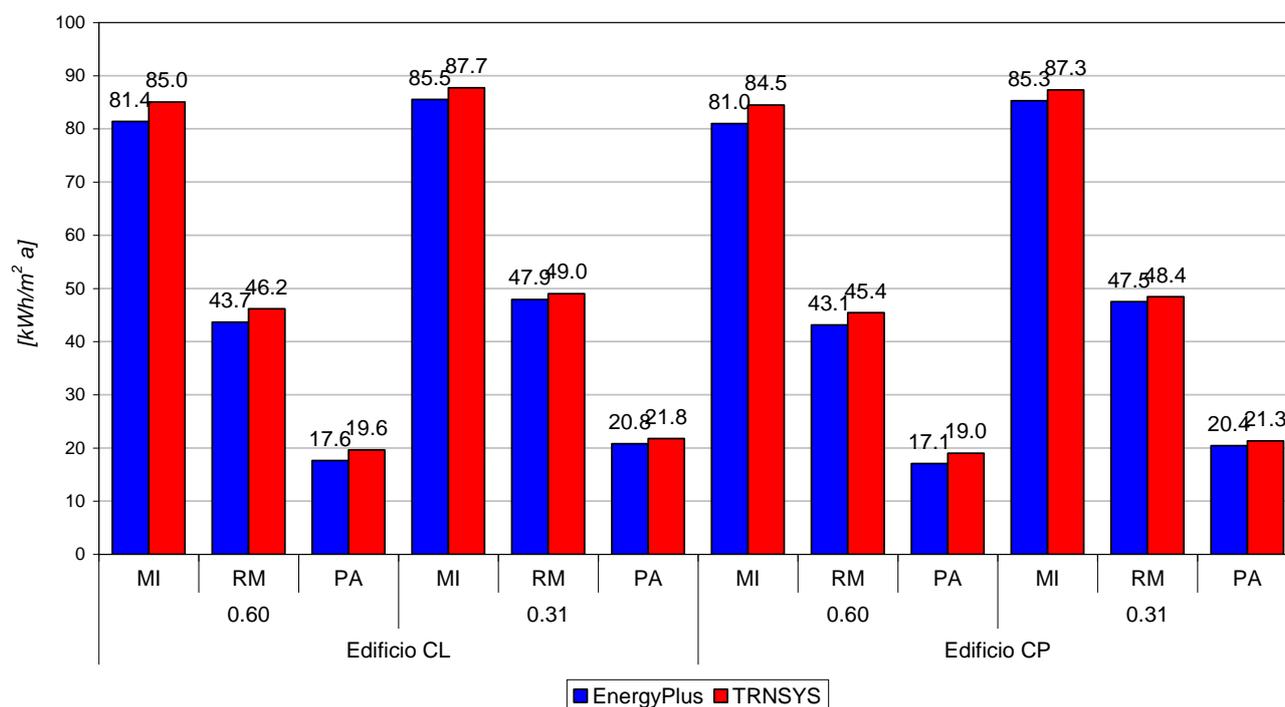


Figura 13: Fabbisogno di riscaldamento, in kWh, per l'edificio C (con elementi costruttivi leggeri e pesanti), valutato dai due software al variare del coefficiente di assorbimento delle superfici.

## FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici CP e CL

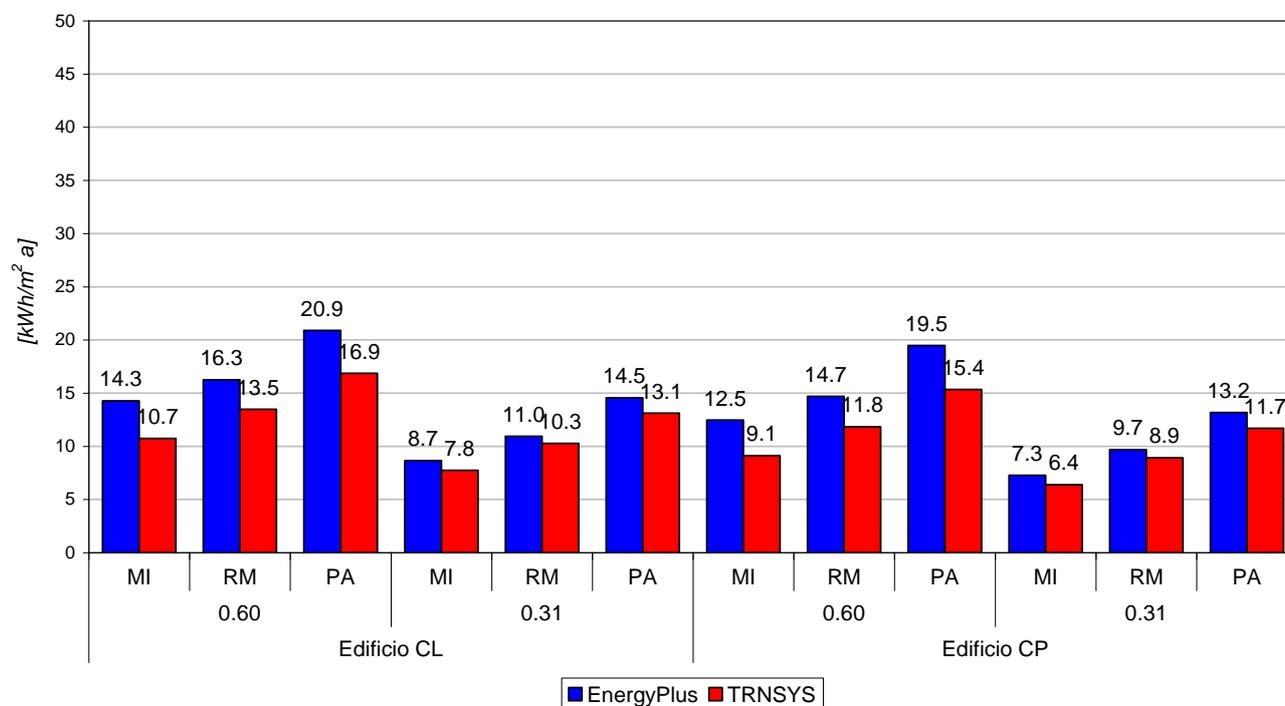


Figura 14: Fabbisogno di raffrescamento, in kWh, per l'edificio C (con elementi costruttivi leggeri e pesanti), valutato dai due software al variare del coefficiente di assorbimento delle superfici.

La scelta del coefficiente di assorbimento è quella che più influenza le differenze di valutazione da parte dei due applicativi. Se, infatti, con coefficiente 0.60 le percentuali di differenza invernali,

espresse in termini di domanda di *heating*, si attestano tra il 4% e l'11%, con coefficiente 0.31 queste si abbassano a valori compresi tra il 2% e il 5%. Ancora più importante risulta l'effetto sui fabbisogni estivi, per cui a partire da differenze, espresse in termini di domanda di *cooling*, tra il 17% e il 27% si riesce ad arrivare a differenze comprese tra il 6% e il 12%.

Sebbene i due software diano risultati più simili a fronte di coefficienti di assorbimento minori, si consiglia comunque di mantenere il valore di 0.60, che corrisponde a un valore medio più conforme alle condizioni reali del parco edilizio.

#### 4.2.4 Radiazione solare trasmessa dagli elementi trasparenti

La radiazione solare che incide sulle superfici trasparenti dell'edificio viene trasmessa all'interno in maniera differente a seconda delle caratteristiche termiche e ottiche dei vetri. A tal proposito, entrambi gli strumenti utilizzati richiedono una descrizione dettagliata del serramento, includendo le singole lastre e gli eventuali gas nelle intercapedini.

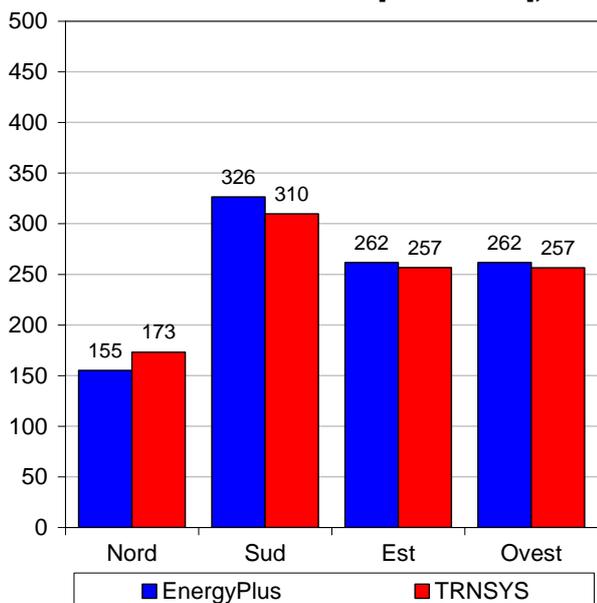
Al fine di evitare discrepanze per la diversa descrizione dei vetri nei due software, in entrambi è stata inserita la medesima stratigrafia, elaborata con il software *Window 5* fornito dal *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

Sebbene la finestra descritta sia esattamente la stessa, il fatto che i due applicativi calcolino la geometria solare in modo diverso influenza anche la valutazione della quantità di radiazione solare entrante nell'edificio: per questa ragione si è deciso di confrontare questa componente calcolata per singole finestre, diversamente orientate e in riferimento alle tre località considerate<sup>6</sup>. Sulla base del rapporto tra radiazione trasmessa e radiazione globale incidente sulla superficie, è stato anche calcolato un fattore di guadagno solare effettivo.

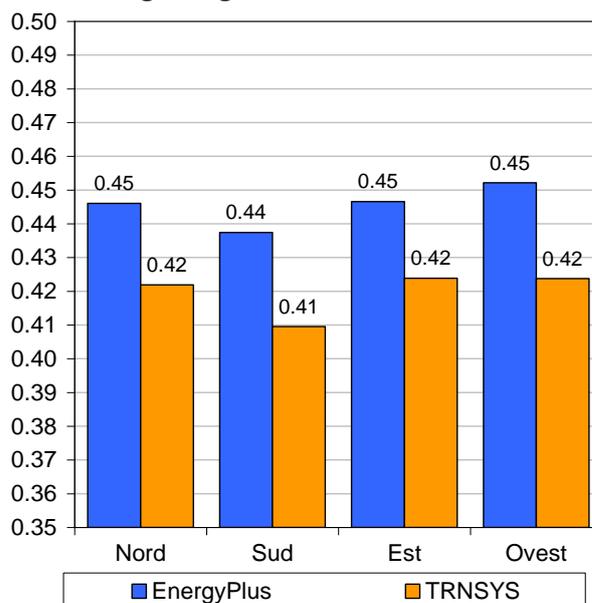
---

<sup>6</sup> Poiché l'output di EnergyPlus viene prodotto trascurando la porzione di superficie finestrata coperta dal telaio, si è deciso di imporre elementi privi di telaio al fine di evitare ulteriori discrepanze tra i due software. I risultati si ottengono implementando un edificio "modello" cubico con una sola finestra inizialmente orientata a Nord e facendo successivamente ruotare l'edificio a intervalli di 90°.

**Radiazione solare trasmessa [kWh/m<sup>2</sup>anno], Milano**

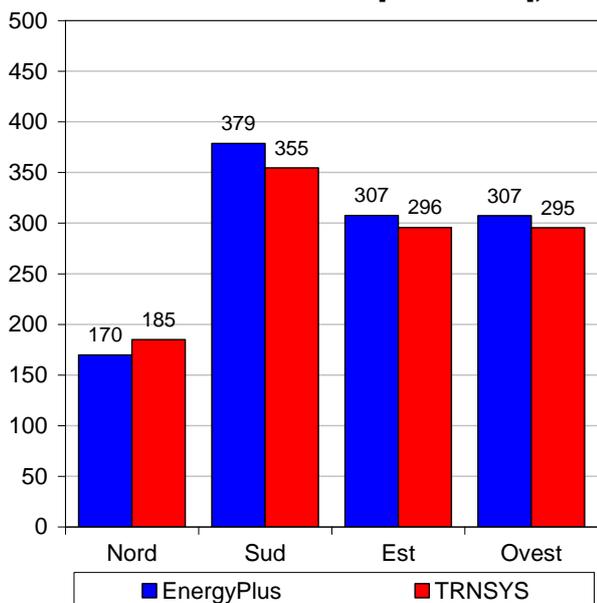


**Fattore di guadagno solare, Milano**

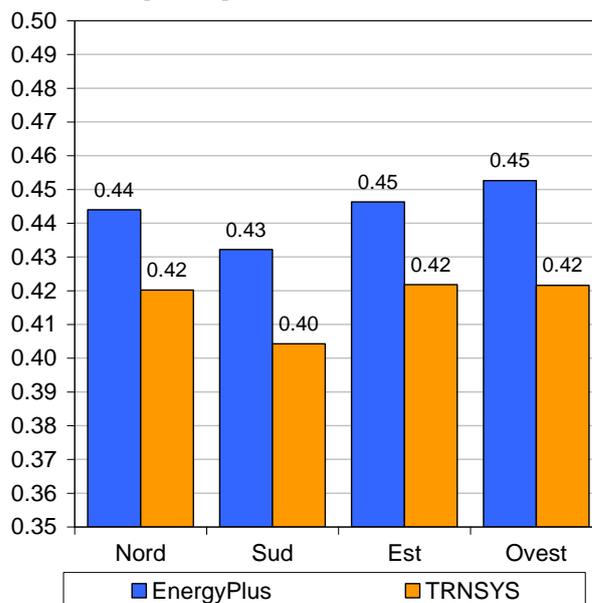


**Figura 15: Valore annuale di radiazione trasmessa dalle superfici finestrate sui diversi orientamenti (in kWh/m<sup>2</sup>) e fattore di guadagno solare equivalente, risultanti dalle simulazioni effettuate tramite i due applicativi. Città di Milano.**

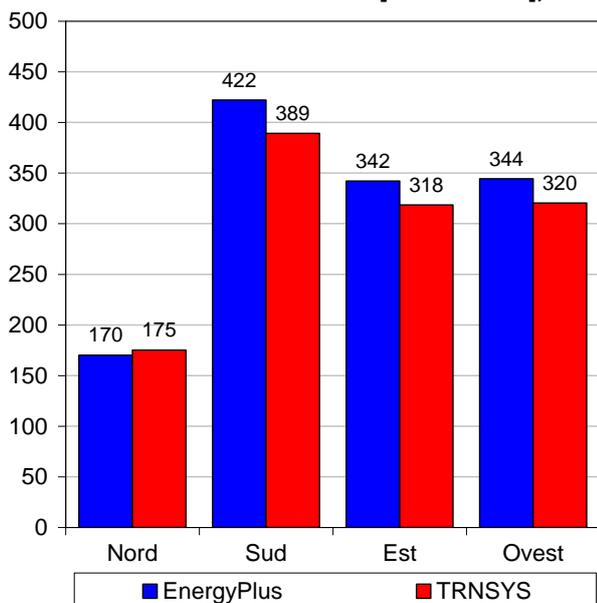
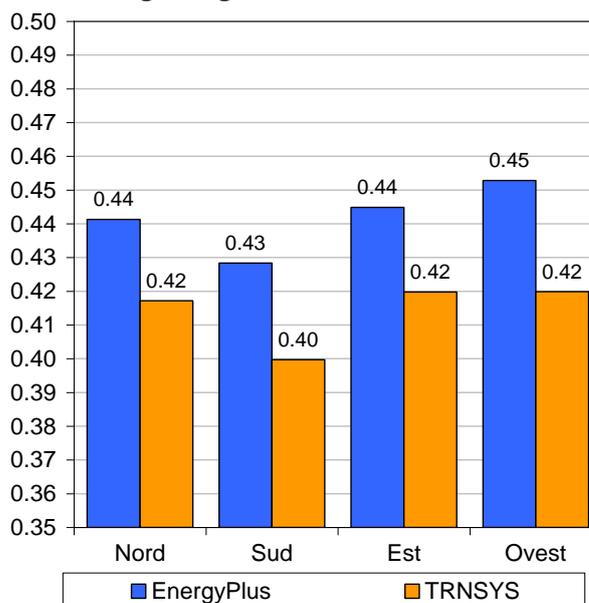
**Radiazione solare trasmessa [kWh/m<sup>2</sup>anno], Roma**



**Fattore di guadagno solare, Roma**



**Figura 16: Valore annuale di radiazione trasmessa dalle superfici finestrate sui diversi orientamenti (in kWh/m<sup>2</sup>) e fattore di guadagno solare equivalente, risultanti dalle simulazioni effettuate tramite i due applicativi. Città di Roma.**

**Radiazione solare trasmessa [kWh/m<sup>2</sup>anno], Palermo****Fattore di guadagno solare, Palermo**

**Figura 17: Valore annuale di radiazione trasmessa dalle superfici finestrate sui diversi orientamenti (in kWh/m<sup>2</sup>) e fattore di guadagno solare equivalente, risultanti dalle simulazioni effettuate tramite i due applicativi. Città di Palermo.**

E' interessante notare come, a fronte di una radiazione globale incidente sulle superfici vetrate leggermente maggiore, TRNSYS tenda a valutare una componente entrante minore, ottenendo un fattore di guadagno solare sempre più basso di quello risultante con EnergyPlus.

Da ciò si può intuire che TRNSYS tenderà a sottostimare il contributo solare rispetto ad EnergyPlus, che valuta un g del vetro più simile rispetto a quello “da catalogo”<sup>7</sup>; di conseguenza, i fabbisogni termici per riscaldamento e raffreddamento in TRNSYS saranno rispettivamente maggiori e minori. La differenza tra le componenti di radiazione solare entrante nell’edificio tramite gli elementi vetrati si attesta mediamente sul 6%.

### 4.3 Considerazioni complessive

Compatibilmente con i margini di libertà proposti dai due applicativi analizzati, le valutazioni condotte hanno permesso di definire le opzioni che consentono di ridurre al minimo le differenze tra i risultati prodotti a seguito delle simulazioni energetiche.

Le differenze tra i risultati ottenuti rimanenti, nonostante le operazioni compiute per rendere le procedure di lavoro dei due applicativi il più possibile simili, sono imputabili agli algoritmi di calcolo interni, con particolare riferimento alle funzioni di trasferimento che caratterizzano la conduzione e alla valutazione dei parametri climatici.

La tabella 3 mostra i risultati finali complessivi relativi agli edifici C versione legger (CL) e C versione pesante (CP) ottenuti modificando i parametri precedentemente commentati.

La tabella 4 riporta invece l’evoluzione dei parametri impiegati nelle valutazioni condotte nell’ultimo anno evidenziandone quelli conclusivi suggeriti anche per eventuali successive fasi di lavoro.

<sup>7</sup> g = 0.571

**Tabella 3: Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, in kWh, valutati dai due software per gli edifici CL e CP sulla base delle diverse impostazioni di simulazione, e percentuale di differenza correlata.**

Ed.	Metodo		Abs	Località	E+		Trnsys		Differenza % (E+ -Trnsys)/E+	
	Convezione	Irraggiamento			Heating kWh	Cooling kWh	Heating kWh	Cooling kWh	Heating	Cooling
CL	Dinamica	Full Exterior	0.60	Milano	123,436.05	27,626.24	139,538.36	19,046.30	-13%	31%
				Roma	60,121.92	33,805.73	80,447.15	23,535.00	-34%	30%
				Palermo	21,178.69	44,019.04	36,974.44	28,086.81	-75%	36%
	Statica	Full Interior And Exterior	0.60	Milano	124,793.31	27,610.02	139,538.36	19,046.30	-12%	31%
				Roma	61,862.18	33,786.23	80,447.15	23,535.00	-30%	30%
				Palermo	22,521.91	43,764.08	36,974.44	28,086.81	-64%	36%
Statica	Full Interior And Exterior	0.31	Milano	<b>146,504.75</b>	<b>25,682.62</b>	<b>153,044.68</b>	<b>19,346.06</b>	<b>-4%</b>	<b>25%</b>	
			Roma	<b>78,614.19</b>	<b>29,253.49</b>	<b>83,093.40</b>	<b>24,260.10</b>	<b>-6%</b>	<b>17%</b>	
			Palermo	<b>31,706.82</b>	<b>37,622.37</b>	<b>35,340.26</b>	<b>30,347.81</b>	<b>-11%</b>	<b>19%</b>	
CP	Dinamica	Full Exterior	0.60	Milano	122,576.72	24,755.51	138,697.32	15,814.62	-13%	36%
				Roma	58,963.16	31,218.11	78,775.24	20,329.77	-34%	35%
				Palermo	20,158.98	41,508.22	35,755.83	24,880.45	-77%	40%
	Statica	Full Interior And Exterior	0.60	Milano	123,908.64	24,685.44	138,697.32	15,814.62	-12%	36%
				Roma	60,708.97	31,142.41	78,775.24	20,329.77	-30%	35%
				Palermo	21,535.41	41,157.62	35,755.83	24,880.45	-66%	40%
Statica	Full Interior And Exterior	0.60	Milano	<b>145,758.09</b>	<b>22,440.25</b>	<b>152,060.26</b>	<b>16,414.29</b>	<b>-4%</b>	<b>27%</b>	
			Roma	<b>77,618.76</b>	<b>26,442.87</b>	<b>81,783.05</b>	<b>21,298.42</b>	<b>-5%</b>	<b>19%</b>	
			Palermo	<b>30,751.80</b>	<b>35,063.03</b>	<b>34,194.71</b>	<b>27,634.21</b>	<b>-11%</b>	<b>21%</b>	
Statica	Full Interior And Exterior	0.31	Milano	153,479.89	13,099.15	157,162.43	11,495.64	-2%	12%	
			Roma	85,540.29	17,454.34	87,209.32	16,048.41	-2%	8%	
			Palermo	36,799.97	23,701.26	38,390.07	21,053.49	-4%	11%	

**Tabella 4: Impostazioni utilizzate nelle precedenti valutazioni e impostazione consigliate per le future valutazioni.**

	Impostazioni delle valutazioni consegnate a settembre 2010		Impostazioni delle valutazioni consegnate a febbraio 2011		Impostazioni delle valutazioni consegnate a luglio 2011 <sup>8</sup>	
	EnergyPlus	TRNSYS	EnergyPlus	TRNSYS	EnergyPlus	TRNSYS
Time step	1 conseguenze sulla radiazione solare incidente	1	1 conseguenze sulla radiazione solare incidente	1	4	1
Elementi vetrati	medesime caratteristiche, ma vetri differenti		finestre identiche (da Window)		finestre identiche (da Window)	
Convezione	dinamica	stazionaria (adduzione)	dinamica	int.: dinamica est.: stazionaria (adduzione)	stazionaria (convezione)	stazionaria (convezione)
Irraggiamento	“full exterior”	-	“full exterior”	-	“full interior and exterior”	-
Assorbimento	0.31		0.60		0.60	

<sup>8</sup> Per ulteriori dettagli si rimanda ai capitoli 5, 6 e 7.

## 5 Simulazioni dei nuovi edifici in TRNSYS e EnergyPlus

Gli edifici rappresentativi del parco edilizio su cui si intende operare, descritti nel capitolo 3, sono stati simulati con i software TRNSYS ed EnergyPlus dapprima senza carichi interni e con profili di ventilazione costanti, e, successivamente, secondo i profili di occupazione, ventilazione e gestione descritti nel capitolo 3 e nella Deliverable B (definizione dei profili elettrici per il funzionamento di luci e apparecchiature e dei conseguenti guadagni interni).

Per la descrizione dettagliata dei risultati, si rimanda ai capitoli 6 e 7 successivi.

Dalle simulazioni si è rilevato che, sebbene la scelta della convezione stazionaria porti ad una generale minimizzazione delle differenze di valutazione tra i due software in termini di fabbisogni di *heating* e *cooling*, tale assunzione provoca in EnergyPlus risultati non sempre coerenti in termini di interpretazione delle peculiarità climatiche. Ciò si manifesta ad esempio nei risultati di fabbisogno di raffrescamento per l'edificio AL che, a Milano, attestava una domanda maggiore che a Roma in evidente contrasto con la realtà dei fatti.

Per questa ragione si è deciso di procedere ad un'analisi più dettagliata dei dati risultanti dalle simulazioni con ventilazione costante 0.50 vol/h e in assenza di carichi interni: è stato verificato che la stessa inversione di tendenza rispetto alle caratteristiche climatiche si verifica negli edifici AP e AL senza carichi. Dallo studio delle domande di picco ottenute nelle simulazioni con tutti i carichi interni inseriti, inoltre, il problema della scarsa corrispondenza tra risultati e climi sembra ripetersi in altri casi per quanto riguarda la stagione di *cooling*:

- edificio AL, con picco a Milano maggiore di quello a Roma;
- edifici BP e BL, con picco a Milano maggiore di quello a Roma;
- edifici CP e CL, con picco a Roma maggiore di quello a Palermo.

Dalle analisi condotte, è stato verificato che queste anomalie sono imputabili alla convezione stazionaria; infatti tali anomalie spariscono nel caso di convezione superficiale dinamica (come dimostrato nel capitolo 7). Tuttavia, ai fini del confronto con lo strumento di calcolo ODESSE con gli altri due adoperati, si è deciso di mantenere l'ipotesi di convezione stazionaria, poiché in questo caso le differenze di fabbisogno valutate dai due software sono minime e poiché anche in ODESSE gli scambi termici per convezione sono definiti a partire dai medesimi coefficienti fissi utilizzati nelle simulazioni con convezione stazionaria in TRSNYS e EnergyPlus.

## 6 Analisi e confronto dei risultati conseguiti con gli esiti di Odesse

Si riportano brevemente i risultati ottenuti al fine di evidenziare la variazione del comportamento degli edifici in funzione del clima, dei parametri geometrici, della gestione, delle destinazioni d'uso ecc. Si rimanda capitolo 7 per la rappresentazione dettagliata dei risultati.

Dai risultati si rileva che:

- in genere, l'introduzione dei profili di occupazione e ventilazione menzionati oltre al funzionamento delle luci e delle apparecchiature elettriche minimizza sempre le differenze di fabbisogni di *cooling* presentate dai due software;
- diversamente, le differenze di fabbisogni di *heating* aumentano nei due edifici a destinazione d'uso residenziale (A e B), mentre per l'edificio C, a destinazione d'uso terziaria, diminuiscono;
- considerando la convezione dinamica, l'introduzione dei profili di occupazione e ventilazione menzionati oltre al funzionamento delle luci e delle apparecchiature elettriche minimizza generalmente le differenze di fabbisogni di *cooling* presentate dai due software e aumenta le differenze di *heating* in tutti gli edifici;
- come già evidenziato, analizzando i risultati delle simulazioni con i profili di occupazione e ventilazione e con i carichi, le minori differenze tra i due software si ottengono con la convezione stazionaria. Considerando il fabbisogno di *heating* questo avviene per tutti e tre gli edifici, mentre per quanto riguarda il *cooling* l'attenuazione delle differenze avviene per gli edifici B e C.

Nelle successive figure si riporta una rappresentazione sinottica e sintetica, per ciascun edificio e per ciascuna località, con i valori di domanda e di picco medi ottenuti come media aritmetica dei risultati di TRNSYS ed EnergyPlus in corrispondenza dell'opzione "convezione stazionaria, con carichi". Tali valori possono essere considerati come un buon riferimento per la comparazione con i risultati forniti da ENEA ottenuti con Odesse (vedere tabella 4). Questi ultimi sono tuttavia da considerarsi ancora di carattere preliminare; ulteriori valutazioni permetteranno di ridurre le grandi differenze rilevate (in special modo per la domanda di *heating* dell'edificio A) o, in alternativa, di motivarne l'origine.

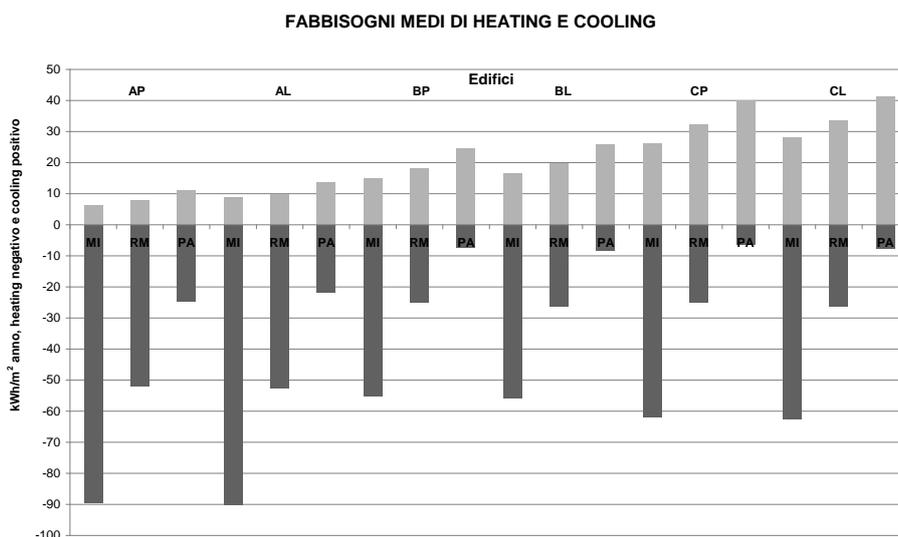


Figura 18: Fabbisogni medi rilevati (valori indicativi per la comparazione con Odesse)

PICCHI MEDI DI HEATING E COOLING

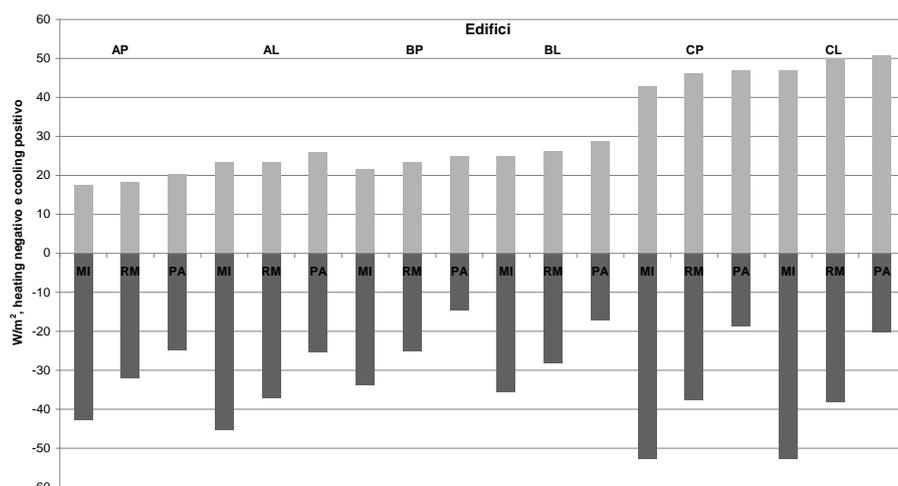


Figura 19: Picchi medi rilevati (valori indicativi per la comparazione con Odesse)

Tabella 5: Primi risultati ottenuti con Odesse; domande di heating e cooling

		Heating kWh/anno	Cooling kWh/anno	Heating kWh/m <sup>2</sup> anno	Cooling kWh/m <sup>2</sup> anno
<b>Edificio AP</b>	Milano	86'221.78	3'164.30	431.11	15.82
	Roma	68'742.92	4'042.89	343.71	20.21
	Palermo	42'945.87	4'717.32	214.73	23.59
<b>Edificio AL</b>	Milano	83'619.28	2'972.02	418.10	14.86
	Roma	66'497.31	3'973.20	332.49	19.87
	Palermo	43'679.81	4'616.18	218.40	23.08
<b>Edificio BP</b>	Milano	206'121.52	76'498.53	114.51	42.50
	Roma	155'391.72	85'808.53	86.33	47.67
	Palermo	95'276.16	105'850.68	52.93	58.81
<b>Edificio BL</b>	Milano	207'414.96	74'233.19	115.23	41.24
	Roma	155'378.30	83'532.36	86.32	46.41
	Palermo	95'290.61	102'628.15	52.94	57.02
<b>Edificio CP</b>	Milano	195'187.13	108'768.20	108.44	60.43
	Roma	138'096.31	121'280.96	76.72	67.38
	Palermo	80'702.52	145'122.92	44.83	80.62
<b>Edificio CL</b>	Milano	196'370.17	108'966.39	109.09	60.54
	Roma	138'198.06	121'726.34	76.78	67.63
	Palermo	80'755.68	144'794.06	44.86	80.44

Le successive tabelle 5 e 6 riportano un quadro sintetico dei risultati ottenuti mettendo anche in evidenza le differenze tra i risultati ottenuti con i due applicativi. In particolare si fa riferimento alle domande e alle potenze di picco rilevate in tutti i casi considerati (con carichi significa con tutti i carichi interni inseriti; senza carichi significa senza nessun carico interno).

**Tabella 6: Simulazioni edifici senza carichi.**

			Heating						Cooling					
			EnergyPlus			TRNSYS			EnergyPlus			TRNSYS		
			Fabbisogno kWh	kWh/m <sup>2</sup>	Picco kW	Fabbisogno kWh	kWh/m <sup>2</sup>	Picco kW	Fabbisogno kWh	kWh/m <sup>2</sup>	Picco kW	Fabbisogno kWh	kWh/m <sup>2</sup>	Picco kW
Edificio AP	Conv. Stazionaria	Milano	17'395.41	86.98	7.61	18'077.46	90.39	7.73	584.33	2.92	2.25	277.11	1.39	2.02
		Roma	11'294.94	56.47	7.46	11'021.66	55.11	6.22	480.87	2.40	2.05	507.49	2.54	2.30
		Palermo	6'073.56	30.37	7.62	5'704.86	28.52	6.14	733.52	3.67	2.40	865.35	4.33	2.70
	Conv. Dinamica	Milano	15'901.44	79.51	7.06	18'103.86	90.52	7.98	398.14	1.99	1.89	429.35	2.15	2.17
		Roma	9'421.13	47.11	5.08	11'441.60	57.21	6.61	772.33	3.86	2.18	844.81	4.22	2.42
		Palermo	4'661.18	23.31	5.26	6'017.00	30.08	7.39	1'326.94	6.63	2.52	1'384.94	6.92	2.80
Edificio AL	Conv. Stazionaria	Milano	17'364.14	86.82	7.98	18'148.32	90.74	8.13	964.07	4.82	3.43	618.99	3.09	3.14
		Roma	11'234.22	56.17	8.93	11'065.08	55.33	6.74	830.62	4.15	3.05	856.68	4.28	3.38
		Palermo	5'955.88	29.78	8.49	5'676.42	28.38	5.95	1'014.85	5.07	3.88	1'154.65	5.77	3.93
	Conv. Dinamica	Milano	15'915.18	79.58	7.49	18'099.33	90.50	8.51	723.72	3.62	2.90	769.16	3.85	3.44
		Roma	9'437.82	47.19	7.48	11'524.61	57.62	7.58	1'107.36	5.54	3.17	1'175.03	5.88	3.61
		Palermo	4'611.55	23.06	6.80	5'999.38	30.00	7.18	1'668.23	8.34	4.11	1'698.84	8.49	4.31
Edificio BP	Conv. Stazionaria	Milano	118'008.24	65.56	56.12	121'728.20	67.63	55.26	6'385.05	3.55	20.99	3'972.60	2.21	18.82
		Roma	70'011.52	38.90	41.68	70'800.84	39.33	40.83	7'286.61	4.05	21.67	6'146.01	3.41	22.21
		Palermo	33'221.25	18.46	39.64	33'731.76	18.74	34.37	9'717.18	5.40	23.16	8'659.09	4.81	23.77
	Conv. Dinamica	Milano	108'948.60	60.53	52.74	121'227.24	67.35	56.41	5'601.16	3.11	19.69	3'446.30	1.91	17.41
		Roma	60'673.47	33.71	38.29	74'062.39	41.15	42.05	8'845.33	4.91	22.02	5'892.51	3.27	20.65
		Palermo	26'957.23	14.98	35.51	36'547.18	20.30	40.95	12'719.73	7.07	23.54	8'529.41	4.74	22.68
Edificio BL	Conv. Stazionaria	Milano	118'150.15	65.64	58.00	122'245.34	67.91	57.30	8'429.18	4.68	26.33	5'738.85	3.19	24.65
		Roma	70'112.31	38.95	47.61	71'324.61	39.62	44.54	8'967.42	4.98	26.21	7'857.01	4.37	27.65
		Palermo	33'105.06	18.39	45.02	33'902.26	18.83	36.50	11'397.69	6.33	30.66	10'127.17	5.63	29.69
	Conv. Dinamica	Milano	109'250.59	60.69	54.91	121'308.82	67.39	59.05	7'380.33	4.10	24.21	5'152.36	2.86	24.18
		Roma	60'976.56	33.88	45.17	74'655.36	41.48	46.42	10'386.08	5.77	26.41	7'531.34	4.18	26.78
		Palermo	26'990.64	14.99	33.22	36'688.66	20.38	43.01	14'552.82	8.08	31.22	10'183.03	5.66	30.40
Edificio CP	Conv. Stazionaria	Milano	145'758.09	80.98	75.06	152'060.26	84.48	74.00	22'440.25	12.47	43.72	16'414.29	9.12	39.25
		Roma	77'618.76	43.12	55.91	81'783.05	45.44	55.09	26'442.87	14.69	45.30	21'298.42	11.83	43.60
		Palermo	30'751.80	17.08	35.75	34'194.71	19.00	35.23	35'063.03	19.48	48.48	27'634.21	15.35	44.93
	Conv. Dinamica	Milano	123'908.64	68.84	67.34	138'697.32	77.05	69.60	24'685.44	13.71	44.38	15'814.62	8.79	41.44
		Roma	60'708.97	33.73	49.32	78'775.24	43.76	53.07	31'142.41	17.30	45.82	20'329.77	11.29	44.28
		Palermo	21'535.41	11.96	30.27	35'755.83	19.86	40.20	41'157.62	22.87	52.22	24'880.45	13.82	45.75
Edificio CL	Conv. Stazionaria	Milano	146'504.75	81.39	76.78	153'044.68	85.02	76.07	25'682.62	14.27	49.29	19'346.06	10.75	45.94
		Roma	78'614.19	43.67	58.44	83'093.40	46.16	58.11	29'253.49	16.25	50.64	24'260.10	13.48	50.70
		Palermo	31'706.82	17.61	39.05	35'340.26	19.63	38.56	37'622.37	20.90	55.68	30'347.81	16.86	52.45
	Conv. Dinamica	Milano	124'793.31	69.33	69.33	139'538.36	77.52	72.19	27'610.02	15.34	49.91	19'046.30	10.58	49.72
		Roma	61'862.18	34.37	52.14	80'447.15	44.69	56.39	33'786.23	18.77	51.13	23'535.00	13.07	52.37
		Palermo	22'521.91	12.51	34.44	36'974.44	20.54	42.34	43'764.08	24.31	59.81	28'086.81	15.60	56.12

**Tabella 7: Simulazioni edifici con carichi.**

			Heating						Cooling					
			EnergyPlus			TRNSYS			EnergyPlus			TRNSYS		
			Fabbisogno kWh	kWh/m <sup>2</sup>	Picco kW									
Edificio AP	Conv. Stazionaria	Milano	17'692.65	88.46	8.60	18'168.85	90.84	8.58	1'485.91	7.43	3.61	1'069.24	5.35	3.39
		Roma	10'578.03	52.89	6.48	10'242.15	51.21	6.36	1'551.17	7.76	3.46	1'626.28	8.13	3.82
		Palermo	5'108.15	25.54	5.62	4'734.44	23.67	4.32	2'117.21	10.59	3.93	2'373.03	11.87	4.17
	Conv. Dinamica	Milano	16'220.74	81.10	8.05	18'860.85	94.30	8.81	1'263.18	6.32	3.29	1'258.53	6.29	3.51
		Roma	8'799.68	44.00	5.85	10'720.60	53.60	6.62	1'976.46	9.88	3.53	2'024.06	10.12	3.89
		Palermo	3'803.01	19.02	3.60	5'102.94	25.51	5.10	3'048.15	15.24	4.06	3'038.38	15.19	4.28
Edificio AL	Conv. Stazionaria	Milano	17'742.87	88.71	9.08	18'302.96	91.51	9.10	2'024.62	10.12	4.95	1'522.63	7.61	4.43
		Roma	10'617.26	53.09	7.46	10'390.38	51.95	7.37	1'968.08	9.84	4.59	2'021.51	10.11	4.76
		Palermo	3'917.63	19.59	5.50	4'811.45	24.06	4.69	2'647.55	13.24	4.88	2'783.12	13.92	5.50
	Conv. Dinamica	Milano	16'313.96	81.57	8.57	19'032.57	95.16	9.45	1'721.32	8.61	4.45	1'714.54	8.57	4.76
		Roma	8'904.45	44.52	6.83	10'902.34	54.51	7.67	2'413.45	12.07	4.66	2'443.17	12.22	4.90
		Palermo	2'708.53	13.54	3.47	5'189.42	25.95	5.19	3'704.57	18.52	5.13	3'416.69	17.08	5.68
Edificio BP	Conv. Stazionaria	Milano	100'179.77	55.66	62.30	98'164.07	54.54	59.69	27'908.83	15.50	40.39	25'353.33	14.09	37.84
		Roma	47'056.45	26.14	46.18	43'587.17	24.22	44.13	32'183.04	17.88	40.26	33'157.20	18.42	44.01
		Palermo	14'429.37	8.02	27.24	12'306.68	6.84	25.95	43'431.97	24.13	44.45	45'182.18	25.10	45.35
	Conv. Dinamica	Milano	91'531.66	50.85	58.87	105'324.28	58.51	61.53	27'575.20	15.32	38.85	21'137.25	11.74	35.92
		Roma	39'257.65	21.81	42.52	50'526.09	28.07	45.81	36'118.42	20.07	40.35	29'044.75	16.14	41.36
		Palermo	10'322.18	5.73	23.24	17'553.46	9.75	27.01	49'625.77	27.57	44.66	40'018.78	22.23	43.48
Edificio BL	Conv. Stazionaria	Milano	101'346.84	56.30	65.72	99'630.70	55.35	63.14	31'187.93	17.33	46.83	28'276.69	15.71	42.79
		Roma	48'676.18	27.04	51.66	45'594.05	25.33	49.81	34'850.15	19.36	45.12	35'728.29	19.85	49.81
		Palermo	15'962.12	8.87	31.60	14'064.43	7.81	30.06	45'663.40	25.37	50.97	47'272.26	26.26	52.74
	Conv. Dinamica	Milano	92'695.65	51.50	62.30	106'855.72	59.36	65.59	30'421.73	16.90	44.82	23'961.86	13.31	42.24
		Roma	40'764.58	22.65	47.57	52'580.51	29.21	51.98	38'622.90	21.46	44.88	31'713.30	17.62	46.73
		Palermo	11'668.87	6.48	28.61	19'204.89	10.67	32.51	51'891.00	28.83	51.09	42'223.55	23.46	51.72
Edificio CP	Conv. Stazionaria	Milano	110'128.21	61.18	97.90	112'624.06	62.57	92.36	50'085.29	27.83	79.39	44'392.89	24.66	74.96
		Roma	44'881.47	24.93	69.74	45'596.35	25.33	66.11	59'601.90	33.11	84.25	55'931.86	31.07	82.11
		Palermo	11'462.65	6.37	34.01	12'079.27	6.71	33.15	75'013.53	41.67	83.79	68'630.42	38.13	84.95
	Conv. Dinamica	Milano	88'850.92	49.36	88.02	119'570.12	66.43	94.59	55'463.84	30.81	80.65	33'803.40	18.78	72.15
		Roma	30'674.52	17.04	61.79	52'777.39	29.32	68.31	69'072.44	38.37	85.27	45'044.15	25.02	80.00
		Palermo	5'425.37	3.01	27.58	17'607.65	9.78	35.04	86'198.58	47.89	86.01	55'730.19	30.96	82.50
Edificio CL	Conv. Stazionaria	Milano	111'539.68	61.97	97.71	114'264.70	63.48	92.73	53'231.16	29.57	86.21	47'569.11	26.43	82.66
		Roma	46'792.21	26.00	70.09	47'882.10	26.60	67.30	62'374.09	34.65	90.47	58'780.11	32.66	89.99
		Palermo	13'231.02	7.35	37.35	14'132.69	7.85	36.14	77'269.02	42.93	90.31	70'922.31	39.40	92.78
	Conv. Dinamica	Milano	90'376.75	50.21	88.83	121'347.73	67.42	95.28	58'166.82	32.31	87.58	37'427.73	20.79	81.20
		Roma	32'337.43	17.97	63.16	55'404.42	30.78	69.78	71'436.11	39.69	91.77	48'360.91	26.87	89.66
		Palermo	6'879.88	3.82	32.42	19'743.49	10.97	38.98	88'298.91	49.05	92.73	58'747.60	32.64	91.43

## **7 Rappresentazione dettagliata dei risultati delle simulazioni**

Sulla base di quanto descritto nei capitoli precedenti, per i tre edifici-tipo analizzati nelle due versioni pesante e leggera e per le tre località climatiche rappresentative scelte, vengono riportati nei grafici successivi i risultati delle simulazioni condotte in termini di domanda e di potenza di picco di *heating* e *cooling*, sempre per unità di superficie.

Si riportano inoltre valutazioni di approfondimento riguardano i fenomeni convettivi e i profili di ventilazione e gestione dell'edificio.

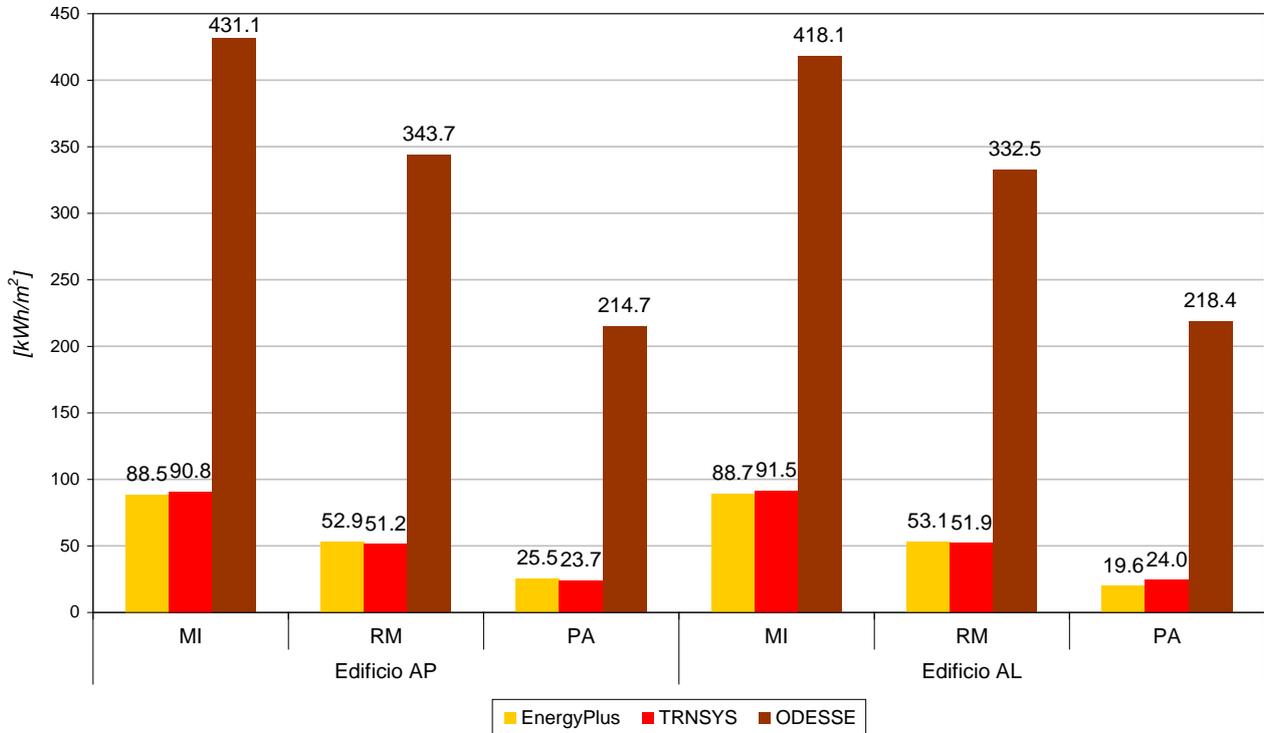
Tali risultati sono disponibili per le simulazioni effettuate dal gruppo BEST con gli strumenti TRNSYS ed EnergyPlus; mentre, come già anticipato, rispetto alle valutazioni condotte da ENEA con lo strumento Odesse (modulo edificio monozona), al momento è stato possibile analizzare solo i risultati, ancora di carattere preliminare, in termini di domanda e di *heating* e *cooling*.

Ulteriori valutazioni permetteranno inoltre di arricchire il confronto con Odesse anche in relazione alle potenze di picco e ad altri parametri di interesse.

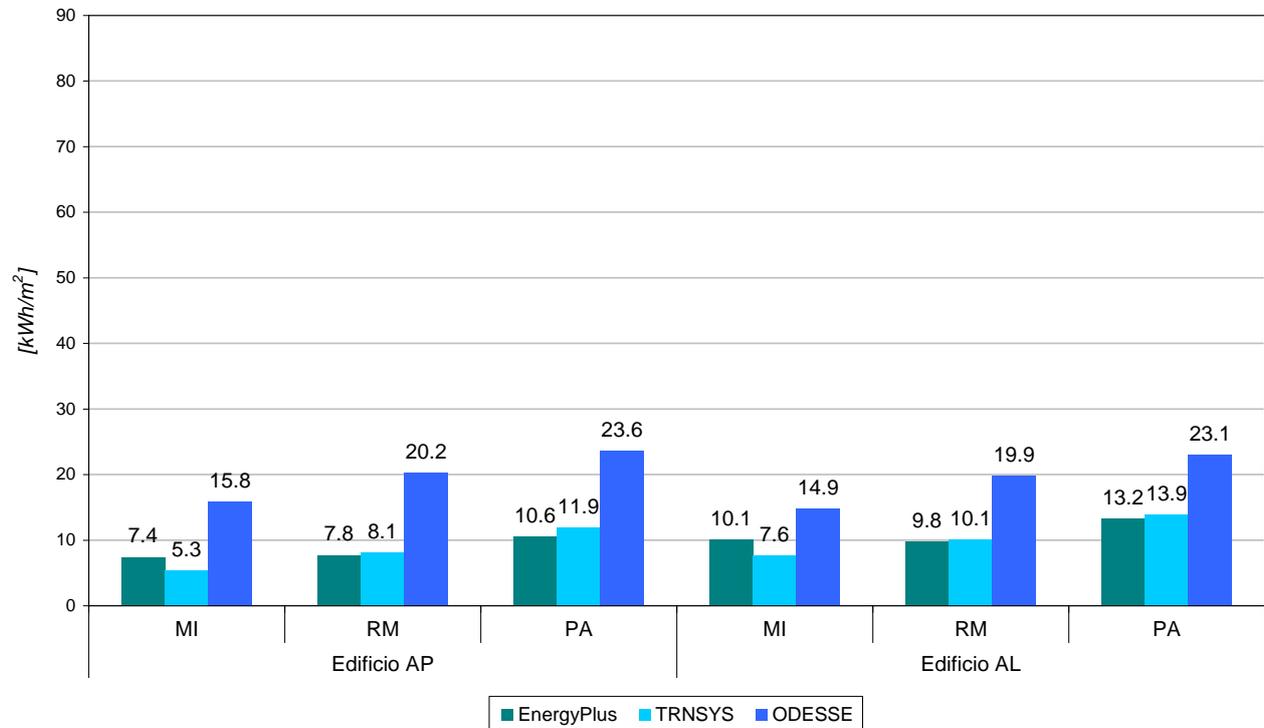
## 7.1 Domanda termica

### Edifici AP e AL

FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici AP e AL

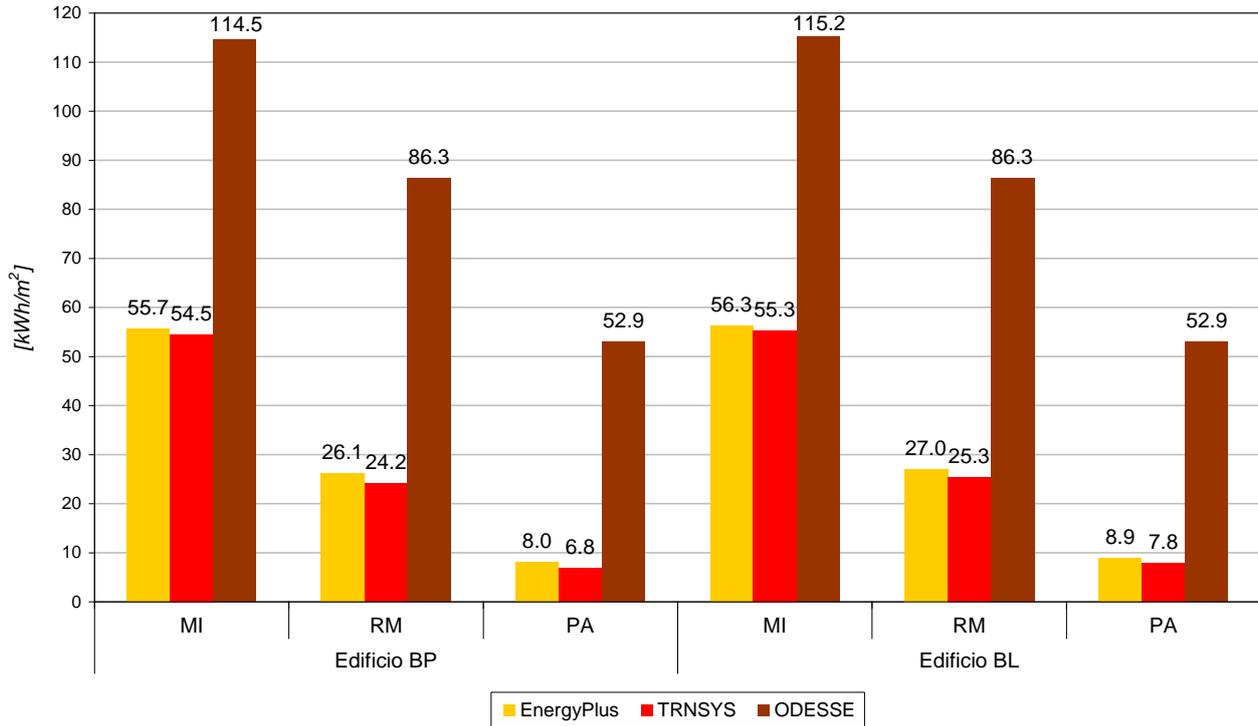


FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edificio AP e AL

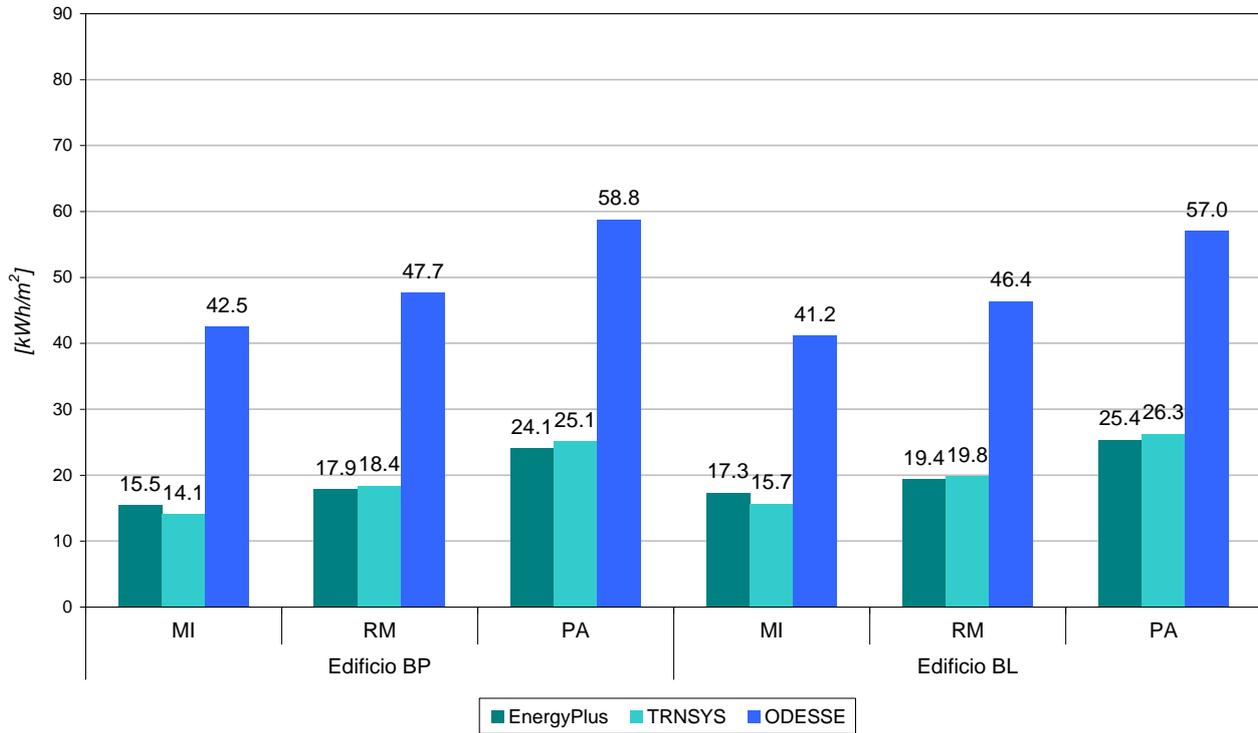


## Edifici BP e BL

### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici BP e BL

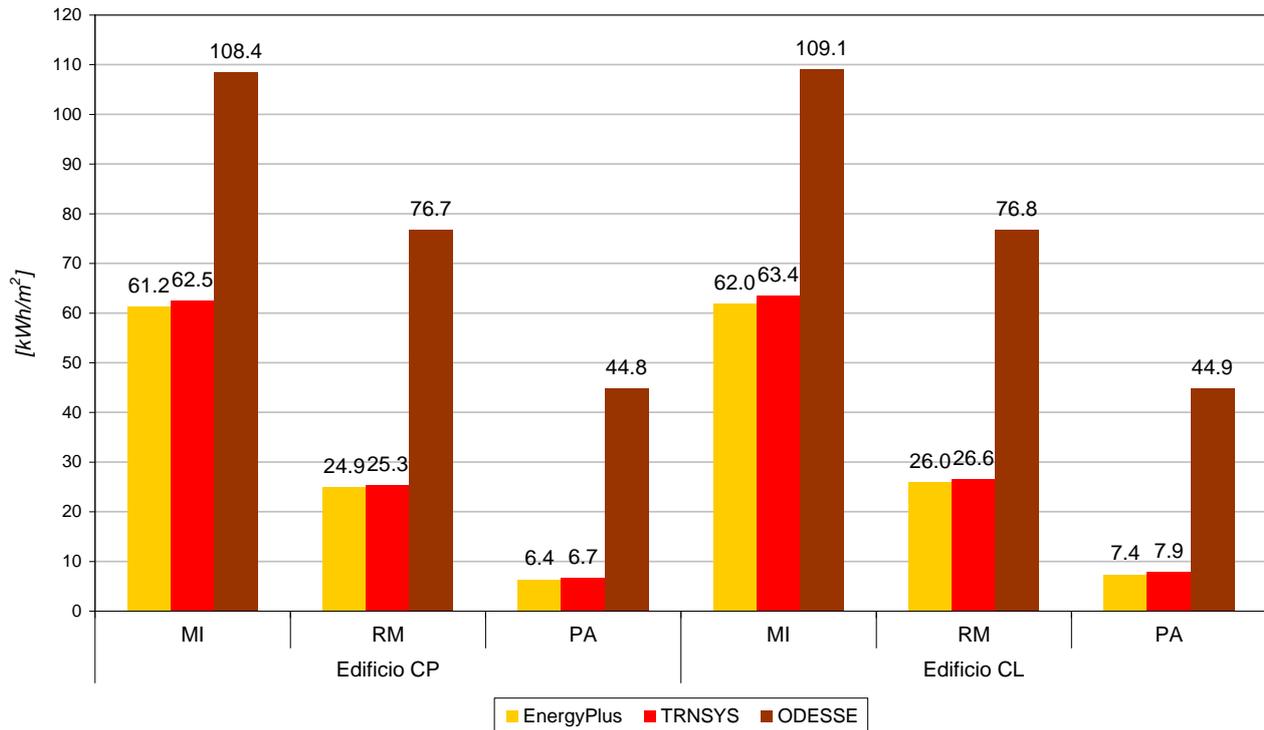


### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici BP e BL

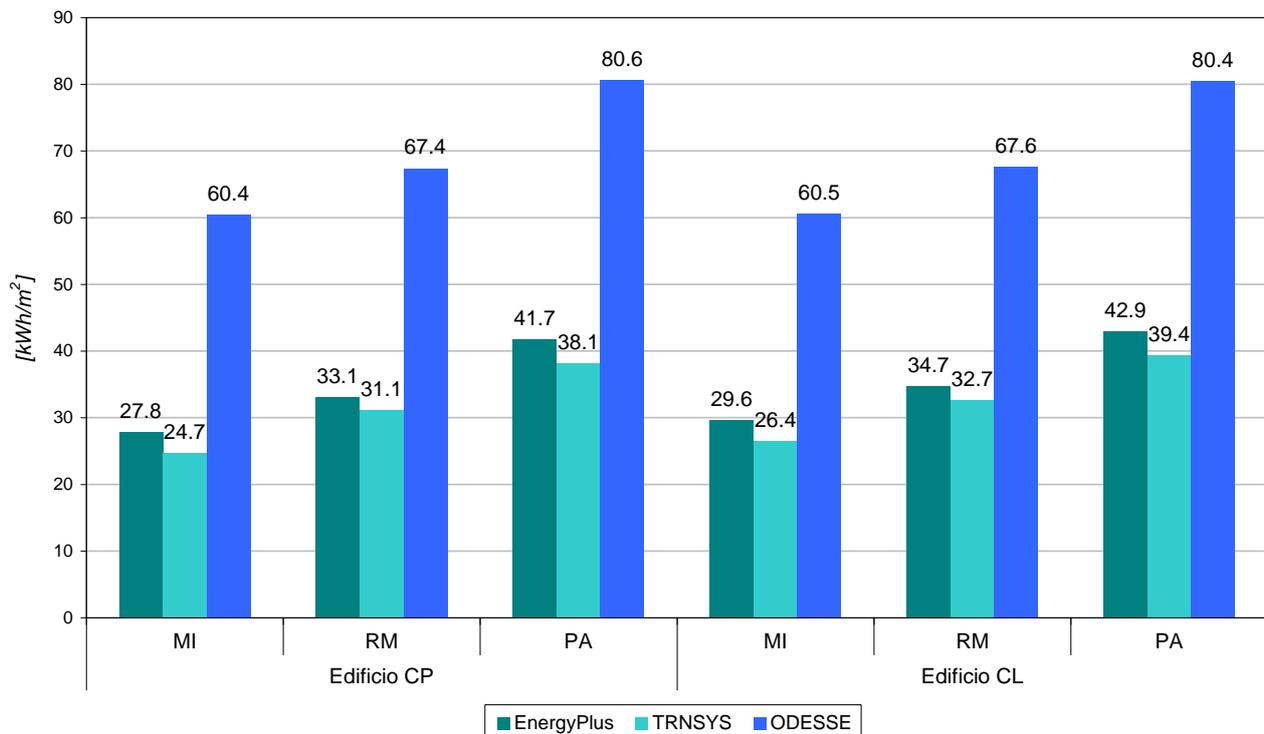


## Edifici CP e CL

### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici CP e CL



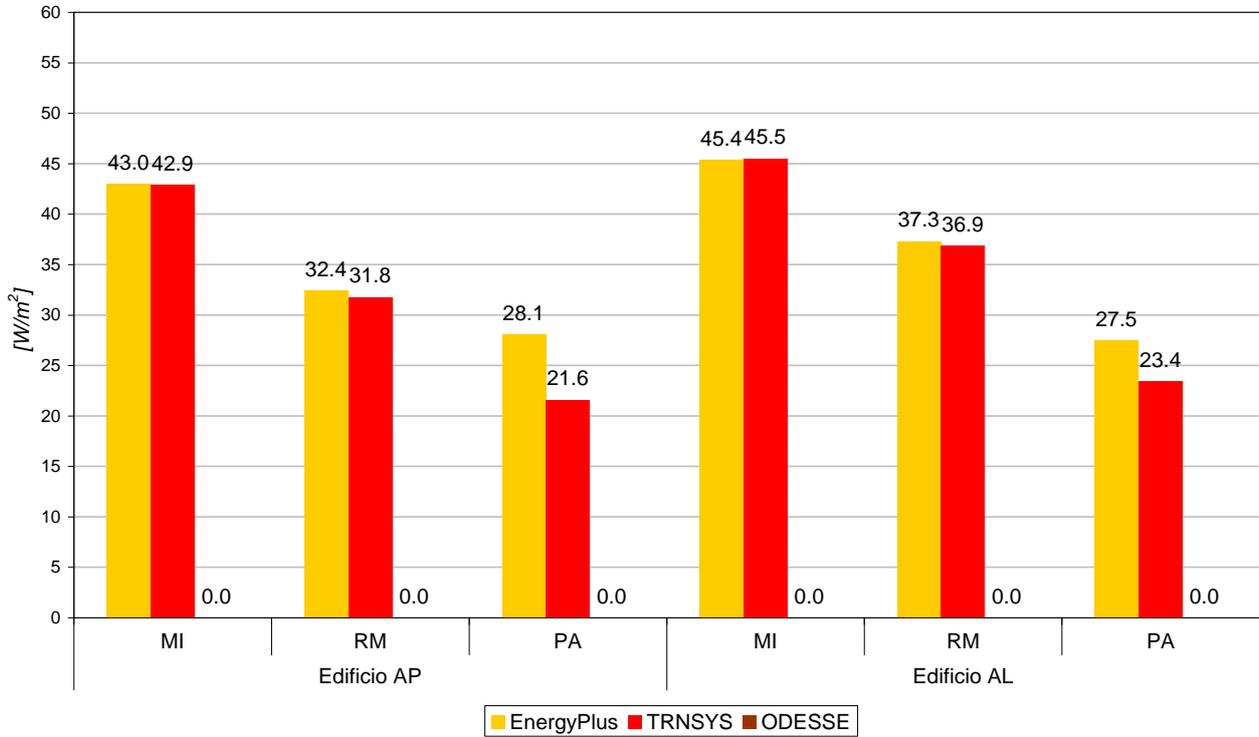
### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici CP e CL



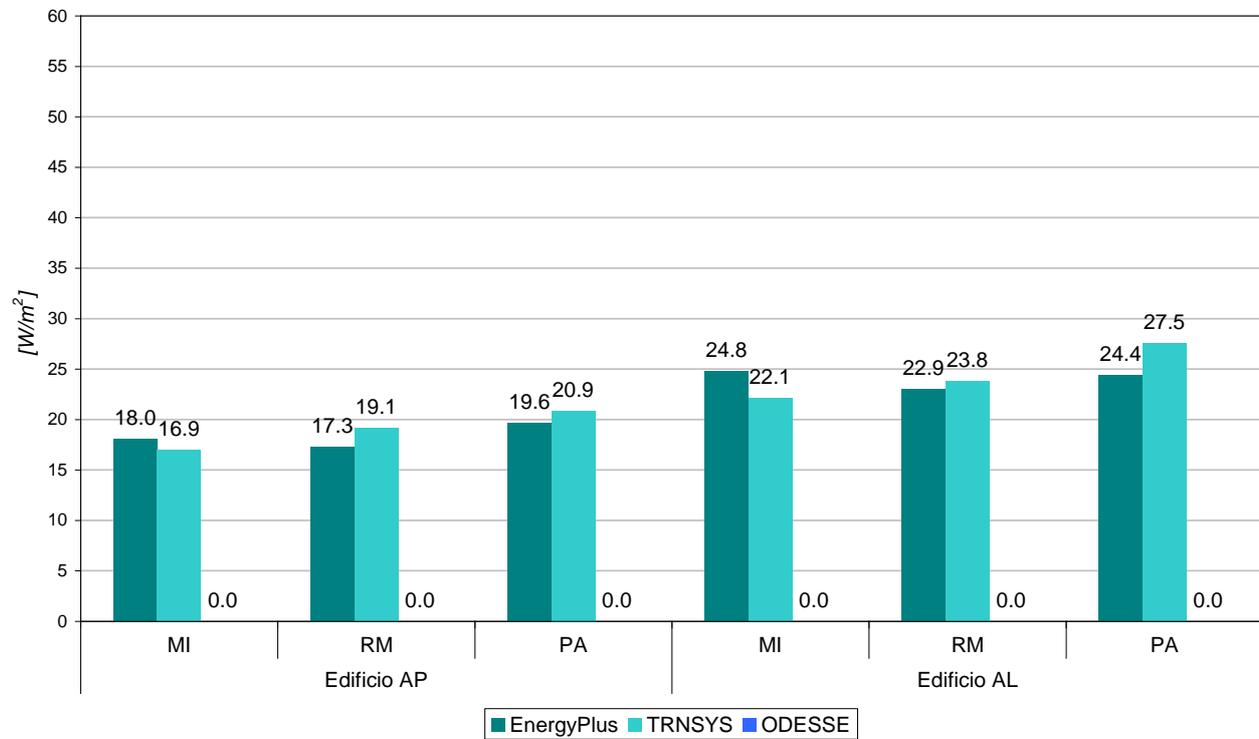
## 7.2 Potenze di picco

### Edifici AP e AL

POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici AP e AL

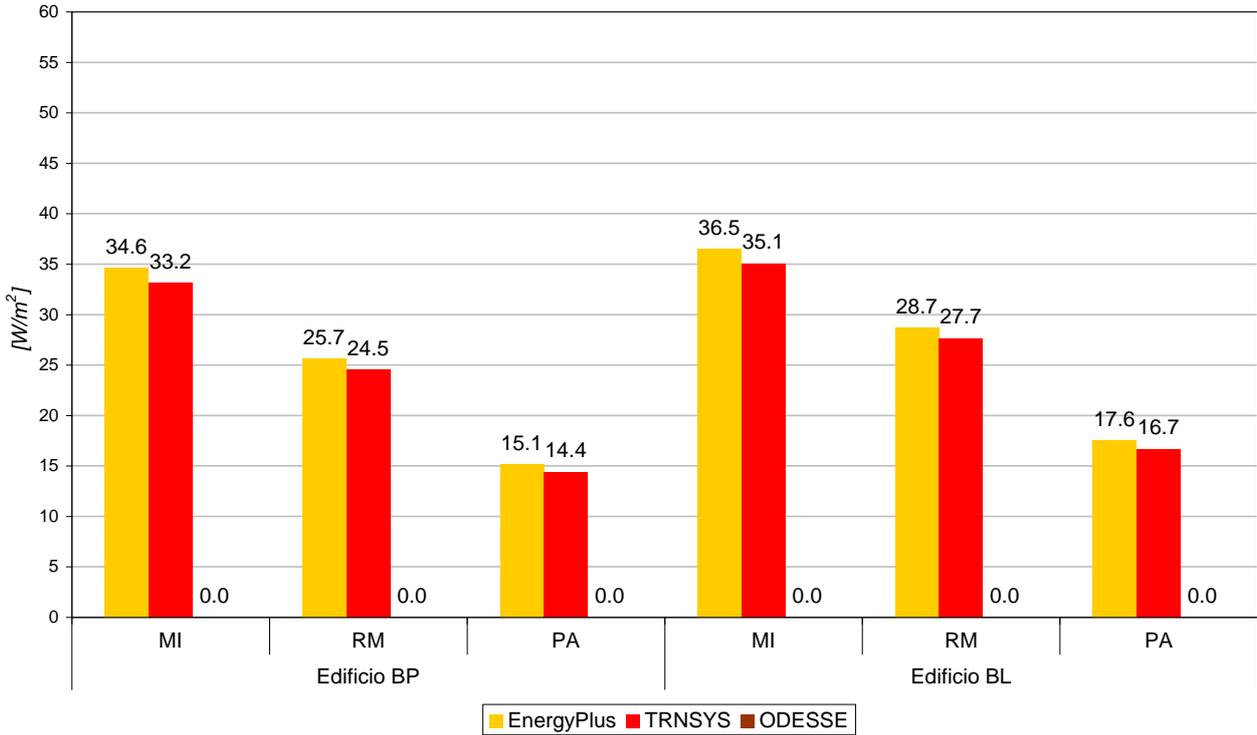


POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici AP e AL

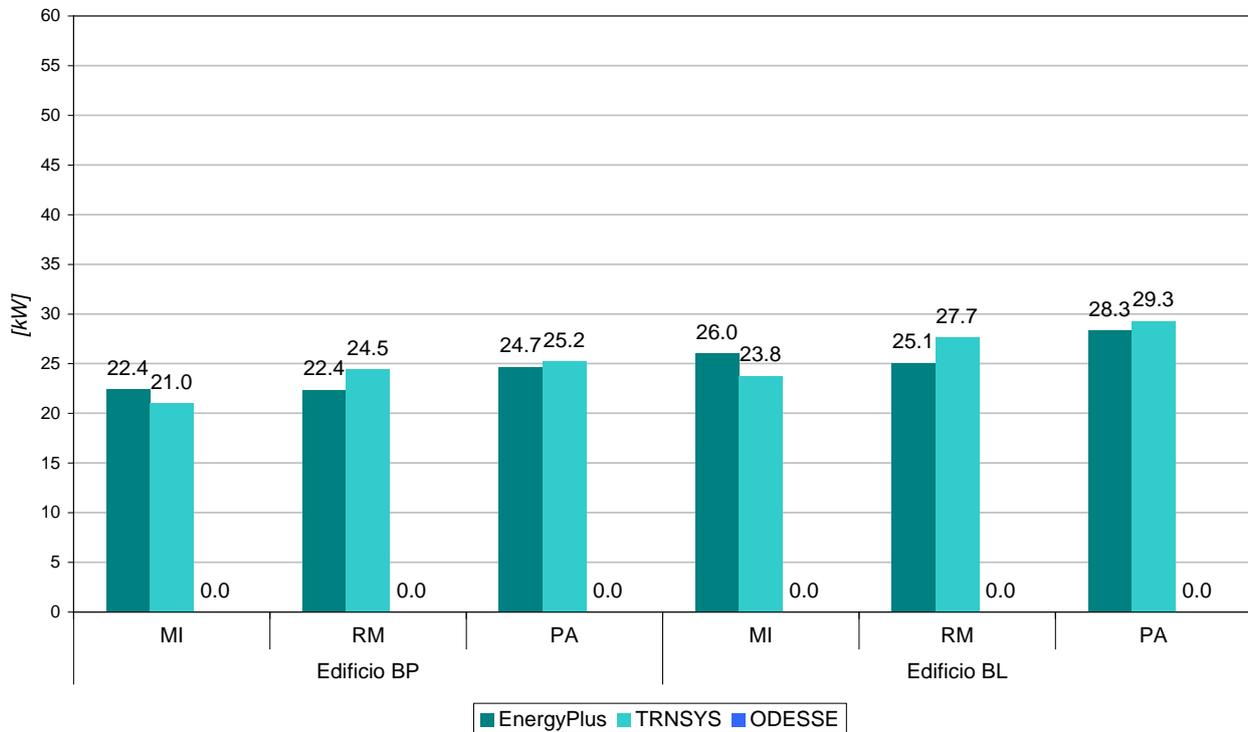


## Edifici BP e BL

POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici BP e BL

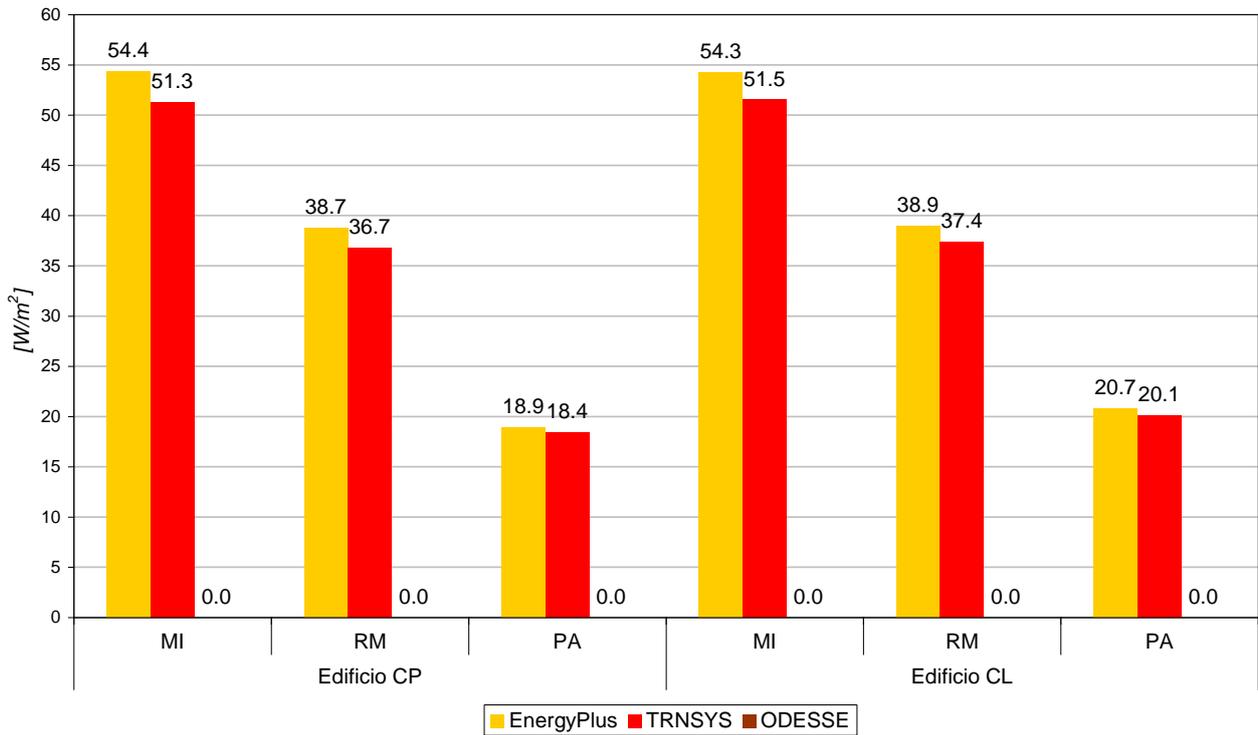


POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici BP e BL

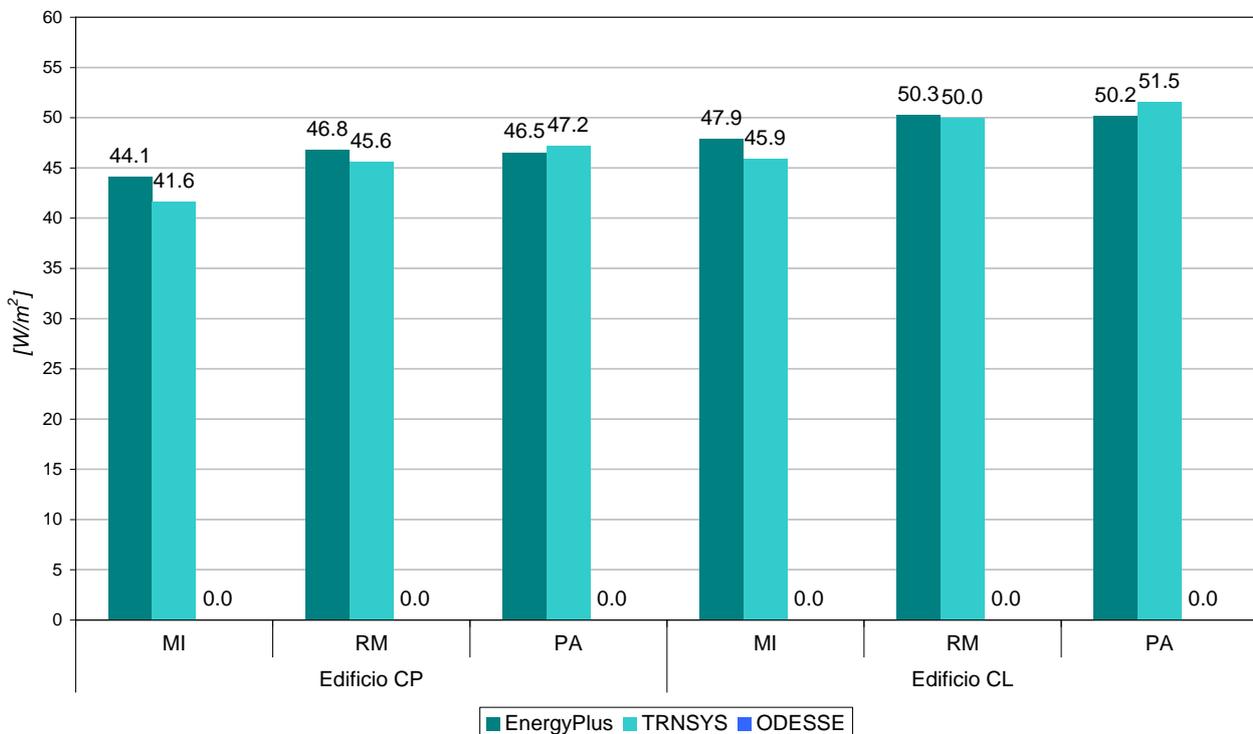


## Edifici CP e CL

POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici CP e CL



POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici CP e CL



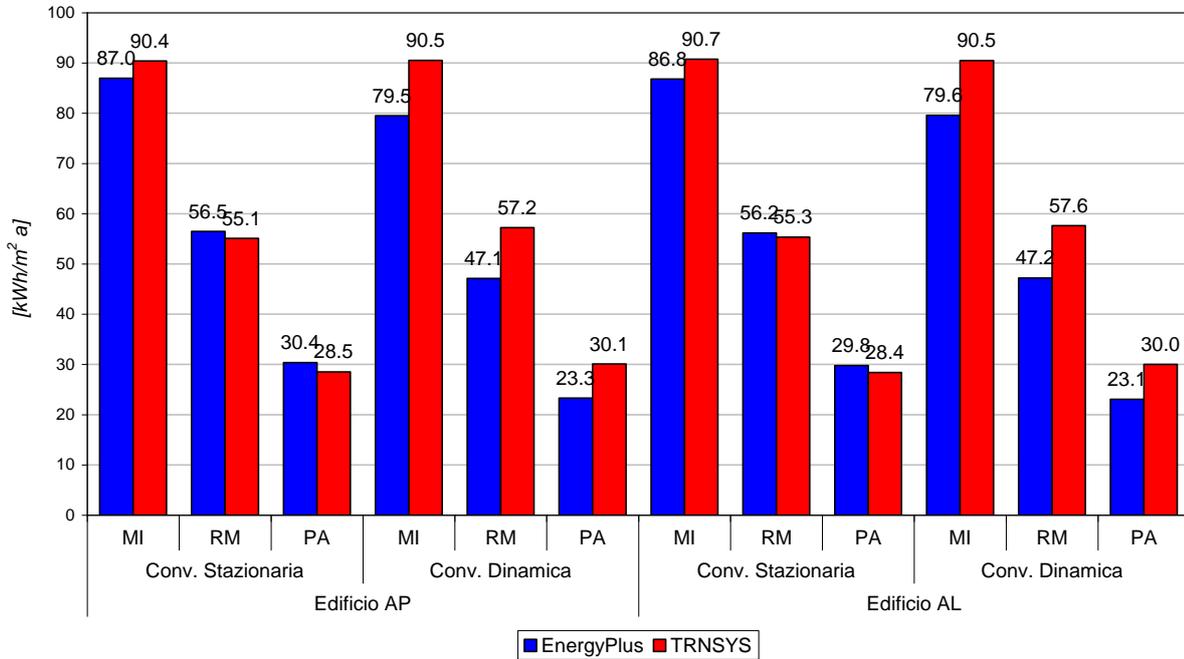
## 7.3 Approfondimento relativo al metodo di calcolo della convezione

### 7.3.1 Simulazioni condotte con ventilazione costante pari a 0.50 vol/h e senza carichi termici interni

#### Edifici AP e AL

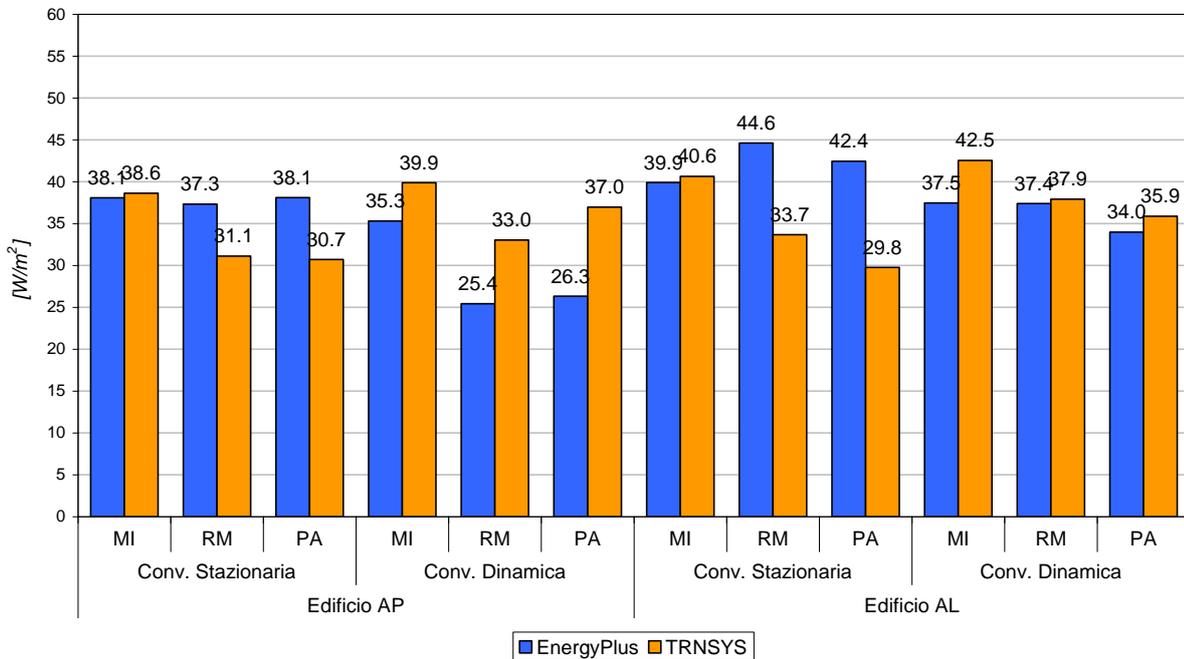
##### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici AP e AL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni



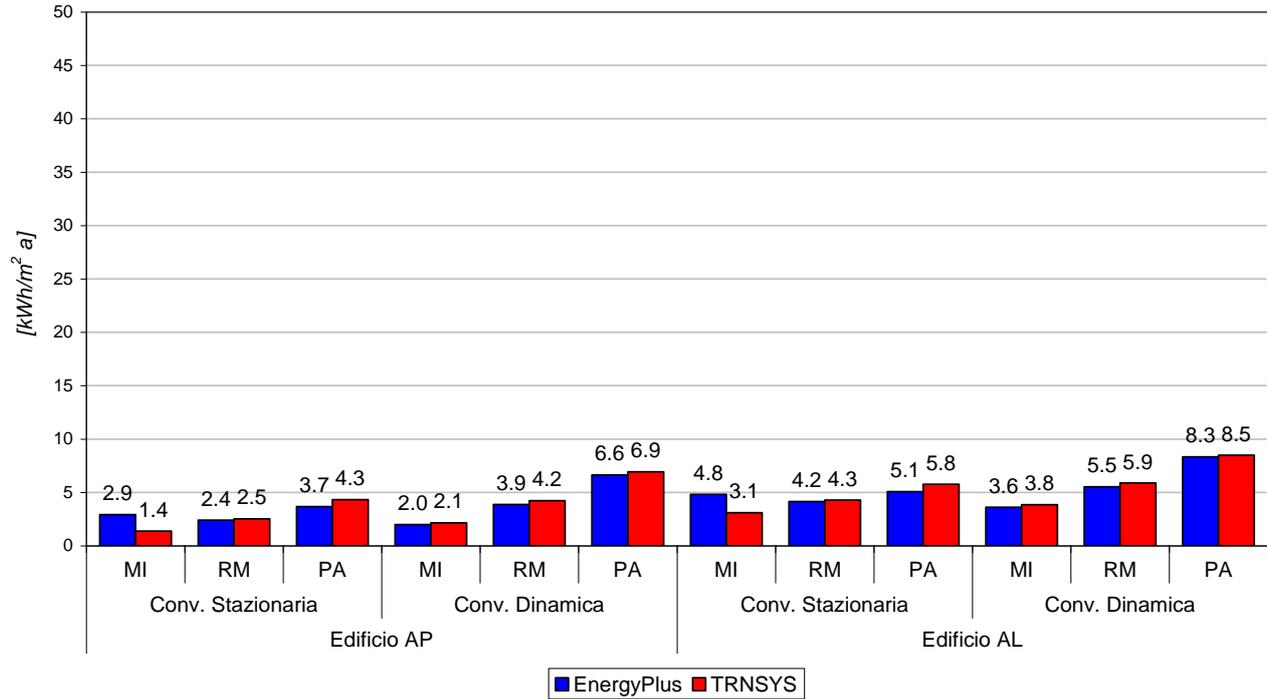
##### POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici AP e AL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni



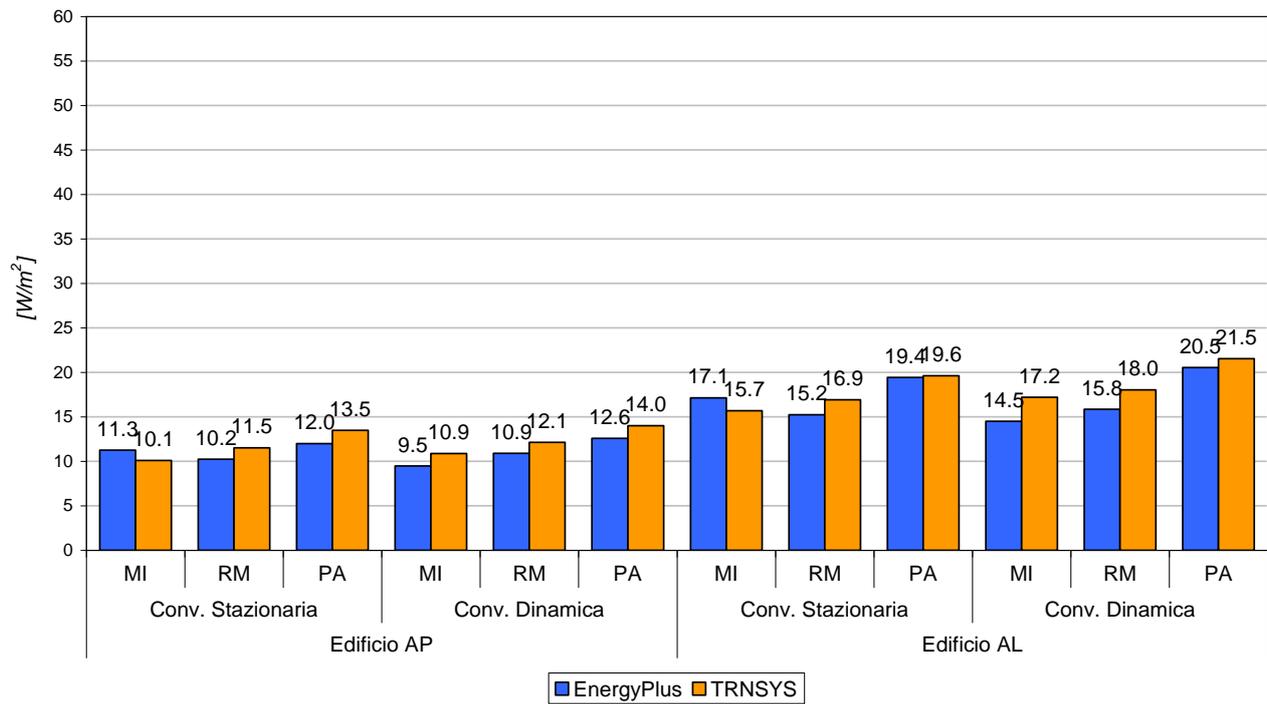
### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici AP e AL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni



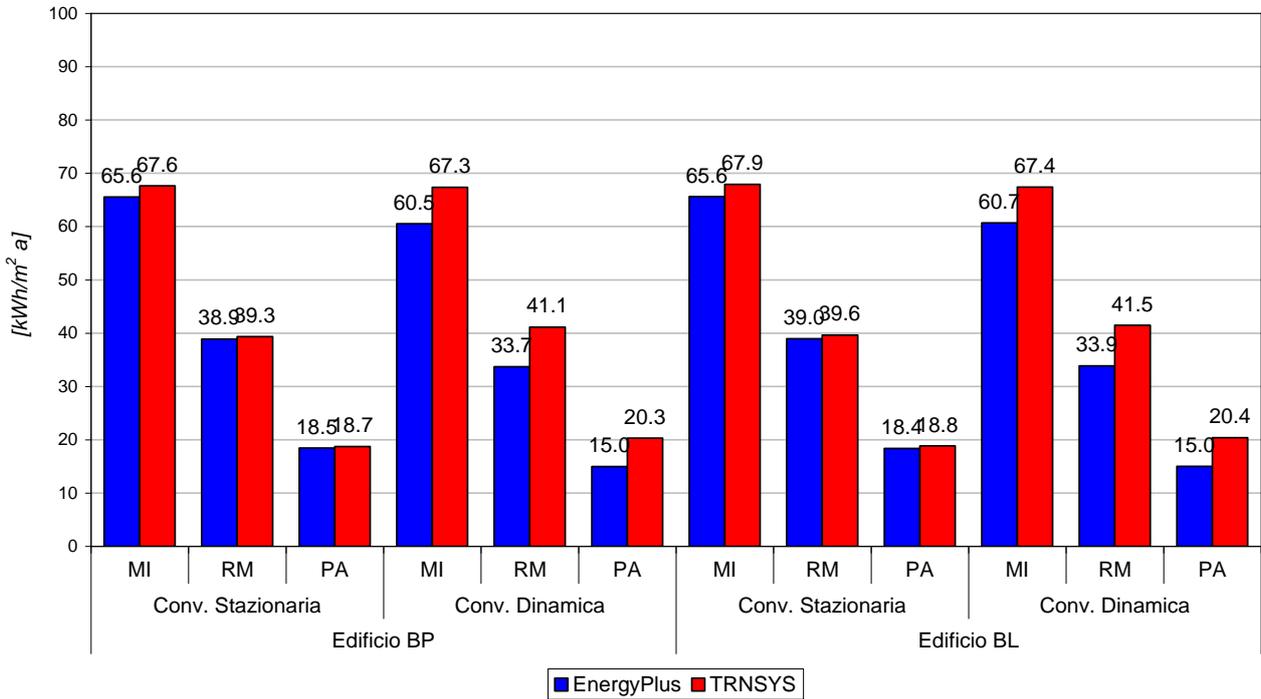
### POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici AP e AL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni

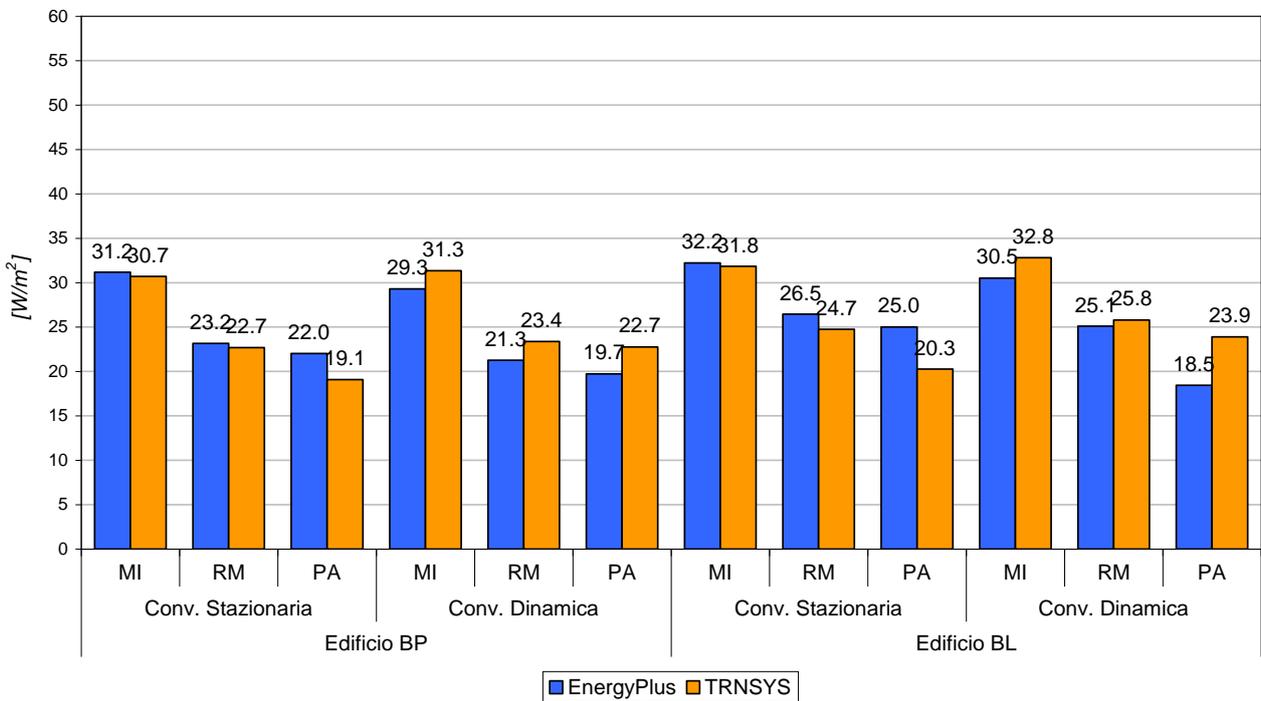


## Edifici BP e BL

### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici BP e BL ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni

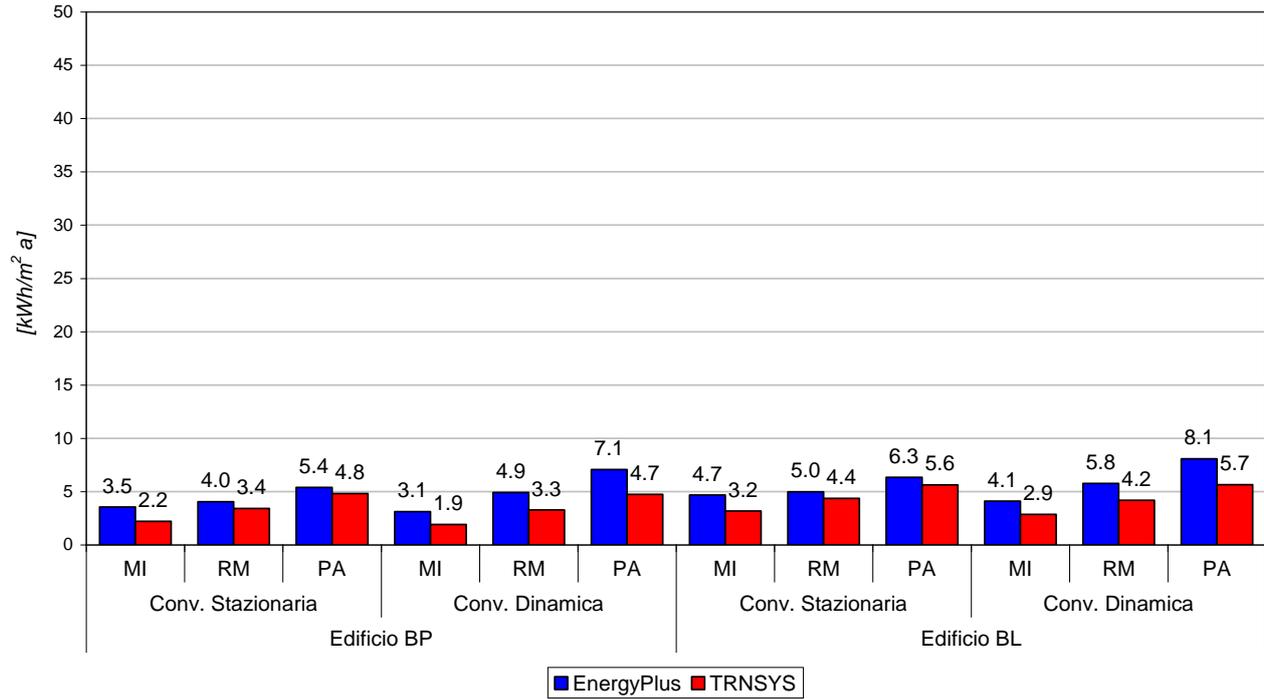


### POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici BP e BL ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni



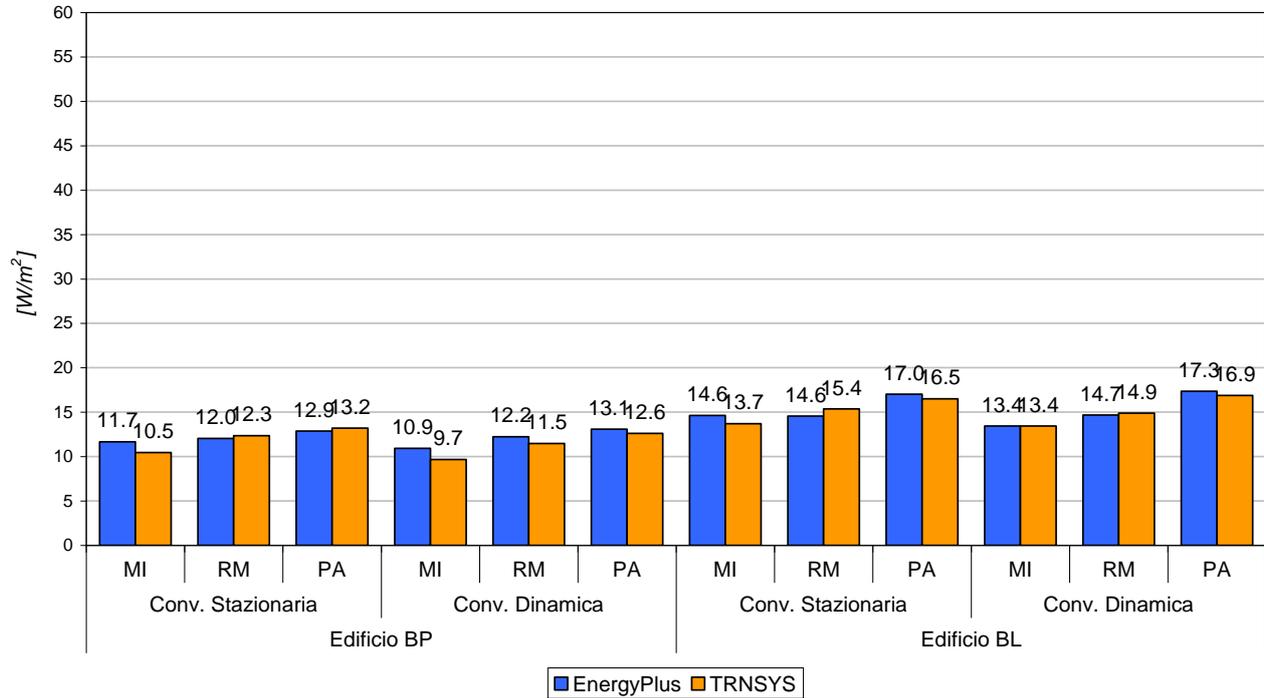
### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici BP e BL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni



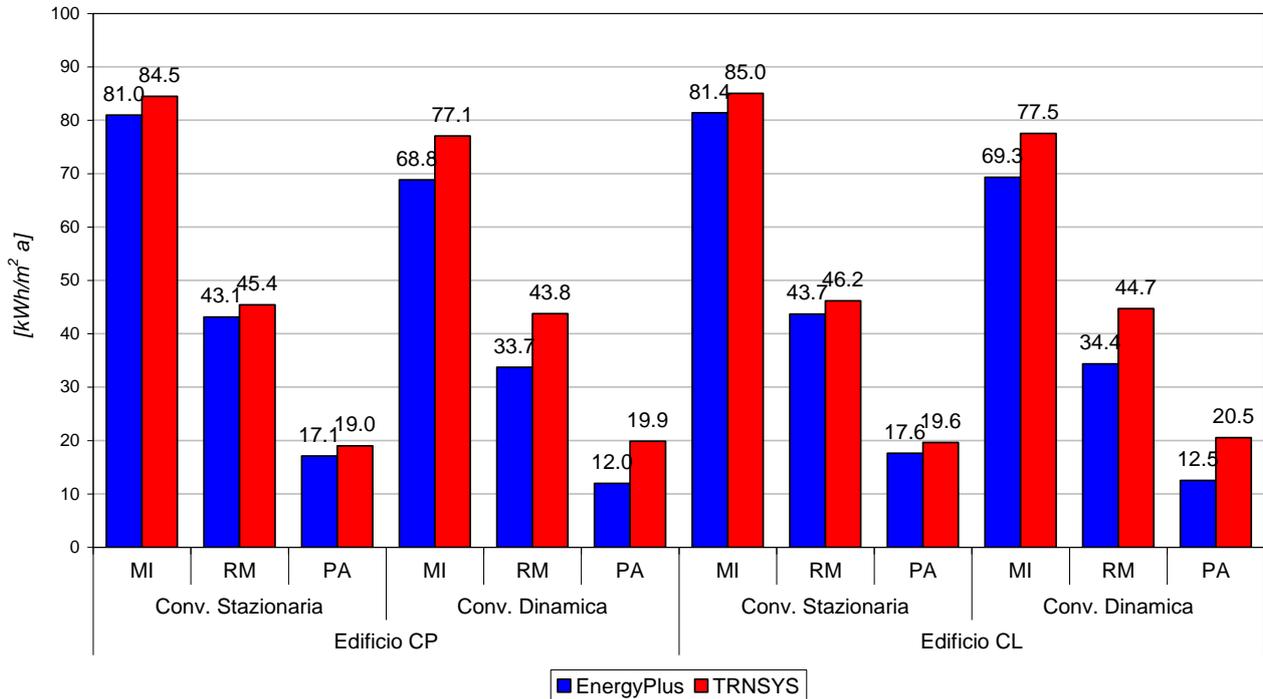
### POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici BP e BL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni

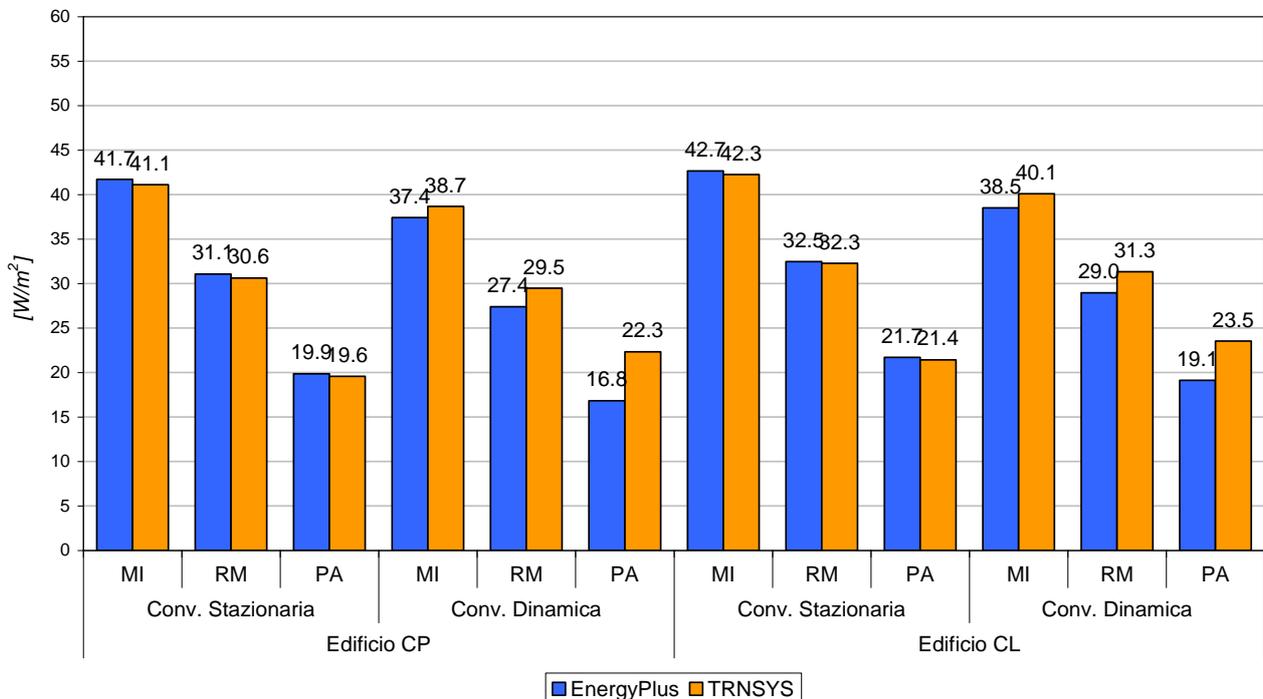


## Edifici CP e CL

### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici CP e CL ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni

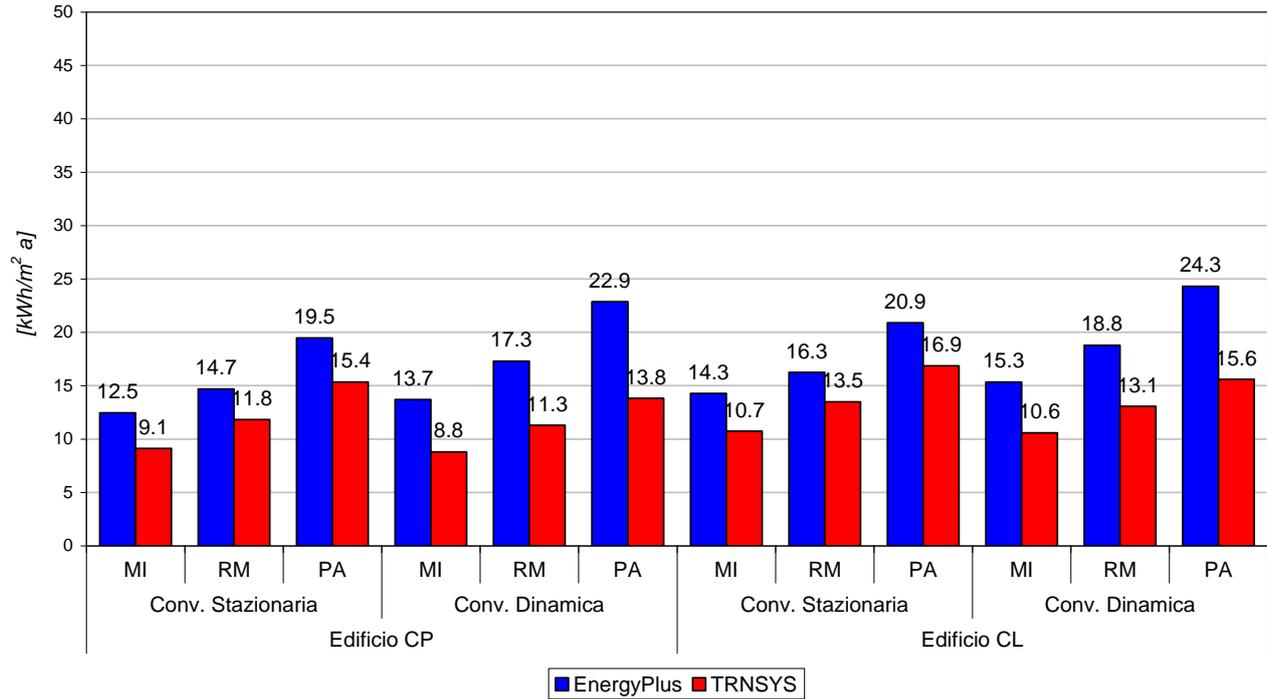


### POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici CP e CL ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni



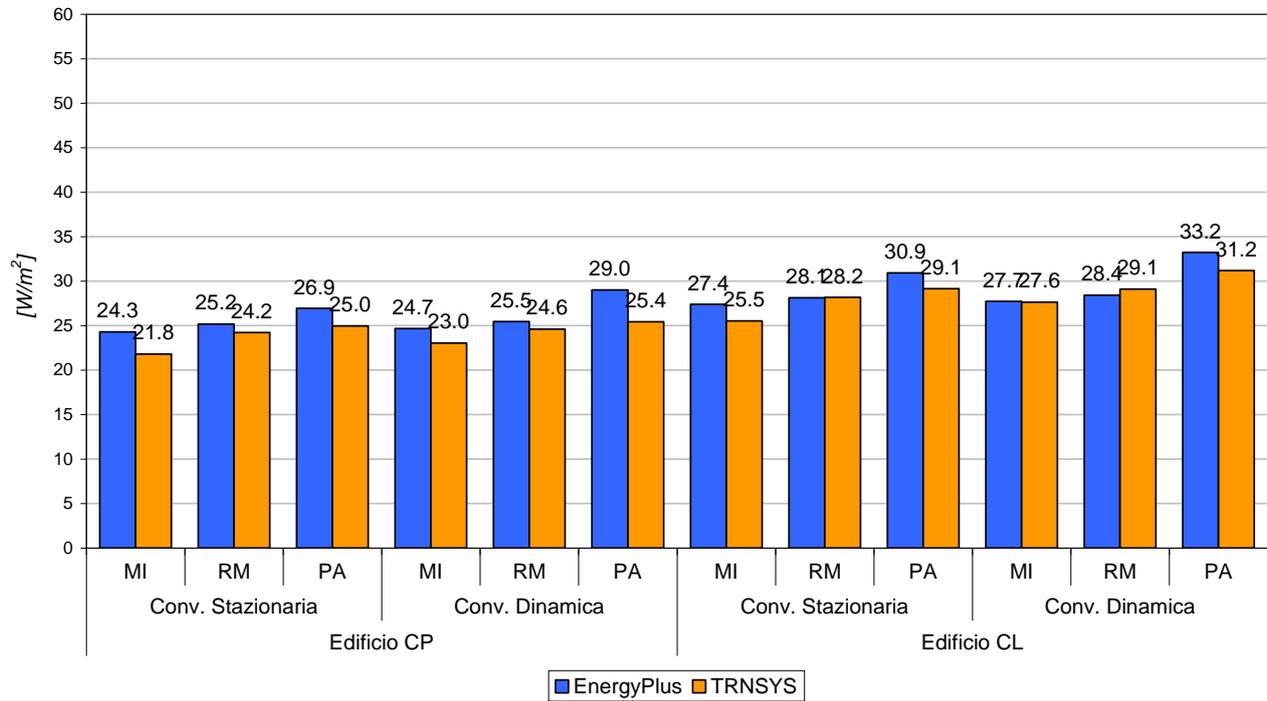
### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici CP e CL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni



### POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici CP e CL

ventilazione 0.50 vol/h e senza carichi termici interni

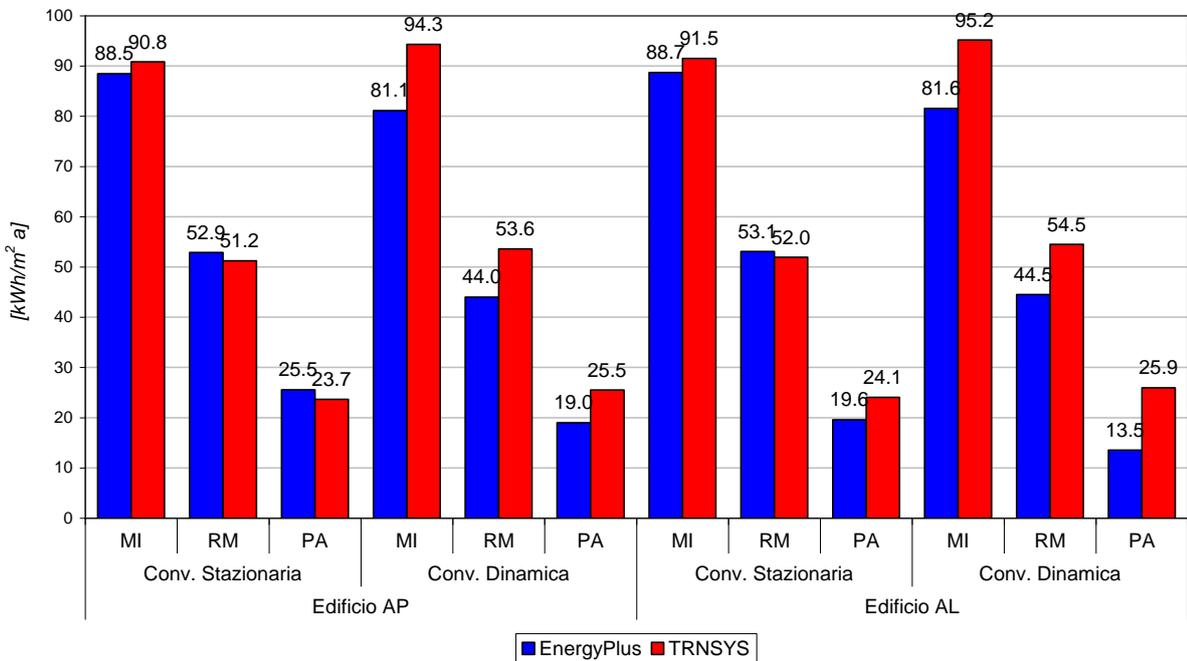


## 7.3.2 Simulazioni condotte con ventilazione come da profilo di occupazione e con i carichi termici interni precedentemente definiti

### Edifici AP e AL

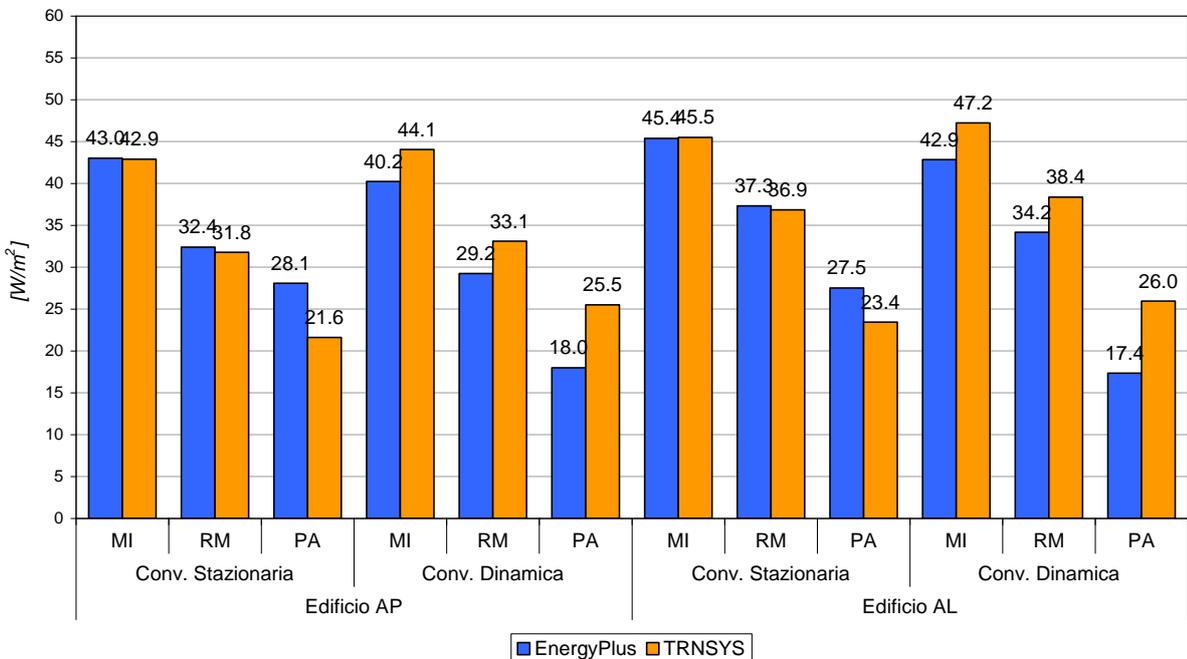
#### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici AP e AL

ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni



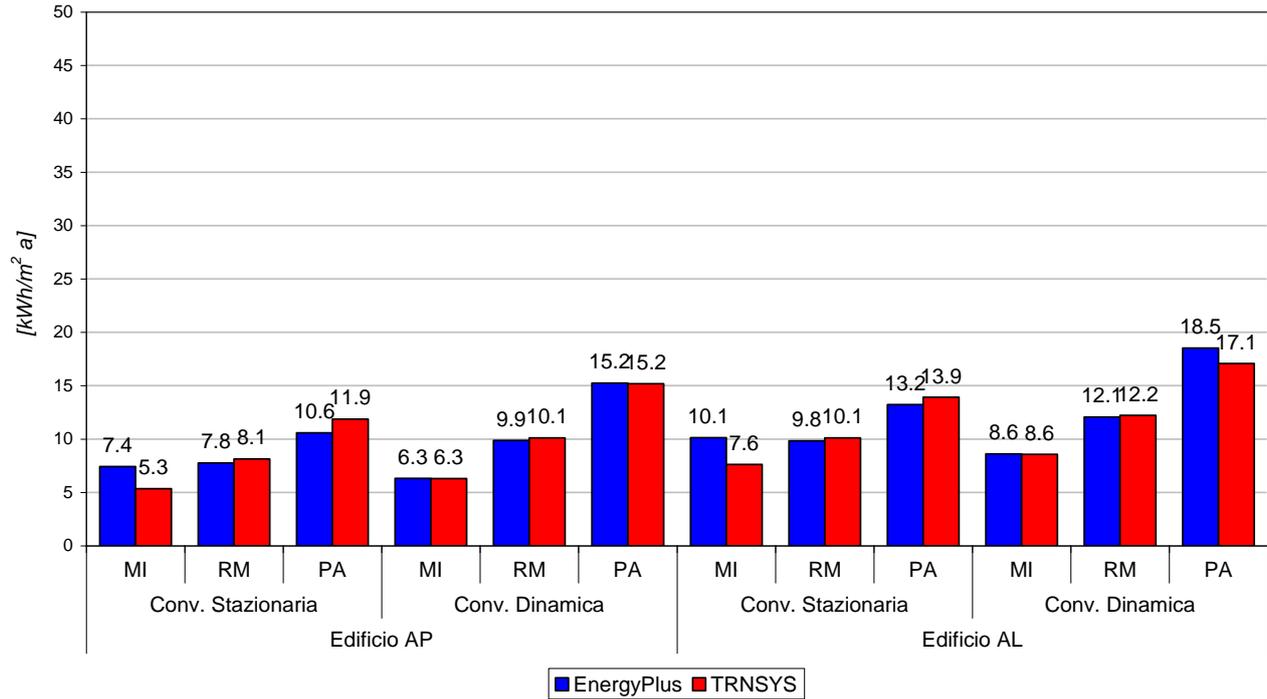
#### POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici AP e AL

ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni



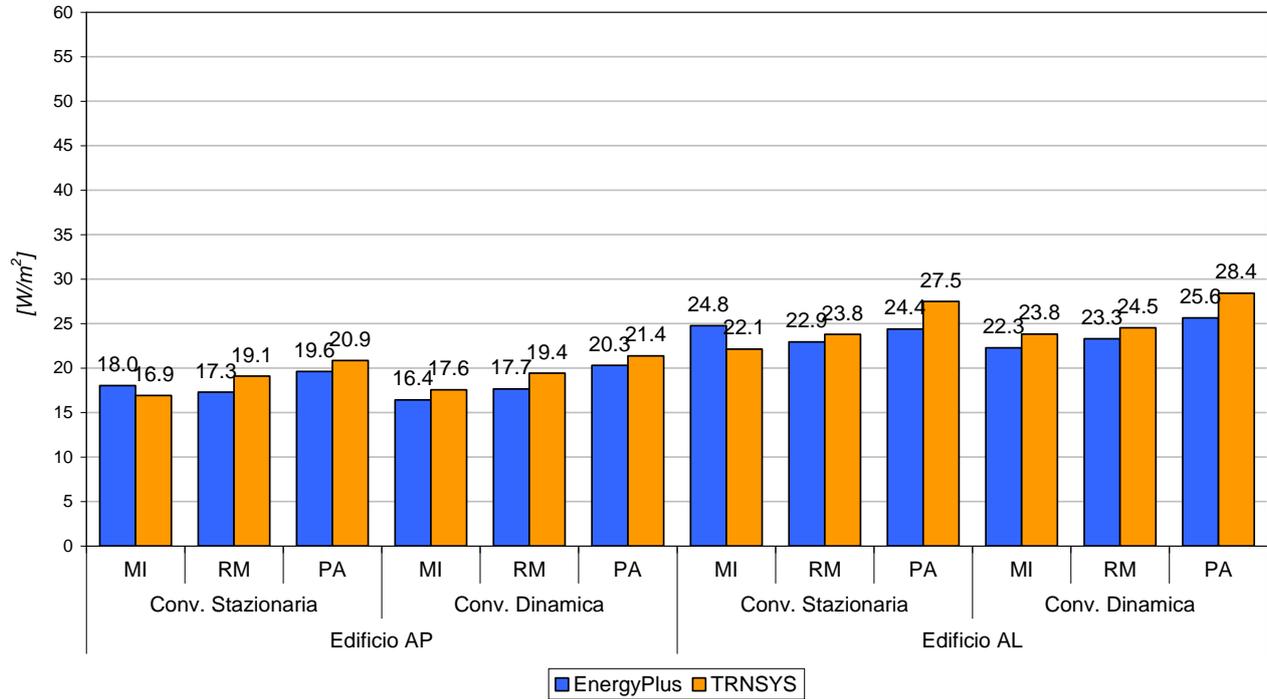
### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici AP e AL

ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni



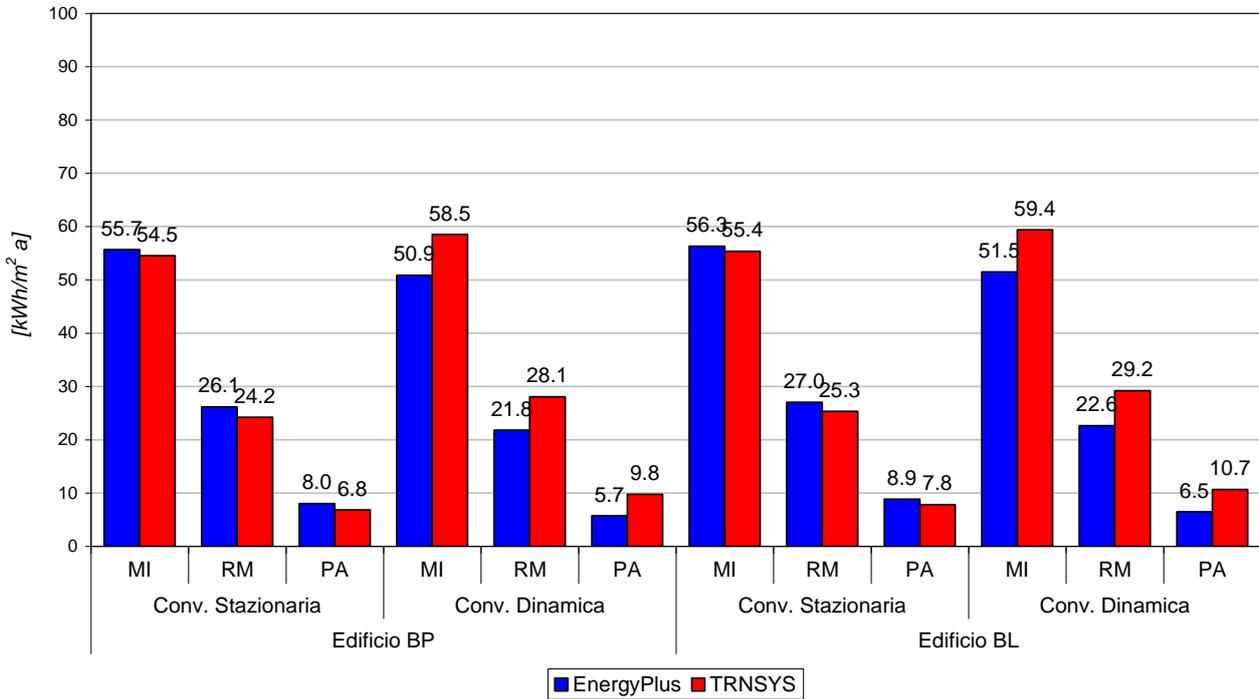
### POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici AP e AL

ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni

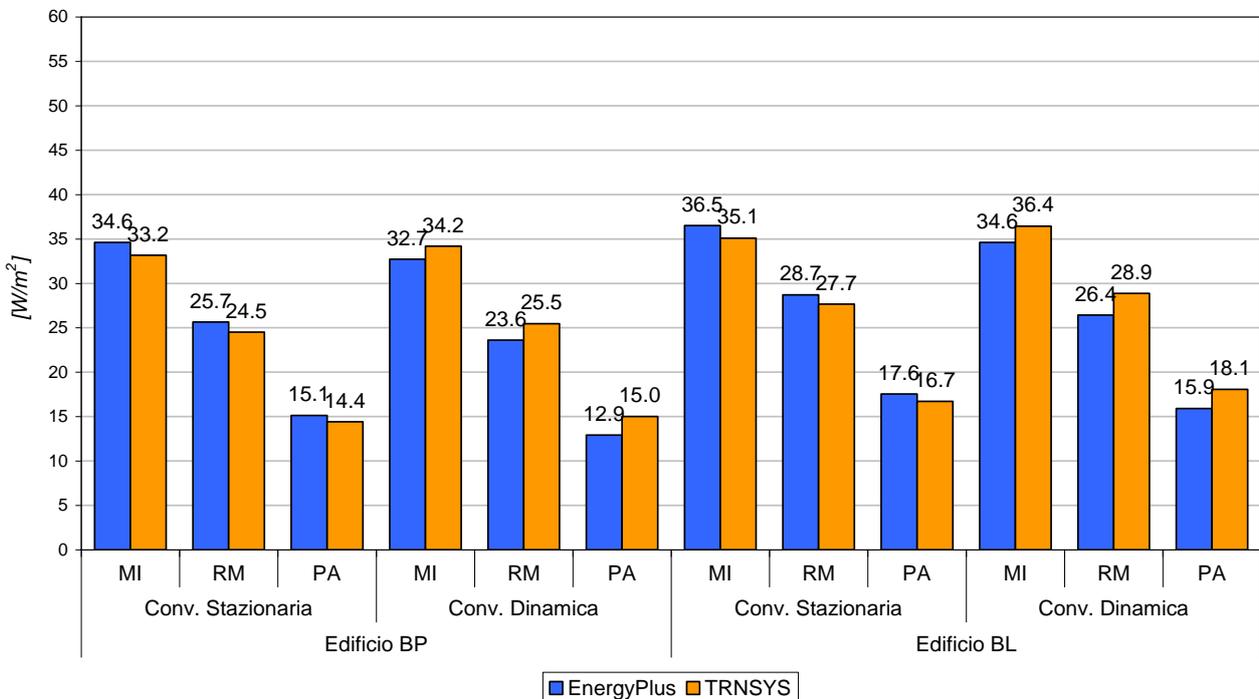


## Edifici BP e BL

### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici BP e BL ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni

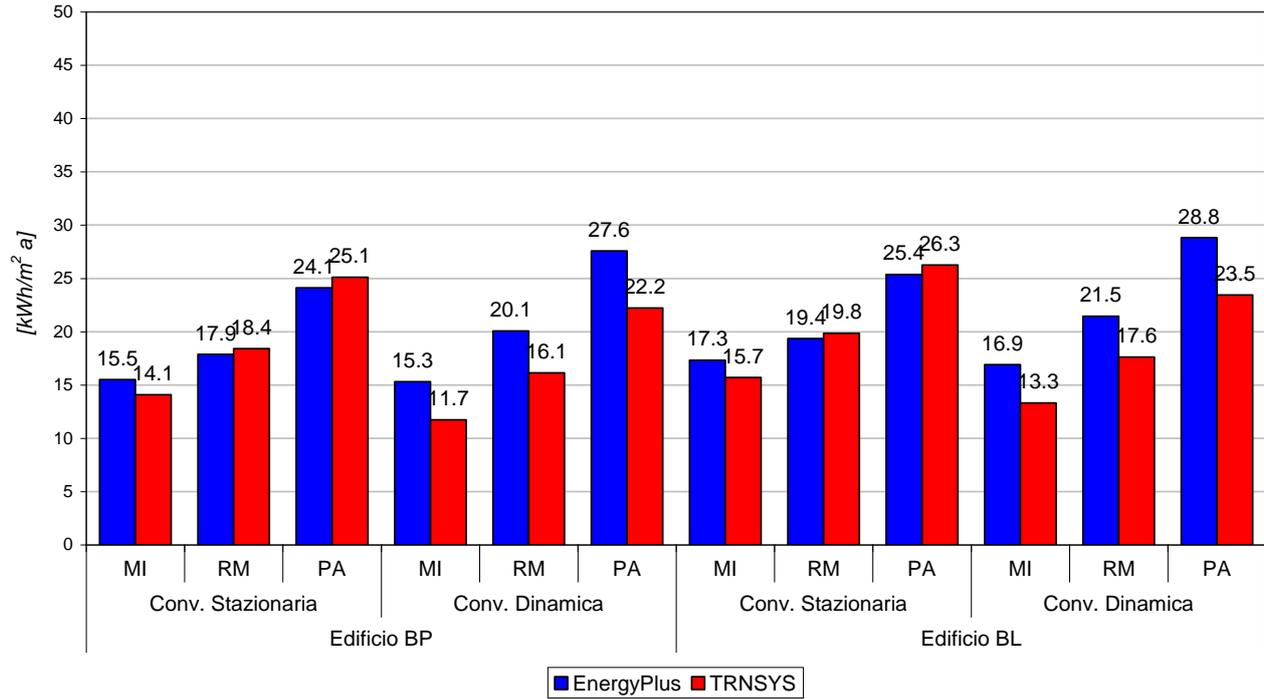


### POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici BP e BL ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni



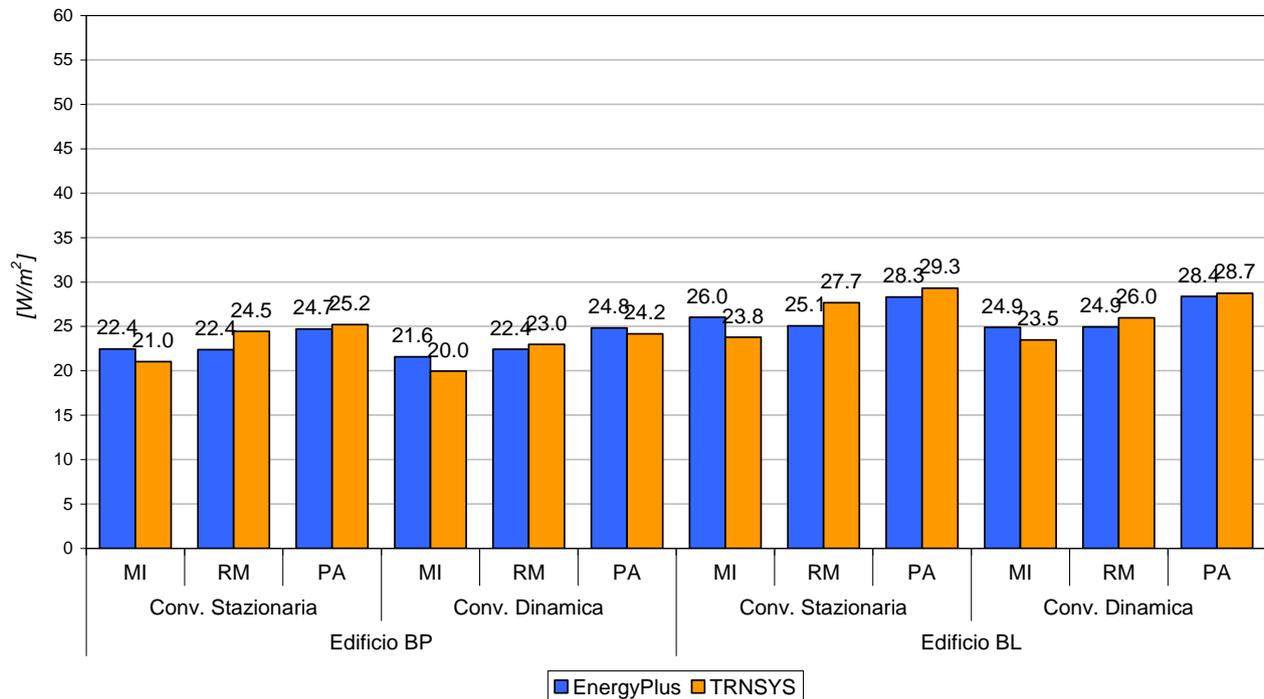
### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici BP e BL

ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni



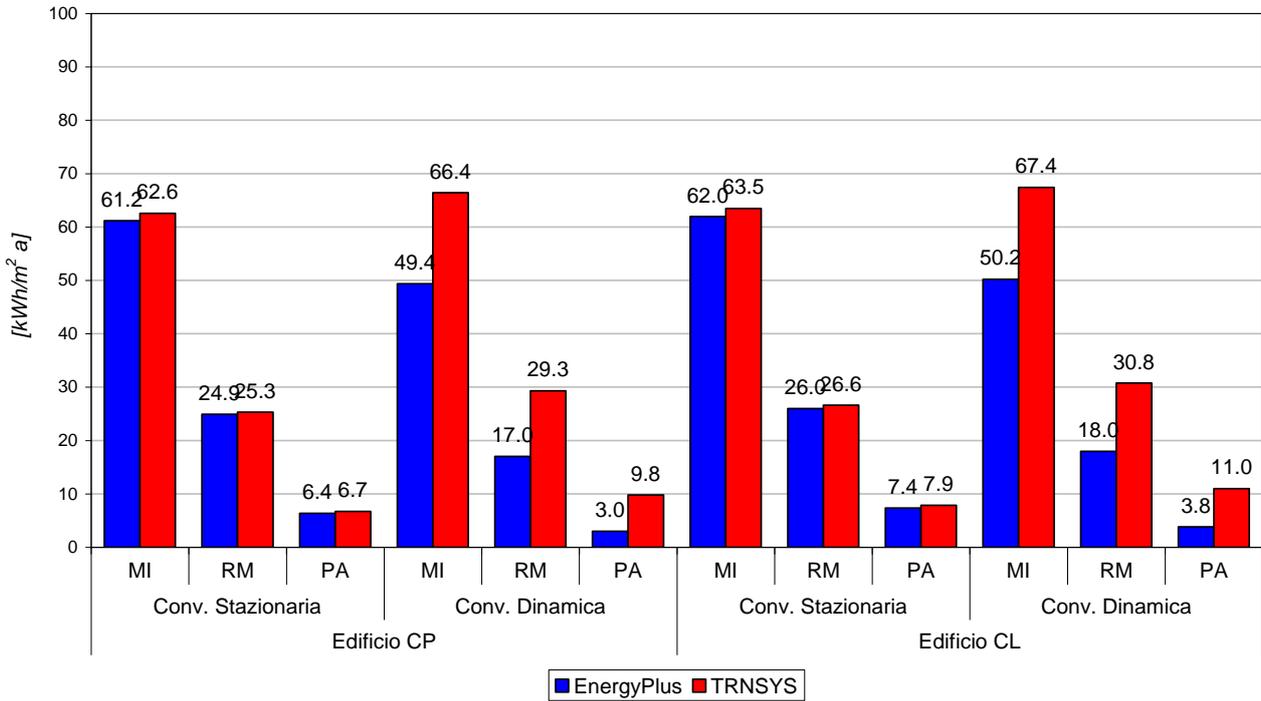
### POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici BP e BL

ventilazione 0.76 vol/h e carichi termici interni

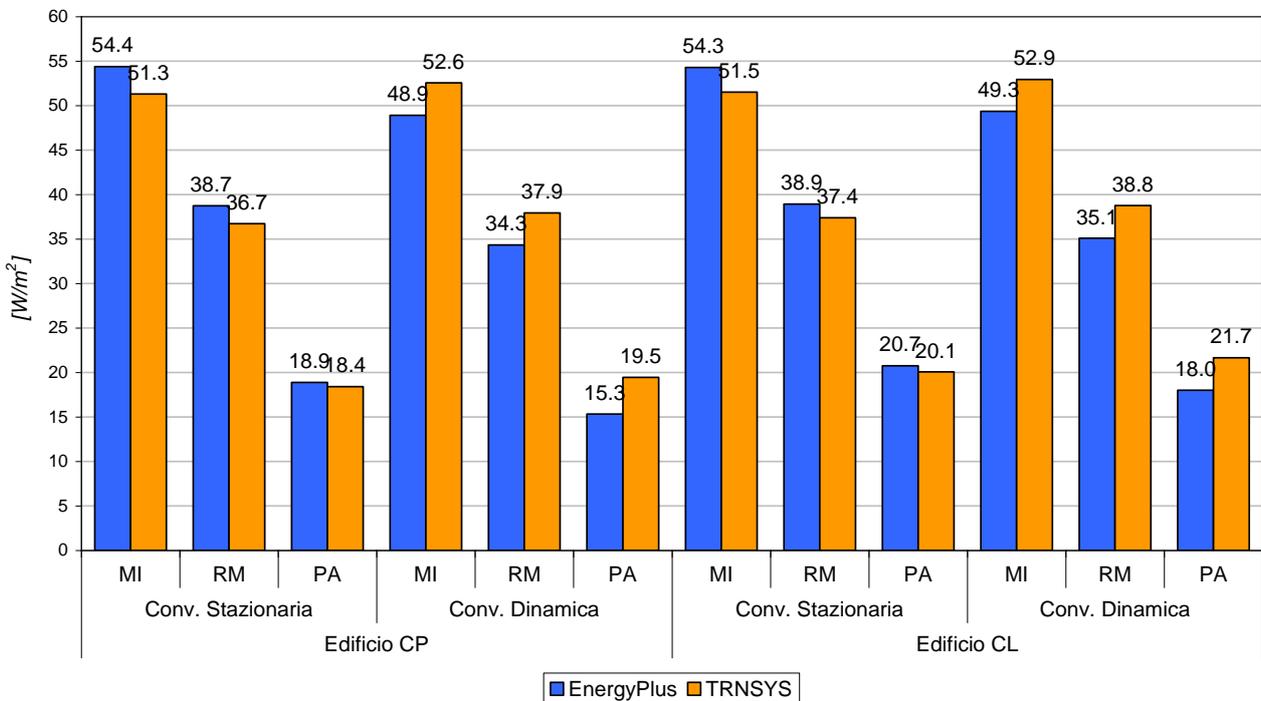


## Edifici CP e CL

### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edifici CP e CL ventilazione schedulata e carichi termici interni

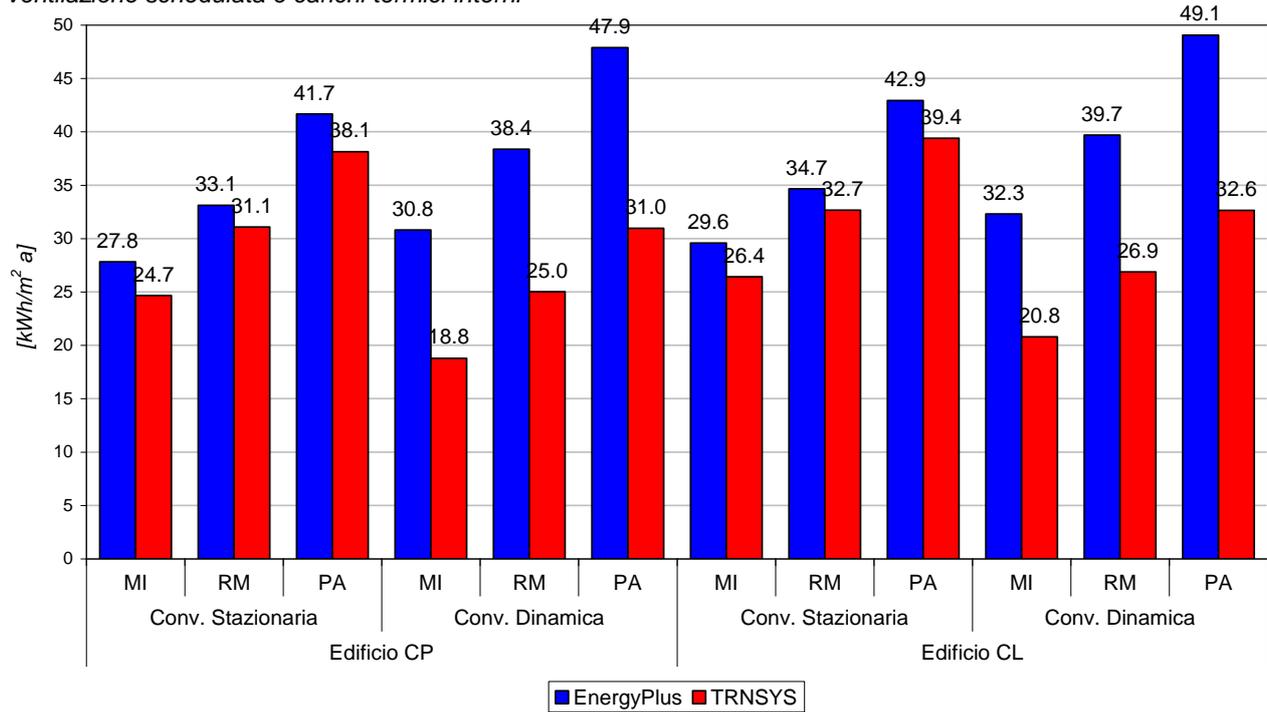


### POTENZA DI PICCO INVERNALE - Edifici CP e CL ventilazione schedulata e carichi termici interni



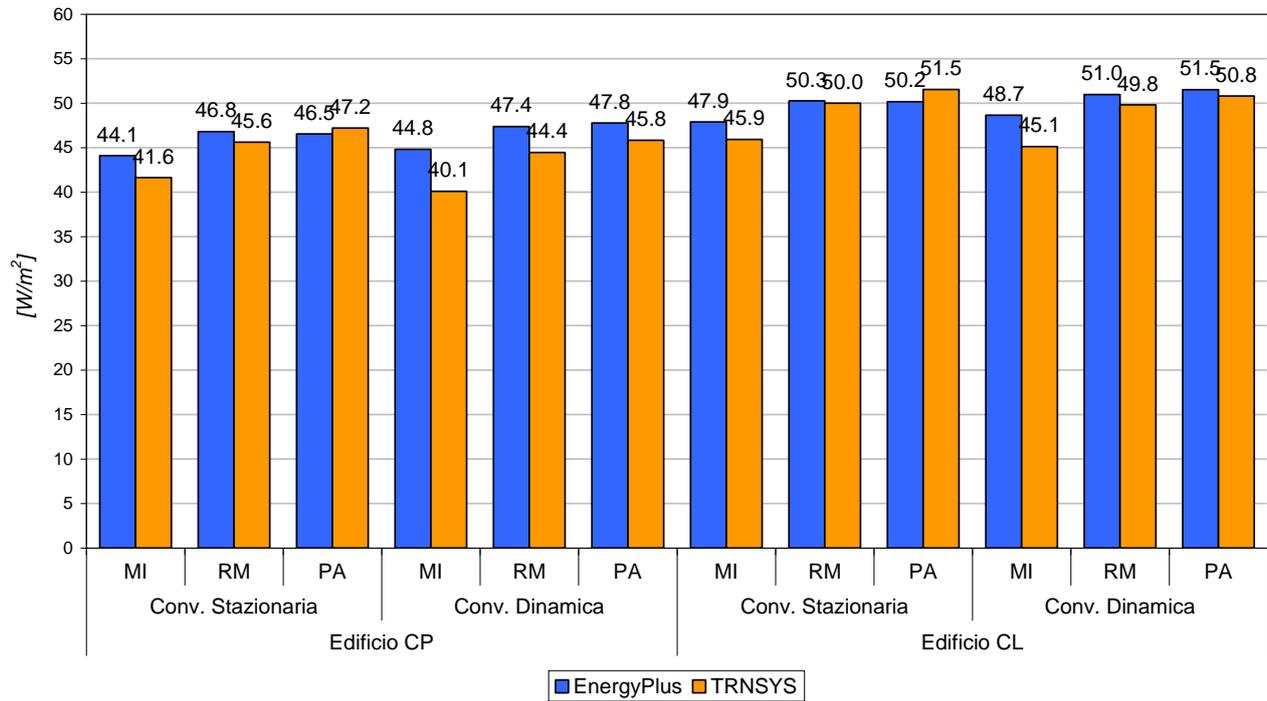
### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edifici CP e CL

ventilazione schedulata e carichi termici interni



### POTENZA DI PICCO ESTIVA - Edifici CP e CL

ventilazione schedulata e carichi termici interni

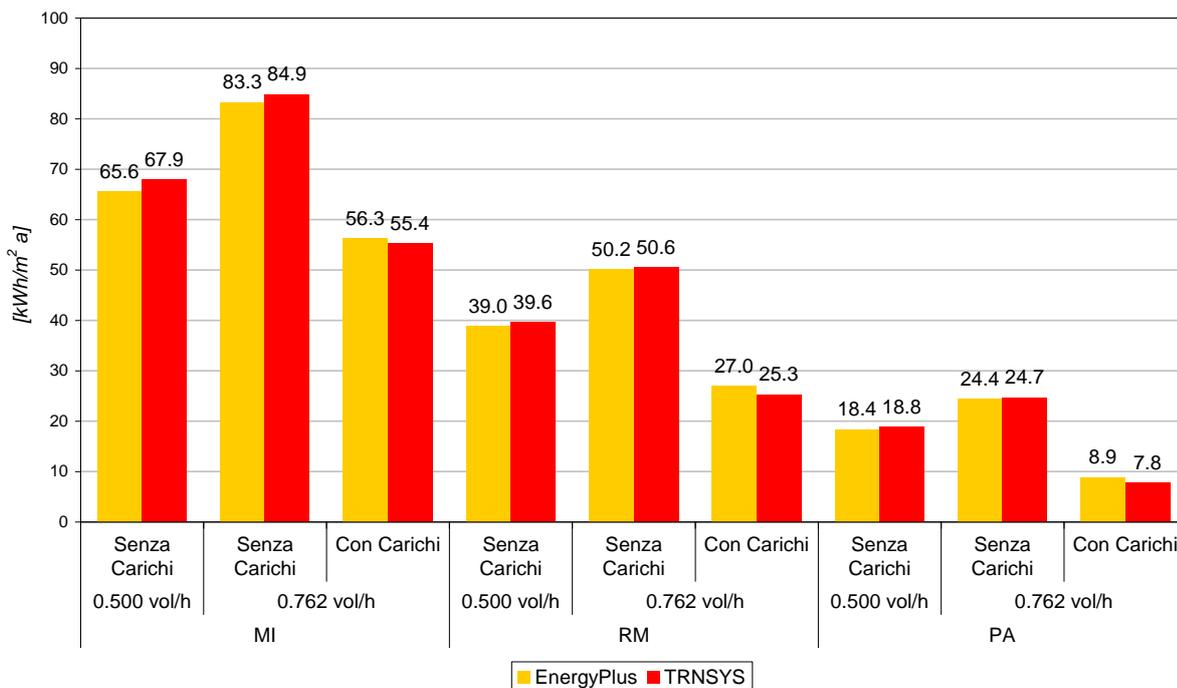


## 7.4 Approfondimento relativo all'impatto dei profili di ventilazione e gestione (carichi interni) sulle domande di heating e cooling

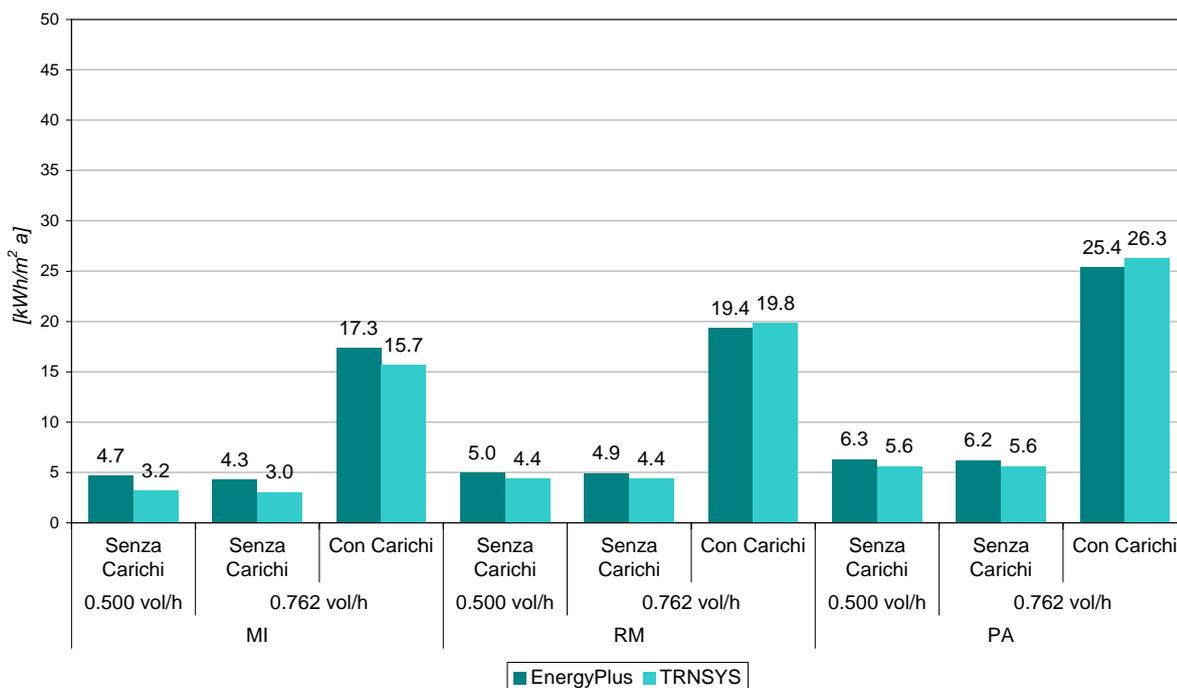
### Esempio: edificio B leggero

Si è scelto di effettuare l'approfondimento sull'edificio B, in quanto considerato caso medio tra i tre analizzati. E' stato verificato che l'aumento dei vol/h, anche negli edifici privi di carichi interni, non modifica il rapporto proporzionale tra le differenze dei due software.

#### FABBISOGNO ENERGETICO INVERNALE - Edificio BL



#### FABBISOGNO ENERGETICO ESTIVO - Edificio BL



## PERDITE PER VENTILAZIONE - Edificio BL

