



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Tema di ricerca 5.4.4.7/5.4.4.8: "Studio di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana"

Strategie e modelli di efficienza energetica alla scala urbana

Autori: Ing. P. Caputo, Arch. S. Ferrari, Arch. G. Costa

Politecnico di Milano
Dipartimento di Scienza e Tecnologie dell'Ambiente Costruito

Via Bonardi, 3
20133 Milano
www.polimi.it/best
Partita Iva: 04376620151
Codice fiscale: 80057930150



Report RSE/2010/x

ANALISI DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DI EDIFICI MONOZONA. COMPARAZIONE TRA GLI STRUMENTI ODESSE, TRNSYS ED ENERGY PLUS.

Ing. P. Caputo, Arch. S. Ferrari, Arch. G. Costa (Politecnico di Milano)

Settembre 2010

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi finali

Tema: "Studio di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana"

Responsabile Tema: Ilaria Bertini, ENEA

Si ringrazia l'Arch. V. Zanotto, studentessa del dottorato TEPAC XXIV ciclo al Politecnico di Milano, per il supporto fornito.

Premessa

I dati relativi alla domanda di energia in Italia attestano l'importanza del ruolo dei settori residenziale e terziario. Attualmente, la principale domanda di energia relativa a tali settori è quella per la climatizzazione degli ambienti, ma è possibile intravedere, come previsione nel breve e medio termine, una sempre maggiore importanza della domanda di elettricità (per illuminazione, apparecchiature e condizionamento degli ambienti) a fronte di una contrazione della domanda per il riscaldamento.

Inoltre, tutti i programmi e gli obiettivi di carattere nazionale, comunitario o globale in tema di politica energetica hanno alla base una drastica riduzione dell'uso delle fonti di energia fossile, un netto incremento dell'efficienza energetica e una graduale ma costante integrazione dell'uso di fonti di energia rinnovabile localmente disponibili. Tutto ciò comporta benefici diretti in termini di uso più razionale delle risorse energetiche, contenimento del cambiamento climatico e attenuazione dei fenomeni di inquinamento.

Oltre a ciò, vanno poi considerati gli effetti del processo di liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica, con conseguente moltiplicazione delle offerte e dei profili tariffari possibili per le forniture elettriche.

Quanto descritto mette in evidenza la necessità di definire obiettivi e promuovere iniziative concrete in grado di agire in maniera efficace e sinergica sui tre principali "lati" del sistema energetico, ovvero: riduzione della domanda di energia; ottimizzazione del sistema di generazione e trasmissione dell'energia mediante l'uso di tecnologie altamente efficienti e l'integrazione di fonti di energia rinnovabile localmente disponibili grazie alla generazione/cogenerazione distribuita, ove possibile; implementazione di strumenti di controllo e gestione avanzati utili ad eliminare gli sprechi e a combinare perfettamente i diversi tipi e di domanda e di generazione energetica (tecnologie, risorse, taglie ecc).

Le azioni così definibili coinvolgono necessariamente una scala più ampia e più complessa rispetto a quella del singolo edificio; la dimensione del distretto potrebbe essere il giusto "modulo" per l'effettiva implementazione di un nuovo paradigma energetico. Nella direzione verso il cambiamento possono essere implementate diverse strategie "tampone" o di carattere transitorio, ma il cambiamento di paradigma presuppone una vera e propria rivoluzione radicale dell'attuale sistema energetico. Per risultare efficace, la rivoluzione deve essere ben progettata e supportata da diversi strumenti: norme, infrastrutture, mercato, politiche, tecnologie, cultura, formazione ecc.

L'alto livello di complessità che caratterizza i processi descritti implica serie difficoltà nel definire un modello in grado di gestire tutti questi aspetti in maniera dinamica, con funzione di supporto sia alla progettazione sia alla gestione.

Il presente lavoro cerca di fornire un contributo in tale direzione, mettendo in evidenza alcuni aspetti preliminari alla definizione di un modello per la simulazione energetica alla scala di distretto. La finalità ultima del lavoro è infatti quella di fornire contributi utili allo sviluppo della piattaforma Odesse nella sua architettura complessiva, a partire, innanzitutto, dalla valutazione del modulo relativo al modello di edificio monozona già implementato.

La collaborazione del gruppo di lavoro BEST riguarderà:

1. Simulazioni comparative con gli strumenti TRNSYS e Energy plus ai fini della validazione dello strumento Odesse/Modulo edificio;
2. Simulazioni comparative con gli strumenti TRNSYS e Energy plus ai fini della validazione dei moduli impianto della piattaforma Odesse;
3. Supporto nella messa a sistema dei diversi moduli sviluppati nell'ambito della piattaforma Odesse ai fini dell'implementazione di un modello a scala di distretto.

Al momento, le informazioni acquisite da ENEA consentono di affrontare soltanto il primo punto, che sarà oggetto del presente rapporto.

Indice

1	Introduzione	5
2	Strumenti di simulazione	5
	Odesse (Optimal DESign for Smart Energy)	5
	Trnsys.....	6
	Energy plus	7
3	Dati climatici.....	8
4	Set di edifici analizzati.....	8
	Set di edifici simulati e relative caratteristiche dimensionali e termofisiche.....	9
	Risultati.....	14
	Confronto con altre località climatiche: risultati Milano, Roma, Palermo	22
	Edificio A 15%.....	23
	Edificio B 60%.....	29
	Edificio C 30%	35
	Approfondimento edificio D	41
	Caratteristiche geometriche e termofisiche dell'edificio D scalato a 1/2.....	42
	Caratteristiche geometriche e termofisiche dell'edificio D scalato a 1/3.....	43
	Risultati delle simulazioni di approfondimento dell'edificio D	44
	Risultati delle simulazioni di approfondimento dell'edificio D con l'introduzione di massa interna.....	49
5	Commenti e conclusioni	55
6	Riferimenti	56
	<i>Allegato 1: proposta per la formulazione di un nuovo modello.....</i>	<i>57</i>
	Modelli a scala di distretto	57

1 Introduzione

Le attività sino ad ora svolte riguardano le simulazioni comparative con gli strumenti TRNSYS e Energy plus ai fini della validazione dello strumento Odesse/Modulo edificio monozona.

Durante questa prima fase, sono stati raccolti ed elaborati i dati relativi alle simulazioni energetiche riguardanti un set di edifici campione condotte con lo strumento Odesse. Analoghe simulazioni sono state poi condotte con lo strumento Energy Plus; si è proceduto poi anche ad un'ulteriore fase di confronto e approfondimento con lo strumento TRNSYS.

2 Strumenti di simulazione

L'utilizzo di una procedura di calcolo stazionaria non è sufficiente a valutare con accuratezza le prestazioni energetiche dell'edificio e degli impianti ad esso asserviti, ma, come è noto, lo studio del comportamento energetico dell'edificio in regime dinamico è molto complesso.

L'obiettivo finale della piattaforma Odesse è la simulazione del distretto energetico, che è definito come un insieme di edifici e impianti (secondo il modello della generazione distribuita). A tale scopo ENEA ha deciso di implementare per la simulazione dell'elemento base edificio-impianto un approccio facilitato che prevede un modello matematico semplificato in grado di valutare con la necessaria accuratezza il comportamento termico dell'edificio.

Una breve descrizione di Odesse e degli strumenti con cui viene confrontato (TRNSYS e Energy plus) viene di seguito riportata.

Odesse (Optimal DESign for Smart Energy)

L'architettura complessiva della piattaforma Odesse fa riferimento alla simulazione del distretto energetico, definito come insieme edifici e impianti e caratterizzato quindi da un elevato livello di complessità.

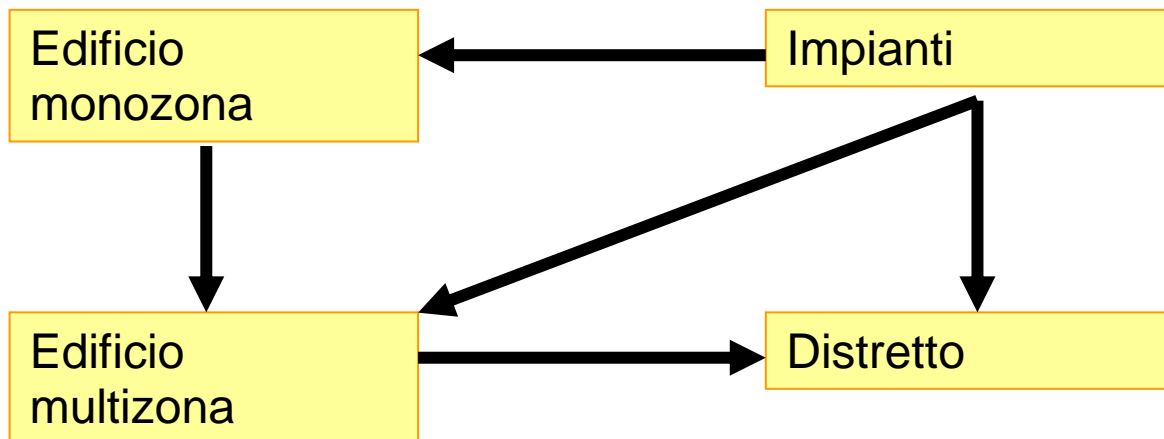


Figura 1 - schema di lavoro per arrivare all'implementazione complessiva della piattaforma Odesse

A tal fine, si è optato per un modello di simulazione semplificato dell'elemento base (edificio monozona): l'equazione di partenza per il calcolo della temperatura interna dell'edificio è stata estrapolata dal codice TRNSYS e poi implementata su piattaforma Matlab/simulink.

I vincoli che hanno condizionato le scelte legate all'implementazione di Odesse sono legati alla minimizzazione dell'errore rispetto ad altri software che utilizzano metodi più precisi e al contenimento dell'onere di calcolo computazionale. Gli input sono i parametri termofisici che descrivono la struttura (geometrica e tipologica) dell'edificio, il suo profilo di utilizzo e le caratteristiche prestazionali degli impianti. Il modello matematico implementato consente di calcolare il carico termico e le temperature interne dell'edificio con passo di integrazione di un'ora¹.

¹ Il passo di integrazione non è univocamente definito e può essere variato secondo particolari esigenze fino ad un

Per il calcolo del carico termico in regime invernale si è assunta l'equazione:

$$Q_g + Q_i - Q_{disp} - Q_v + Q_{aux} = 0$$

dove Q_g è il guadagno solare attraverso le superfici trasparenti (Q_{sol}) e opache (Q_{par}), Q_i il guadagno interno dovuto alla presenza di persone o dispositivi di varia natura, Q_{disp} la dispersione attraverso le superfici trasparenti e opache, Q_v lo scambio termico per ventilazione e Q_{aux} la potenza termica fornita dagli impianti di generazione termica.

Il periodo di riscaldamento è individuato dall'utente attraverso la scelta della zona geografica dove costruire l'edificio in progetto.

Il periodo di raffrescamento è calcolato come complementare al relativo periodo di riscaldamento.

Il fabbisogno termico invernale è calcolato integrando il carico orario per l'intero periodo di riscaldamento e raffrescamento per tutti gli intervalli di tempo per i quali la temperatura scende sotto i 20 °C d'inverno (temperatura di progetto invernale come definita dal DPR 412/95).

Per il calcolo del carico termico in regime estivo, in prima battuta si è fatto riferimento al metodo delle Room Transfer Function, proposto dall'ASHRAE. Questa metodologia ha consentito di verificare in Odesse la bontà dell'approccio metodologico basato sulle funzioni di trasferimento. Tuttavia, tale metodo in alcuni casi può fornire risultati non sufficientemente accurati; per tale motivo, si è deciso di ricorrere ad un altro metodo più recentemente proposto dall'ASHRAE: il metodo RTS (Radiant Time Series), derivato dall'Heat Balance Method (vedere figura successiva).

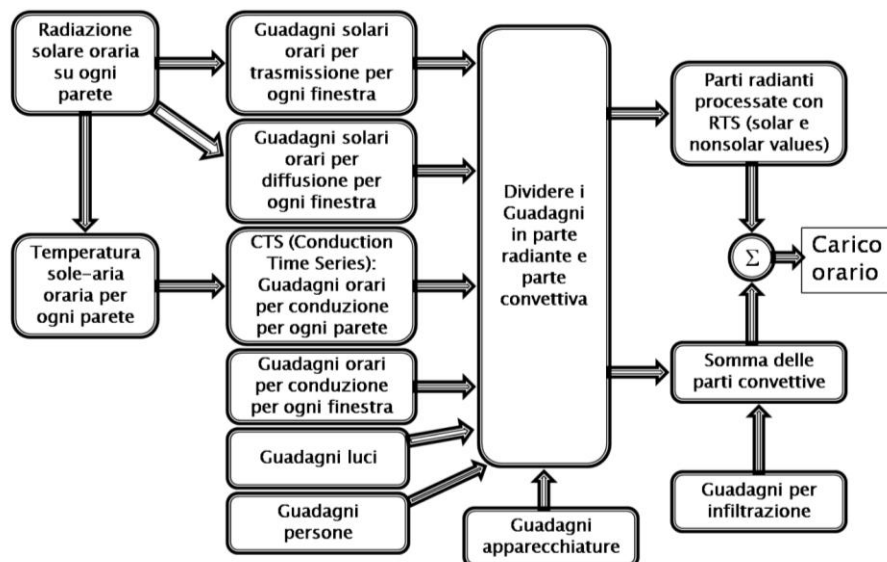


Figura 2 - Algoritmo RTS

Si segnala che l'implementazione in Odesse della procedura RTS è in fase di completamento; pertanto, i risultati contenuti nel presente rapporto fanno riferimento alla metodologia Room Transfer Function precedentemente descritta.

I risultati ottenuti con Odesse verranno confrontati con quelli ottenuti mediante i due strumenti più affidabili, consolidati e diffusi nel mondo scientifico relativi alla simulazione del comportamento energetico del sistema edificio-impianto in regime dinamico: TRNSYS e Energy Plus.

Trnsys

TRNSYS è uno strumento di simulazione di sistemi che lavorano in regime transitorio, sviluppato dal SEL (Solar Energy Laboratory) della University of Wisconsin-Madison attraverso la collaborazione con altri istituti di ricerca a livello internazionale. Lo strumento ha una struttura di tipo modulare: la risoluzione di complessi sistemi energetici è affrontata suddividendo il problema in una serie di componenti più semplici, detti "Types", che vengono poi configurati e assemblati all'interno di un'interfaccia grafica integrata detta "Simulation Studio".

Per la modellazione degli edifici e la creazione dei dati di input necessari alla simulazione, viene fornito uno strumento dedicato (TRNBuild), che imposta i bilanci termici convettivo e radiativo delle varie zone termiche e calcola le funzioni di trasferimento di riferimento per le diverse componenti d'involucro considerate.

Le componenti d'impianto vengono rappresentate da specifici Types, che richiedono l'inputazione diretta delle caratteristiche dei singoli elementi.

La libreria di base del software fornisce anche componenti che permettono la gestione di dati climatici o altre forzanti variabili nel tempo, componenti che consentono di richiamare programmi esterni (es. Excel/VBA, MatLab/Simulink, EES), e componenti dedicate all'elaborazione dei risultati della simulazione. Sono state inoltre sviluppate librerie aggiuntive specifiche (es. HYDROGEMS, TESS e STEC) che permettono la modellazione di sistemi energetici ibridi integrati, in grado cioè di sfruttare sia fonti rinnovabili sia convenzionali in modo affidabile e continuo.

Durante le simulazioni, il bilancio termico dell'edificio e le componenti del sistema impiantistico vengono risolte simultaneamente ad ogni intervallo, che è tipicamente regolato su 1 ora o 15 minuti, ma che può essere ridotto fino a 0.1 secondi.

Energy plus

EnergyPlus è uno strumento per la simulazione energetica complessiva degli edificio sviluppato dall'US Department of Energy sulla base dell'esperienza maturata con i precedenti BLAST e DOE 2.1, al fine di fornire uno strumento in grado di eseguire una simulazione integrata e simultanea del sistema edificio-impianto e di permettere valutazioni accurate delle temperature e del livello di comfort interni.

EnergyPlus è essenzialmente un motore di simulazione, che tratta input e output in forma di semplice testo, ed è caratterizzato da due componenti di base: un modulo per la risoluzione del bilancio termico e di massa e un modulo per la modellazione dei sistemi edilizi.

Il primo modulo è basato su una versione di ricerca di BLAST che valuta il bilancio termico per le superfici (conduzione, convezione, radiazione e trasporto di massa – vapore acqueo – oltre all'interfaccia con le condizioni al contorno) e il bilancio di massa per il volume d'aria: tale modulo gestisce il calcolo dei carichi termici per intervalli di tempo specificati (generalmente 15 minuti) e si interfaccia con il secondo modulo.

Il modulo per la modellazione del sistema edilizio gestisce l'interfaccia tra l'inputazione dei carichi termici e la risposta dei diversi moduli per le componenti d'impianto (quali scambiatori termici, caldaie, frigoriferi, pompe e ventilatori), raccolti in "loops" che rappresentano le reti di canalizzazioni per il trasporto d'aria o di tubazioni per il trasporto d'acqua. In particolare, possono essere simulati sistemi di generazione quali: solare fotovoltaico, solare termico, microturbine, turbine a gas, motori alternativi, celle a combustibile e generici sistemi di microgenerazione. Tale modulo fa riferimento ad un intervallo di tempo variabile che può scendere fino ad 1 minuto, se necessario.

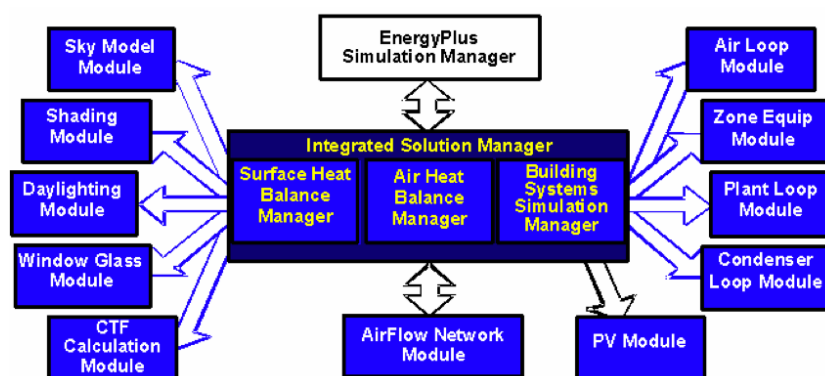


Figura 3 - Struttura di base dei moduli che compongono EnergyPlus.

Questo sistema di simulazione integrata dei due moduli consente anche di modellare sistemi di controllo realistici, l'assorbimento dell'umidità da parte degli elementi edilizi, il comportamento di sistemi di riscaldamento e raffreddamento radianti, e i flussi d'aria tra diverse zone.

3 Dati climatici

Nelle simulazioni i dati climatici rappresentano uno dei più importanti parametri di input. In questo caso, per tutti e tre gli strumenti utilizzati, si è fatto riferimento ai dati climatici formato EPW (dal sito <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>) che deriva dal file climatico “Typical Meteorological Year 2 (TMY2)”, opportunamente modificato e implementato².

In tutti i casi si è fatto riferimento a 3 località climatiche rappresentative della realtà nazionale: Milano, Roma e Palermo.

I file climatici utilizzati 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.

4 Set di edifici analizzati

Ai fini della verifica degli algoritmi di funzionamento del codice Odesse, sono stati implementati dapprima 4 edifici tipo, dotati di differenti dimensioni, rapporti S/V, percentuali di superficie vetrata, ecc. Tali edifici sono stati simulati con i 3 strumenti citati e per le 3 differenti località climatiche indicate. La descrizione delle proprietà geometriche e termofisiche del set di edifici simulato è riportata nelle successive tabelle.

Gli edifici fanno riferimento allo stesso pacchetto murario (doppio mattone forato con isolante) e allo stesso tipo di finestre (vetro doppio). La percentuale vetrata è stata assunta variabile tra il 15, 30 e 60% della superficie laterale complessiva. In tal modo, gli edifici simulati risultano essere tutti di tipo medio o leggero³. Come si vedrà nel seguito, sono state condotte anche ulteriori simulazioni di confronto con edifici dotati di una massa termica maggiorata tramite l'introduzione di pareti interne fittizie.

Gli edifici sono stati introdotti come semplici parallelepipedi, con un fattore di forma variabile tra 0,3 e 0,6 m⁻¹ a seconda dell'edificio. Non si è provveduto ad una ripartizione vera e propria in piani⁴ e zone termiche (scelata conforme al fatto che l'obiettivo è testare il modulo Odesse monozona).

Tutti gli edifici sono stati simulati con una ventilazione naturale pari a 0,5 volumi/ora costanti per tutte le ore dell'anno e senza alcun tipo di guadagno interno. Ulteriori sviluppi delle simulazioni di confronto potrebbero riguardare l'indicazione di regimi di ventilazione e guadagni interni più realistici.

² Si prevede invece di utilizzare, nella versione finale di ODESSE, i dati climatici orari prodotti dal *neural weather generator* interno alla piattaforma.

³ La massa frontale indicata nelle tabelle che riportano le caratteristiche dimensionali e termofisiche degli edifici fa riferimento alla sola componente opaca.

⁴ La superficie riscaldata indicata nelle tabelle che riportano le caratteristiche dimensionali e termofisiche degli edifici fa riferimento alla sola impronta d'area dell'edificio.

Set di edifici simulati e relative caratteristiche dimensionali e termofisiche

Tabella 1 - EDIFICIO A e relative caratteristiche

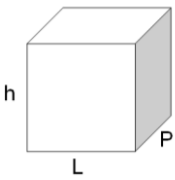
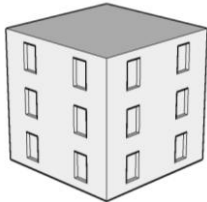
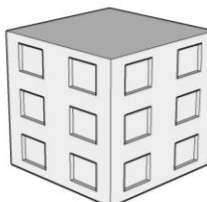
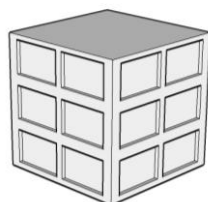
Dati	Unità di misura	Finestratura 15%	Finestratura 30%	Finestratura 60%
				
Altezza (h)	[m]	10	10	10
Lunghezza (L)	[m]	10	10	10
Profondità (P)	[m]	10	10	10
Trasmittanza parete	[W/m ² K]	0.326	0.326	0.326
Massa Frontale	[kg/m ²]	379	379	379
Trasmittanza infissi	[W/m ² K]	2.29	2.29	2.29
Superficie totale (per fattore di forma)	[m ²]	600	600	600
Volume	[m ³]	1000	1000	1000
S/V		0.600	0.600	0.600
Superficie utile (riscaldata)	[m ²]	100	100	100
PARETI NORD/SUD				
Superficie Totale	[m ²]	100	100	100
Superficie Opaca	[m ²]	85	70	40
Superficie Trasparente	[m ²]	15	30	60
PARETI EST/OVEST				
Superficie Totale	[m ²]	100	100	100
Superficie Opaca	[m ²]	85	70	40
Superficie Trasparente	[m ²]	15	30	60
SOLAIO DI CALPESTIO				
Superficie Totale	[m ²]	100	100	100
Massa Frontale	[kg/m ²]	551.80	551.80	551.80
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.362	0.362	0.362
SOLAIO DI COPERTURA				
Superficie Totale	[m ²]	100	100	100
Massa Frontale	[kg/m ²]	556.20	556.20	556.20
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.322	0.322	0.322

Tabella 2 - EDIFICIO B e relative caratteristiche

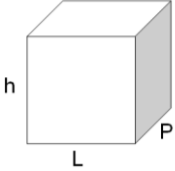
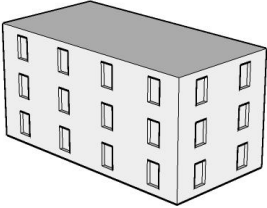
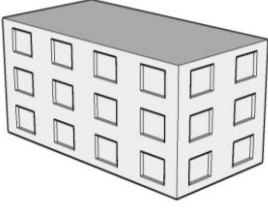
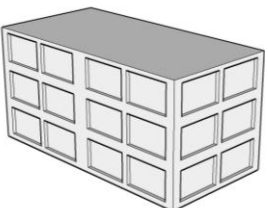
Dati	Unità di misura	Finestratura 15%	Finestratura 30%	Finestratura 60%
				
Altezza (h)	[m]	10	10	10
Lunghezza (L)	[m]	10	10	10
Profondità (P)	[m]	20	20	20
Trasmittanza parete	[W/m ² K]	0.326	0.326	0.326
Massa Frontale	[kg/m ²]	379	379	379
Trasmittanza infissi	[W/m ² K]	2.29	2.29	2.29
Superficie totale (per fattore di forma)	[m ²]	1000	1000	1000
Volume	[m ³]	2000	2000	2000
S/V		0.500	0.500	0.500
Superficie utile (riscaldata)	[m ²]	200	200	200
PARETI NORD/SUD				
Superficie Totale	[m ²]	100	100	100
Superficie Opaca	[m ²]	85	70	40
Superficie Trasparente	[m ²]	15	30	60
PARETI EST/OVEST				
Superficie Totale	[m ²]	200	200	200
Superficie Opaca	[m ²]	170	140	80
Superficie Trasparente	[m ²]	30	60	120
SOLAIO DI CALPESTIO				
Superficie Totale	[m ²]	200	200	200
Massa Frontale	[kg/m ²]	551.80	551.80	551.80
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.362	0.362	0.362
SOLAIO DI COPERTURA				
Superficie Totale	[m ²]	200	200	200
Massa Frontale	[kg/m ²]	556.20	556.20	556.20
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.322	0.322	0.322

Tabella 3 - EDIFICIO C e relative caratteristiche

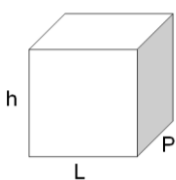
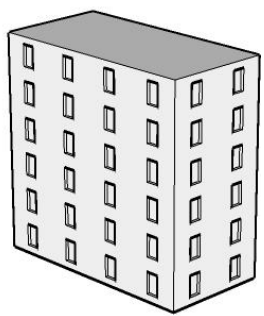
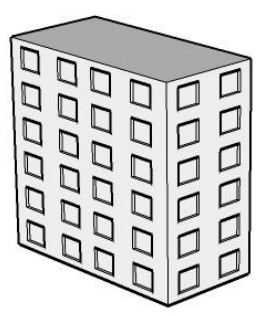
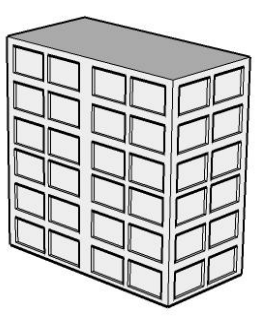
Dati	Unità di misura	Finestratura 15%	Finestratura 30%	Finestratura 60%
				
Altezza (h)	[m]	20	20	20
Lunghezza (L)	[m]	10	10	10
Profondità (P)	[m]	20	20	20
Trasmittanza parete	[W/m ² K]	0.326	0.326	0.326
Massa Frontale	[kg/m ²]	379	379	379
Trasmittanza infissi	[W/m ² K]	2.29	2.29	2.29
Superficie totale (per fattore di forma)	[m ²]	1600	1600	1600
Volume	[m ³]	4000	4000	4000
S/V		0.4	0.4	0.4
Superficie utile (riscaldata)	[m ²]	200	200	200
PARETI NORD/SUD				
Superficie Totale	[m ²]	200	200	200
Superficie Opaca	[m ²]	170	140	80
Superficie Trasparente	[m ²]	30	60	120
PARETI EST/OVEST				
Superficie Totale	[m ²]	400	400	400
Superficie Opaca	[m ²]	340	280	160
Superficie Trasparente	[m ²]	60	120	240
SOLAIO DI CALPESTIO				
Superficie Totale	[m ²]	200	200	200
Massa Frontale	[kg/m ²]	551.80	551.80	551.80
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.362	0.362	0.362
SOLAIO DI COPERTURA				
Superficie Totale	[m ²]	200	200	200
Massa Frontale	[kg/m ²]	556.20	556.20	556.20
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.322	0.322	0.322

Tabella 4 - EDIFICIO D e relative caratteristiche

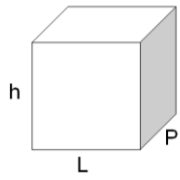

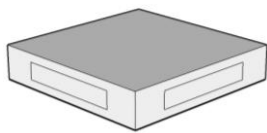
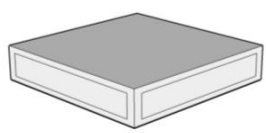
Dati	Unità di misura	Finestratura 15%	Finestratura 30%	Finestratura 60%
				
Altezza (h)	[m]	10	10	10
Lunghezza (L)	[m]	50	50	50
Profondità (P)	[m]	50	50	50
Trasmittanza parete	[W/m ² K]	0.326	0.326	0.326
Massa Frontale	[kg/m ²]	379	379	379
Trasmittanza infissi	[W/m ² K]	2.29	2.29	2.29
Superficie totale (per fattore di forma)	[m ²]	7000	7000	7000
Volume	[m ³]	25000	25000	25000
S/V		0.28	0.28	0.28
Superficie utile (riscaldata)	[m ²]	2500	2500	2500
PARETI NORD/SUD				
Superficie Totale	[m ²]	500	500	500
Superficie Opaca	[m ²]	425	350	200
Superficie Trasparente	[m ²]	75	150	300
PARETI EST/OVEST				
Superficie Totale	[m ²]	500	500	500
Superficie Opaca	[m ²]	425	350	200
Superficie Trasparente	[m ²]	75	150	300
SOLAIO DI CALPESTIO				
Superficie Totale	[m ²]	2500	2500	2500
Massa Frontale	[kg/m ²]	551.80	551.80	551.80
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.362	0.362	0.362
SOLAIO DI COPERTURA				
Superficie Totale	[m ²]	2500	2500	2500
Massa Frontale	[kg/m ²]	556.20	556.20	556.20
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.322	0.322	0.322

Tabella 5 - Caratteristiche strutturali parete esterna

	s	λ	λ	ρ	Massa frontale	Resistenza	hi	he	Trasmittanza
Unita di misura	[m]	[W/m ² K]	[KJ/hm ² K]	[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[m ² K/W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Intonaco interno	0.02	0.700	2.52	1400.00	28.00	0.029	7.70		
Forato	0.08	0.590	2.12	1600.00	128.00	0.136			
Isolante	0.05	0.040	0.14	30.00	1.50	1.250			
Barriera al vapore	0.06	0.048	0.17	33.00	1.98	1.250			
Forato	0.12	0.590	2.12	1600.00	192.00	0.203			
Intonaco esterno	0.02	0.700	2.52	1400.00	28.00	0.029		25.00	
Totale	0.35				379.48	3.04			0.329

Tabella 6 - Caratteristiche strutturali solaio calpestio

	s	λ	λ	ρ	Massa frontale	Resistenza	hi	he	Trasmittanza
Unita di misura	[m]	[W/mK]	[KJ/hmK]	[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[m ² K/W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Piastrella porcellana	0.020	1.000	3.600	2300.00	46.00	0.020	7.70		
Allettamento cls	0.040	1.480	5.328	2200.00	88.00	0.027			
Malta cementizia di sottofondo	0.060	1.400	5.040	2000.00	120.00	0.043			
Isolante	0.070	0.032	0.115	40.00	2.800	2.188			
Solaio laterocemento	0.220	0.667	2.400	1800.00	267.00	0.330			
Intonaco	0.020	0.700	2.520	1400.00	28.00	0.029		25	
Totale	0.430				551.80	2.766			0.362

Tabella 7 - Caratteristiche strutturali solaio di copertura

	s	λ	λ	ρ	Massa frontale	Resistenza	hi	he	Trasmittanza
Unita di misura	[m]	[W/mK]	[KJ/hmK]	[Kg/m ³]	[Kg/m ²]	[m ² K/W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Intonaco	0.02	0.700	2.52	1400.00	28.00	0.03	7.7		
Solaio laterocemento	0.22	0.667	2.40	1800	267.0	0.330			
Isolante	0.08	0.032	0.12	40.00	3.20	2.50			
Malta cementizia di sottofondo	0.06	1.400	5.04	2000.00	120.00	0.04			
Allettamento cls	0.030	1.480	5.33	2200.000	66	0.020			
Pavimento cls	0.030	1.910	6.88	2400	72	0.016		25	
Totale	0.440				556.20	3.107			0.322





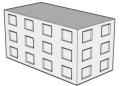




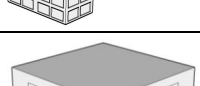

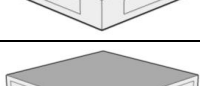
Tabella 8 - Caratteristiche superficie trasparente

	Spessore telaio	Uf	Ug	Uw
Unita di misura	[m]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ²]
Valore	0.1	1.9	2.450	2.290

Risultati

Sono stati confrontati, per tutte e tre località, gli output riguardanti i fabbisogni di riscaldamento invernale e di condizionamento estivo, l'andamento delle temperature all'interno dell'edificio e gli scambi di calore dovuti alla ventilazione e ai guadagni solari. La seguente tabella rappresenta i 162 casi simulati.

Tabella 9 – Matrice dei casi simulati

Casi		Energy Plus		Trnsys		ODESSE	
		Vetro %	Località	Vetro %	Località	Vetro %	Località
Edificio A		15	Milano	15	Milano	15	Milano
Edificio A		15	Roma	15	Roma	15	Roma
Edificio A		15	Palermo	15	Palermo	15	Palermo
Edificio A		30	Milano	30	Milano	30	Milano
Edificio A		30	Roma	30	Roma	30	Roma
Edificio A		30	Palermo	30	Palermo	30	Palermo
Edificio A		60	Milano	60	Milano	60	Milano
Edificio A		60	Roma	60	Roma	60	Roma
Edificio A		60	Palermo	60	Palermo	60	Palermo
Edificio B		15	Milano	15	Milano	15	Milano
Edificio B		15	Roma	15	Roma	15	Roma
Edificio B		15	Palermo	15	Palermo	15	Palermo
Edificio B		30	Milano	30	Milano	30	Milano
Edificio B		30	Roma	30	Roma	30	Roma
Edificio B		30	Palermo	30	Palermo	30	Palermo
Edificio B		60	Milano	60	Milano	60	Milano
Edificio B		60	Roma	60	Roma	60	Roma
Edificio B		60	Palermo	60	Palermo	60	Palermo
Edificio C		15	Milano	15	Milano	15	Milano
Edificio C		15	Roma	15	Roma	15	Roma
Edificio C		15	Palermo	15	Palermo	15	Palermo
Edificio C		30	Milano	30	Milano	30	Milano
Edificio C		30	Roma	30	Roma	30	Roma
Edificio C		30	Palermo	30	Palermo	30	Palermo
Edificio C		60	Milano	60	Milano	60	Milano
Edificio C		60	Roma	60	Roma	60	Roma
Edificio C		60	Palermo	60	Palermo	60	Palermo
Edificio D		15	Milano	15	Milano	15	Milano
Edificio D		15	Roma	15	Roma	15	Roma
Edificio D		15	Palermo	15	Palermo	15	Palermo
Edificio D		30	Milano	30	Milano	30	Milano
Edificio D		30	Roma	30	Roma	30	Roma
Edificio D		30	Palermo	30	Palermo	30	Palermo
Edificio D		60	Milano	60	Milano	60	Milano
Edificio D		60	Roma	60	Roma	60	Roma
Edificio D		60	Palermo	60	Palermo	60	Palermo

Milano, Roma e Palermo sono stata scelte come rappresentative delle principali condizioni climatiche del territorio italiano. In base alla classificazione climatica riportata all'interno del D.P.R. 412, per le valutazioni invernali le tre città sono così caratterizzate:

- Milano Linate– 2444 GG di riscaldamento - zona E
- Roma Ciampino– 1415 GG di riscaldamento - zona D
- Palermo Bocca di Falco - 751 GG di riscaldamento - zona B.

Dato il gran numero dei casi simulati, si è scelto di riportare per esteso solo l'analisi comparativa dei risultati ottenuti per la città dotata di condizioni climatiche intermedie (Roma) e di dare poi delle indicazioni sulle altre due località.

I parametri considerati nella comparazione sono riportati nella seguente tabella. Un primo sforzo è stato compiuto nel selezionare gli output da confrontare, che, a seconda dello strumento considerato, presentavano nomi e definizioni differenti.

Tabella 10 – Legenda parametri riportati per le valutazioni comparative

Parametro	Unità di misura	Descrizione
Eload_inv	[kWh/a]	Sensible heating demand of zone
Eload_est	[kWh/a]	Sensible cooling demand of zone
Tmedia	[°C]	Temperatura interna media della zona
Q_vent	[kWh/a]	Sensibile infiltration gain of zone
Q_sol	[kWh/a]	Total shortwave solar radiation transmitted through external windows of zone

Tabella 11 – Risultati simulazioni con Energy Plus (EP)

Energy Plus	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Tmedia EP	Q_vent EP	Q_sol trasm. EP
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_A_15%	14013.91	1814.32	140.14	18.14	14.01	1.81	21.87	10644.90	14600.13
Edificio_A_30%	14500.98	4770.26	145.01	47.70	14.50	4.77	22.31	11233.34	31414.72
Edificio_A_60%	17292.56	8801.19	172.93	88.01	17.29	8.80	22.46	11457.96	65053.67
Edificio_B_15%	25877.34	2692.62	129.39	13.46	12.94	1.35	21.75	21002.00	22173.59
Edificio_B_30%	26539.56	7375.48	132.70	36.88	13.27	3.69	22.20	22175.98	47698.02
Edificio_B_60%	30421.95	14572.99	152.11	72.86	15.21	7.29	22.42	22788.25	98762.14
Edificio_C_15%	47203.47	6946.36	236.02	34.73	11.80	1.74	21.89	42785.40	47698.02
Edificio_C_30%	49459.65	15826.88	247.30	79.13	12.36	3.96	22.24	44690.55	98762.14
Edificio_C_60%	63067.85	29381.32	315.34	146.91	15.77	7.35	22.32	45156.79	200874.99
Edificio_D_15%	256608.97	4824.48	102.64	1.93	10.26	0.19	21.10	247426.44	71854.76
Edificio_D_30%	254313.33	13254.48	101.73	5.30	10.17	0.53	21.41	251775.42	154532.61
Edificio_D_60%	256521.29	35016.93	102.61	14.01	10.26	1.40	21.81	263172.68	319856.91

Tabella 12 – Risultati simulazioni con Trnys (TR)

Trnysys	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Tmedia TR	Q_vent TR	Q_sol trasm. TR
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_A_15%	17237.55	1996.71	172.38	19.97	17.24	2.00	21.82	10484.39	15170.53
Edificio_A_30%	20517.21	5021.99	205.17	50.22	20.52	5.02	22.14	10849.93	30341.06
Edificio_A_60%	28286.85	9833.52	282.87	98.34	28.29	9.83	22.18	10898.77	60682.12
Edificio_B_15%	30605.08	2895.66	153.03	14.48	15.30	1.45	21.72	20774.01	23090.86
Edificio_B_30%	35490.50	7665.83	177.45	38.33	17.75	3.83	22.07	21515.50	46181.73
Edificio_B_60%	47114.66	15717.42	235.57	78.59	23.56	7.86	22.16	21760.78	92363.46
Edificio_C_15%	57092.49	7031.07	285.46	35.16	14.27	1.76	21.80	41765.44	46181.73
Edificio_C_30%	67479.10	16359.24	337.40	81.80	16.87	4.09	22.08	43061.80	92363.46
Edificio_C_60%	91222.22	30703.72	456.11	153.52	22.81	7.68	22.09	43077.72	184726.91
Edificio_D_15%	269650.41	2557.00	107.86	1.02	10.79	0.10	21.10	250524.68	75852.65
Edificio_D_30%	282278.35	11551.26	112.91	4.62	11.29	0.46	21.41	251985.64	151705.29
Edificio_D_60%	314114.88	37307.60	125.65	14.92	12.56	1.49	21.75	258116.87	303410.58

Tabella 13 – Risultati simulazioni con ODESSE (OD)

ODESSE	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Tmedia OD	Q_vent OD	Q_sol trasm. OD
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_A_15%	14160.11	1947.98	141.60	19.48	14.16	1.95	22.22	10911.06	14847.85
Edificio_A_30%	16070.72	3255.33	160.71	32.55	16.07	3.26	22.83	11694.09	29697.09
Edificio_A_60%	21491.20	8760.79	214.91	87.61	21.49	8.76	23.36	12464.91	59392.78
Edificio_B_15%	25416.71	3460.37	127.08	17.30	12.71	1.73	22.08	21493.92	22588.16
Edificio_B_30%	27705.02	5465.89	138.53	27.33	13.85	2.73	22.65	22906.70	45176.28
Edificio_B_60%	35355.51	13261.32	176.78	66.31	17.68	6.63	23.23	24567.16	90352.56
Edificio_C_15%	47287.43	7568.84	236.44	37.84	11.82	1.89	22.18	43406.23	45176.28
Edificio_C_30%	52452.34	13002.70	262.26	65.01	13.11	3.25	22.71	46103.16	90352.56
Edificio_C_60%	67878.29	35398.40	339.39	176.99	16.97	8.85	23.18	48828.77	180705.9
Edificio_D_15%	241472.56	55228.01	96.59	22.09	9.66	2.21	21.24	254295.76	74242.02
Edificio_D_30%	241478.58	37605.43	96.59	15.04	9.66	1.50	22.65	258062.47	129132.6
Edificio_D_60%	251714.44	46767.85	100.69	18.71	10.07	1.87	22.27	274190.01	296966.9

Fabbisogno energetico invernale

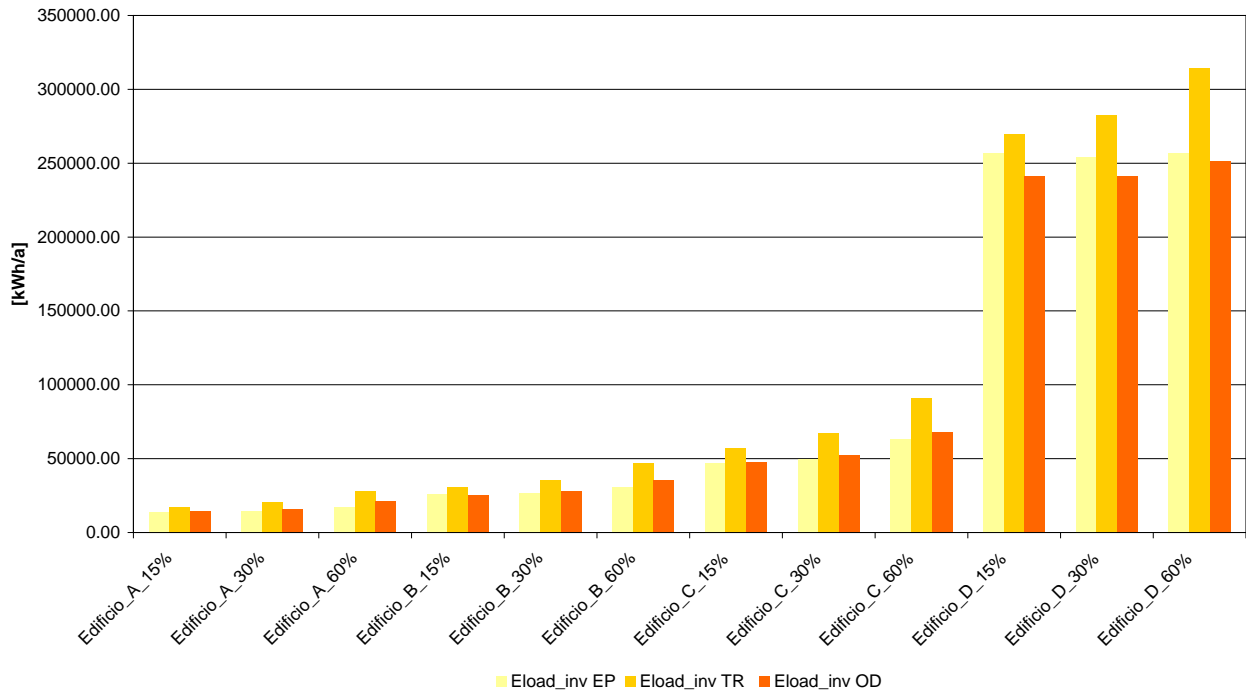


Figura 4 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

Fabbisogno energetico estivo

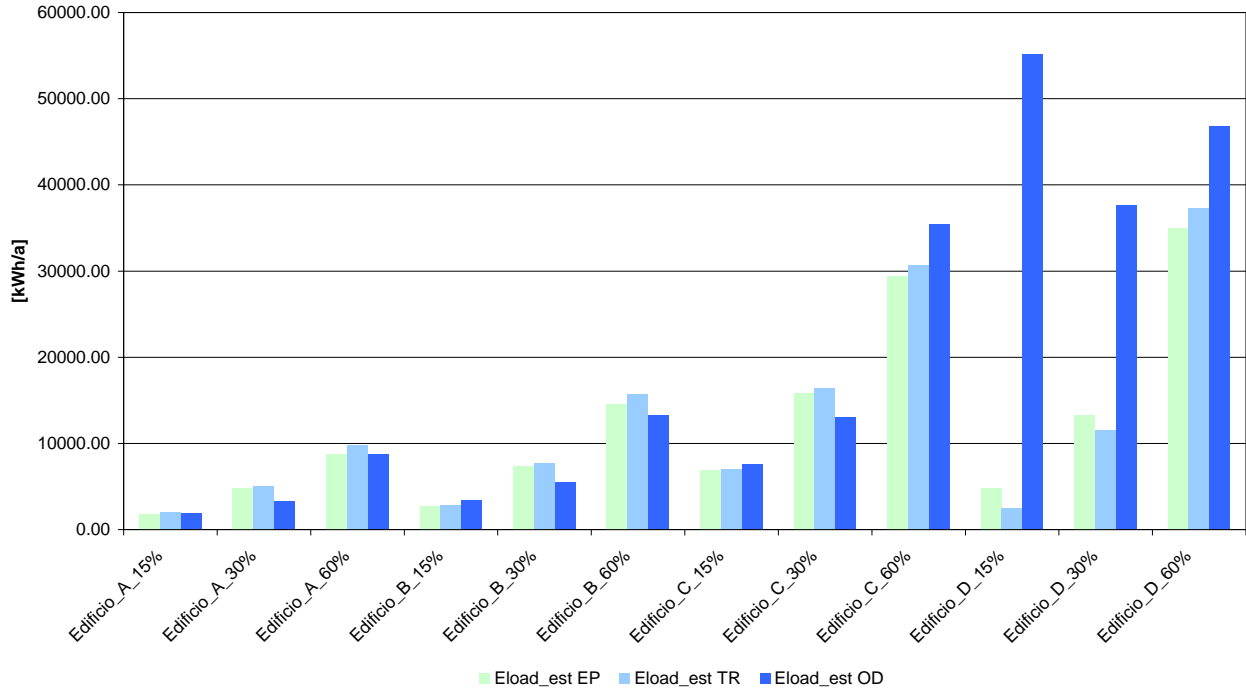


Figura 5 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

Le domande di *heating* e *cooling* sono state valutate senza simulare un sistema di impianto reale, ma, semplicemente ponendo 20°C e 26°C, rispettivamente per la stagione invernale ed estiva, come temperature di progetto dell'aria interna.

In generale, è possibile notare delle differenze contenute nei risultati ottenuti. È possibile fare però alcune osservazioni:

- in inverno, in genere, la domanda di riscaldamento ottenuta con TRNSYS è superiore rispetto a quella ottenuta con Odesse e con Energy Plus. Tale risultato potrebbe essere ricondotto alle routine di calcolo e/o all'adozione di una finestra tratta dalla libreria disponibile e avente proprietà leggermente differenti rispetto a quelle indicate;
- il calcolo della domanda complessiva di *heating* viene effettuato considerando temperature interne sempre uguali o superiori alla temperatura di progetto (20°C) e integrando poi le singole domande solo nella stagione di riscaldamento (differente per le 3 località considerate). In questo modo però, si ha il beneficio di avere l'edificio in realtà già 'carico' all'inizio della stagione di riscaldamento. Tale aspetto potrebbe essere rivisto con l'introduzione di *schedule* di utilizzo degli impianti;
- la domanda complessiva di *cooling* è stata calcolata considerando le domande relative al periodo complementare rispetto a quello di *heating*.
- In estate vi sono differenze vistose rispetto all'edificio D; Odesse non si comporta come gli altri due strumenti e ciò accade con maggiore enfasi al diminuire della componente vetrata.

Fabbisogno energetico invernale

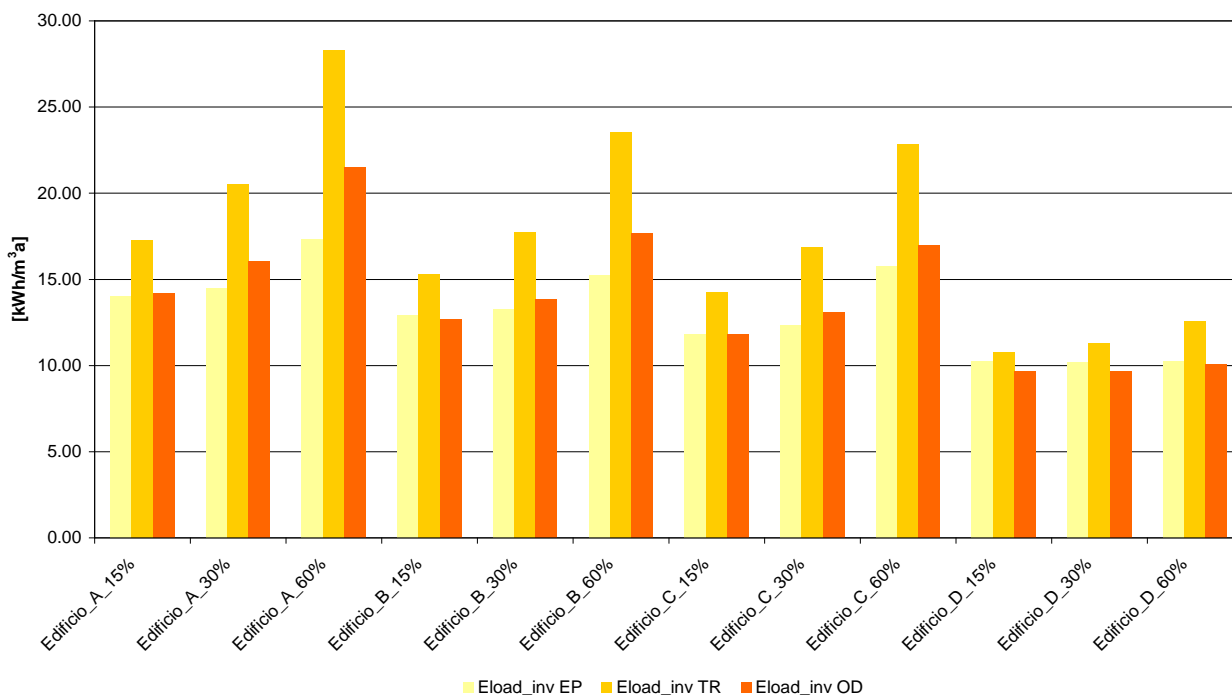


Figura 6 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

Fabbisogno energetico estivo

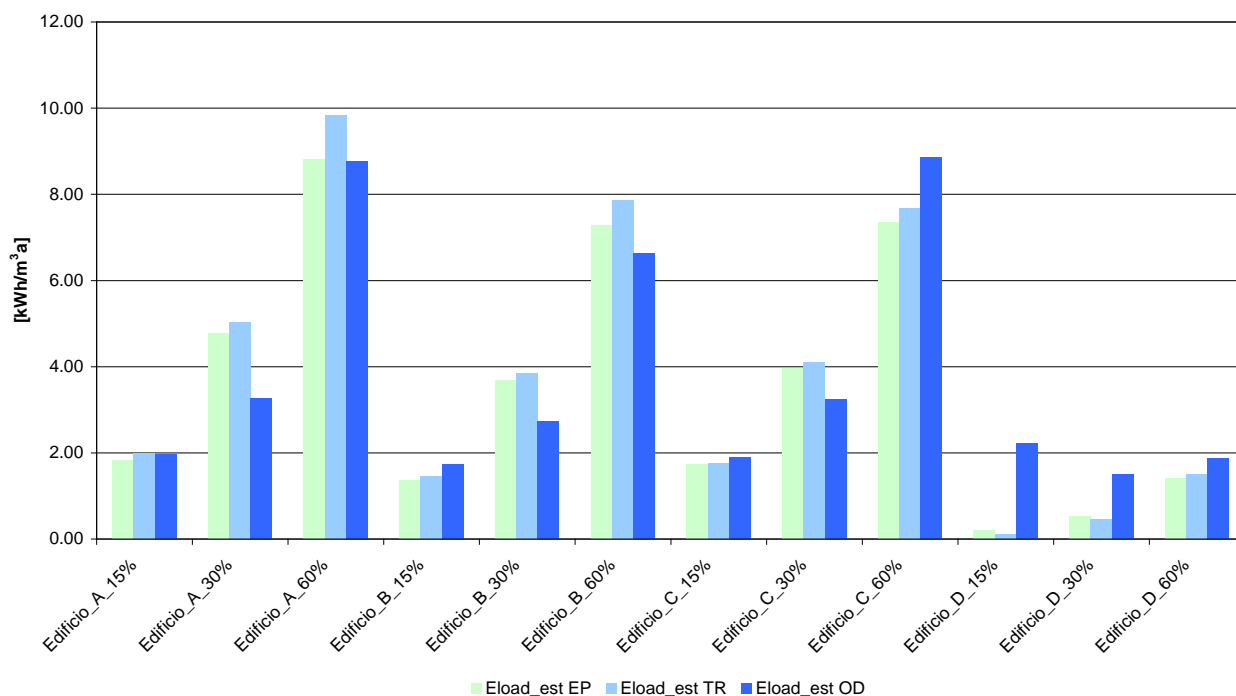


Figura 7 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m³ delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

Temperatura media

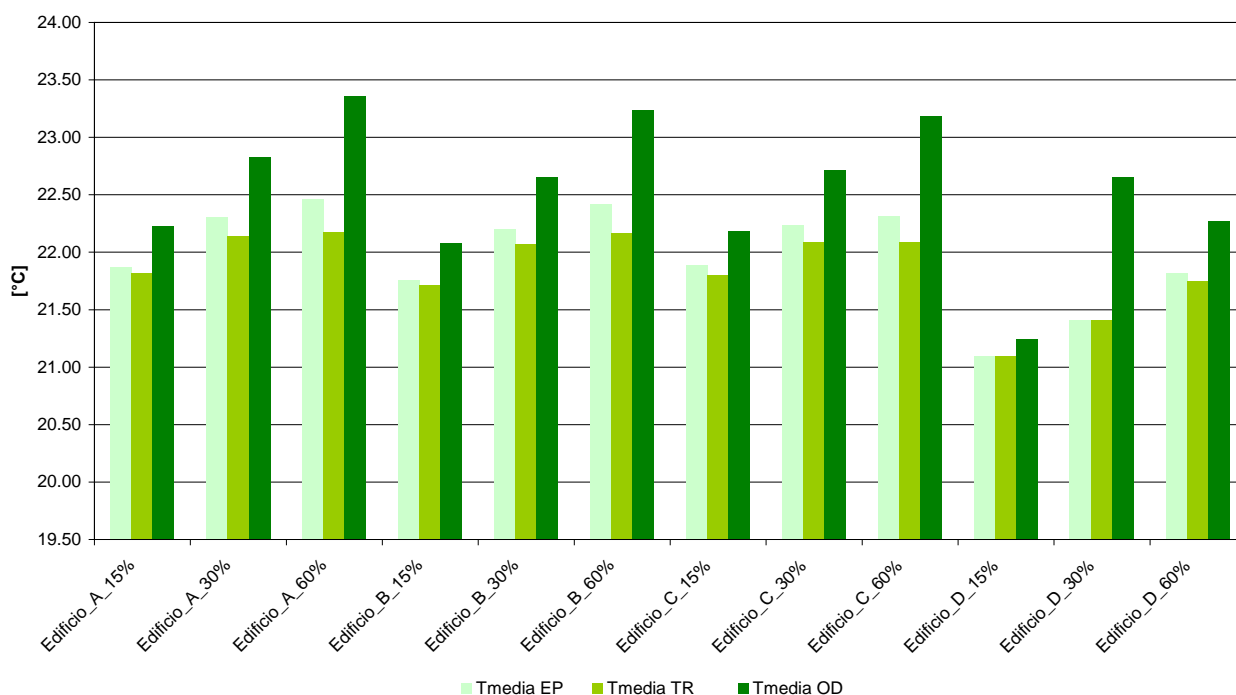


Figura 8 – Temperatura media interna nelle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

L'andamento delle temperature presenta delle incongruenze. In particolare, Odesse rileva delle temperature dell'aria interna superiori rispetto a quelle degli altri due strumenti.

Per la ventilazione naturale e i guadagni solari, i 3 strumenti impiegati forniscono invece risultati del tutto confrontabili in termini di contributo alla domanda termica.

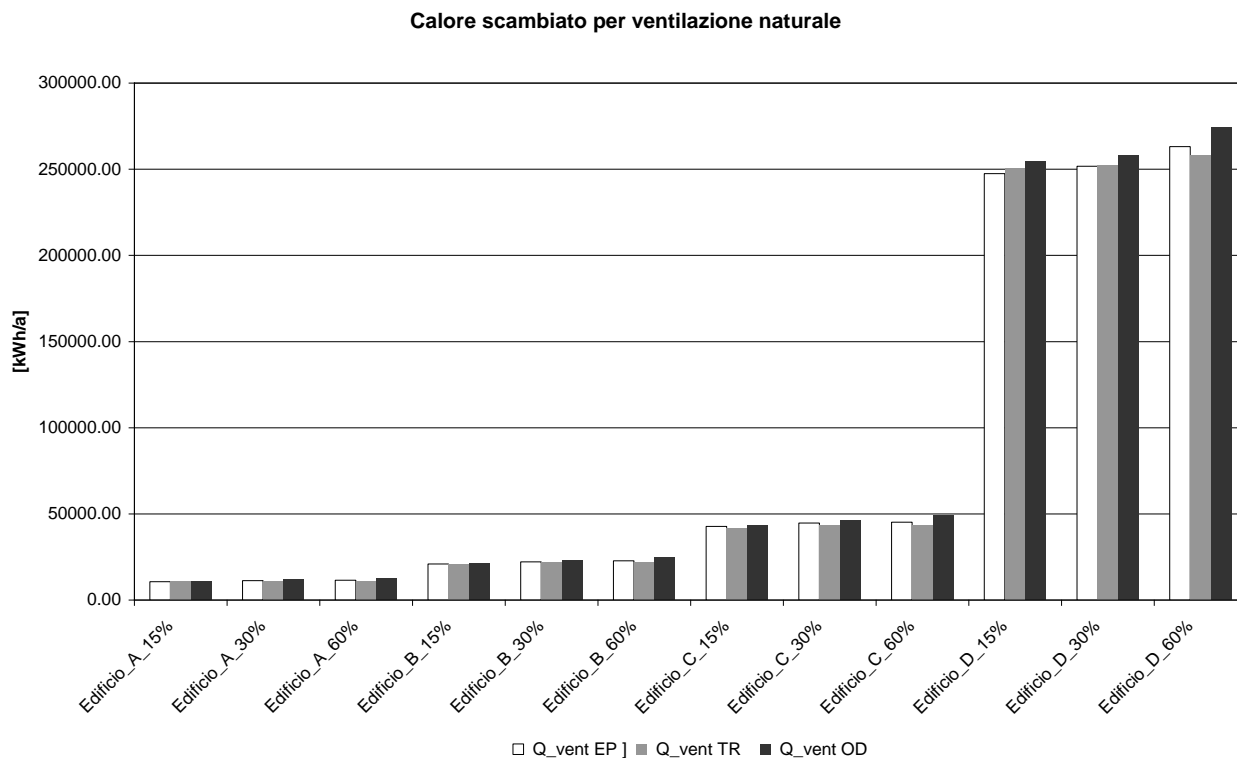


Figura 9 – Confronto tra calore scambiato per ventilazione naturale nelle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

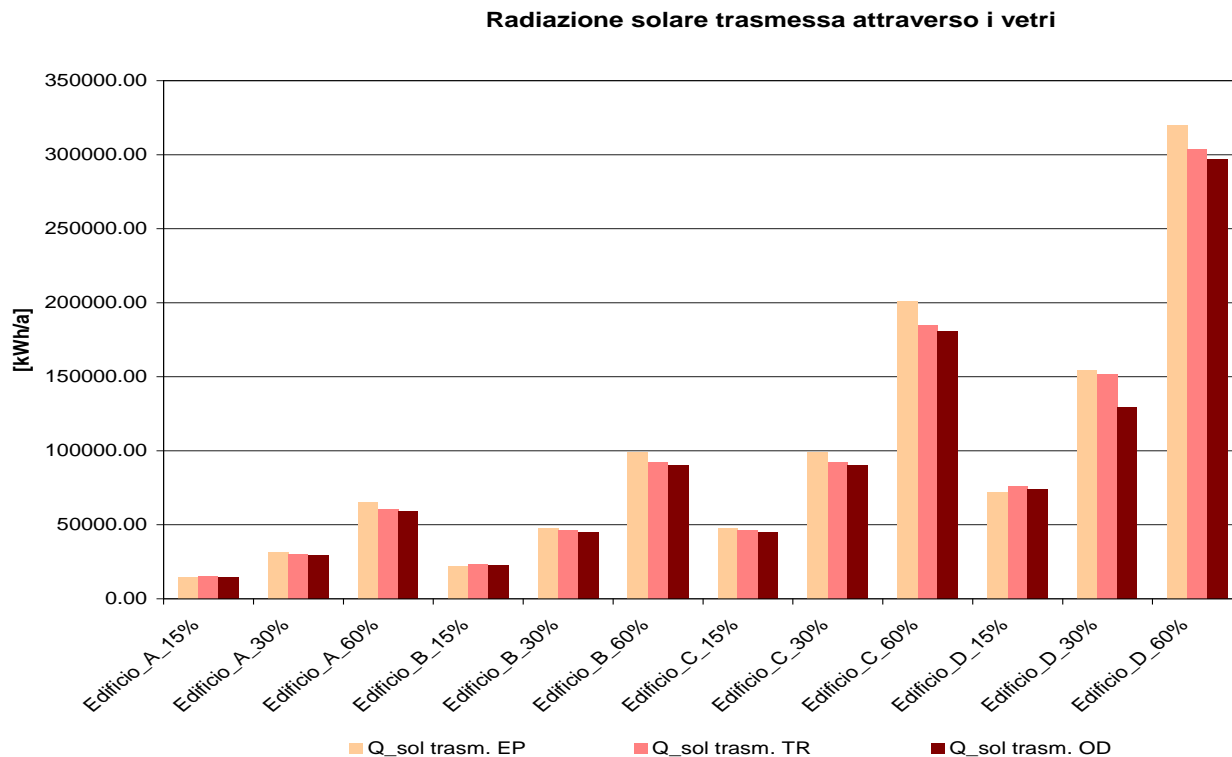


Figura 10 – Confronto tra la radiazione solare attraverso i vetri nelle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

In definitiva, complessivamente è possibile verificare congruenze significative sui risultati ottenuti con i 3 software, in particolare considerando il comportamento degli edifici A, B e C.

Come emerge dai confronti evidenziati nelle tabelle seguenti, l'errore medio tra i risultati delle simulazioni effettuate con i 3 software risulta accettabile se si considerano i tre edifici A, B, C.

In tali casi, è possibile notare che, se confrontato con Energy plus, Odesse tende a sovrastimare la domanda invernale e a sottostimare quella estiva per una località media rappresentativa come Roma. Tale risultato potrebbe dipendere da un modo differente di trattare i guadagni solari (in Odesse il loro effetto sarebbe dunque leggermente sottostimato). Il margine di errore è in ogni caso inferiore al 10% in termini assoluti, pertanto, lo strumento Odesse risulta sicuramente affidabile e comparabile, in termini di prestazioni, con Energy plus.

Invece, sempre in riferimento agli edifici A, B e C per la località, media rappresentativa, di Roma se confrontato con TRNSYS, Odesse tende a sottostimare sia la domanda invernale sia quella estiva. Tale risultato potrebbe dipendere da un modo differente di trattare i guadagni solari, da eventuali lievi differenze nelle prestazioni termofisiche delle finestre inserite ecc. In questo caso, il margine di errore è inferiore al 30% in termini assoluti; lo strumento Odesse risulta quindi comparabile con TRNSYS, ma sarebbero necessari ulteriori approfondimenti per comprendere meglio le possibili cause dell'errore.

Va notato però che, se si confrontano i risultati ottenuti con Energy plus e TRNSYS, si hanno delle differenze notevoli: le domande ricavate con TRNSYS sono maggiori rispetto a quelle ricavate con Energy plus sia in estate che in inverno. La differenza sui casi A, B e C in inverno supera il 37%. Tale risultato potrebbe dipendere da un modo differente di trattare i guadagni solari e da eventuali differenze nelle prestazioni termofisiche dell'involucro, in particolare delle finestre inserite. Come si noterà anche in seguito, TRNSYS presenta in genere dei valori di trasmissione del calore attraverso l'involucro superiori e tale effetto aumenta al crescere della superficie vetrata. In relazione a tale effetto, sarebbero necessari ulteriori approfondimenti per comprendere meglio le possibili cause dell'errore.

Nella tabella successiva vengono riportate le percentuali di errore relative ai risultati.

Tabella 14 – Confronti tra i risultati ottenuti con i tre diversi software; errore calcolato a partire dai dati in kWh/anno per i diversi casi

Edifici	Confronto ODESSE - Energy Plus (OD-EP/OD)		Confronto ODESSE – Trnsys (OD-TR/OD)		Confronto Energy Plus – Trnsys (EP-TR/EP)	
	Eload_inv	Eload_est	Eload_inv	Eload_est	Eload_inv	Eload_est
Edificio_A_15%	1.0%	6.9%	-21.7%	-2.5%	-23.0%	-10.1%
Edificio_A_30%	9.8%	-46.5%	-27.7%	-54.3%	-41.5%	-5.3%
Edificio_A_60%	19.5%	-0.5%	-31.6%	-12.2%	-63.6%	-11.7%
Edificio_B_15%	-1.8%	22.2%	-20.4%	16.3%	-18.3%	-7.5%
Edificio_B_30%	4.2%	-34.9%	-28.1%	-40.2%	-33.7%	-3.9%
Edificio_B_60%	14.0%	-9.9%	-33.3%	-18.5%	-54.9%	-7.9%
Edificio_C_15%	0.2%	8.2%	-20.7%	7.1%	-20.9%	-1.2%
Edificio_C_30%	5.7%	-21.7%	-28.6%	-25.8%	-36.4%	-3.4%
Edificio_C_60%	7.1%	17.0%	-34.4%	13.3%	-44.6%	-4.5%
Edificio_D_15%	-6.3%	91.3%	-11.7%	95.4%	-5.1%	47.0%
Edificio_D_30%	-5.3%	64.8%	-16.9%	69.3%	-11.0%	12.9%
Edificio_D_60%	-1.9%	25.1%	-24.8%	20.2%	-22.5%	-6.5%
Errore medio ed. A-B-C-D	3.8%	10.2%	-25%	6%	-31.3%	-0.2%
Errore medio ed. A-B-C	6.6%	-6.6%	-27%	-13%	-37.4%	-6.2%
Errore medio ed. D	-4.5%	60.4%	-18%	62%	-12.8%	17.8%

Confronto con altre località climatiche: risultati Milano, Roma, Palermo

Per valutare la sensibilità dello strumento Odesse al variare delle caratteristiche climatiche e della tipologia edilizia, sono state effettuate ulteriori simulazioni di confronto assumendo le altre due località climatiche descritte (Milano e Palermo).

Tra i diversi edifici simulati, sono stati selezionati 3 edifici caratterizzati:

- da piccole dimensioni e da una bassa percentuale di superficie vetrata (Edificio A con una percentuale di finestre pari al 15% della superficie laterale complessiva);
- da medie dimensioni e da un'alta percentuale di superficie vetrata (Edificio B con una percentuale di finestre pari al 60% della superficie laterale complessiva);
- da grandi dimensioni e da una percentuale di superficie vetrata di valore medio (Edificio C con una percentuale di finestre pari al 30% della superficie laterale complessiva).

Per il set di edifici indicati, vengono di seguito riportati i risultati ottenuti con i 3 strumenti in riferimento al comportamento sia estivo sia invernale. Oltre alle valutazioni in termini di domanda di *heating* e *cooling*, scambi per ventilazione, guadagni solari e andamento delle temperature medie, sono stati aggiunti anche dei confronti sui picchi di potenza richiesta (domanda oraria massima in estate e in inverno).

In generale, le differenze relative alla stagione estiva vengono confermate e enfatizzate; si ha infatti un'importante sottostima della domanda di *cooling* per il clima di Milano e un'importante sovrastima della domanda di *cooling* per il clima di Palermo. Guardando alle potenze di picco, è possibile notare come Odesse sovrastimi, per tutti i climi, la potenza massima di condizionamento estivo, in particolar modo quella di Palermo⁵. Inoltre, tale effetto si accentua maggiormente per l'edificio A_15%, caratterizzato da piccole dimensioni e da una componente vetrata contenuta.

⁵ È interessante osservare che per i climi di Roma e Milano si hanno dei picchi estivi superiori, in Odesse, nonostante le domande di *cooling* (sempre in Odesse) siano inferiori rispetto a quelle di TRNSYS e Energy Plus.

Edificio A 15%

Tabella 15 – Risultati simulazioni edifici A 15% con Energy Plus (EP)

Energy Plus	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Tmedia EP	Q_vent EP	Q_sol trasm. EP
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_A_15% Milano	24187.13	1022.29	241.87	10.22	24.19	1.02	21.48	14348.49	12618.11
Edificio_A_15% Roma	14013.91	1814.32	140.14	18.14	14.01	1.81	22.16	10644.90	14600.13
Edificio_A_15% Palermo	6701.14	2738.25	67.01	27.38	6.70	2.74	21.43	7320.27	16042.04

Tabella 16 – Risultati simulazioni edifici A 15% con Trnsys (TR)

Trnsys	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Tmedia TR	Q_vent TR	Q_sol trasm. TR
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_A_15% Milano	29031.79	1244.42	290.32	12.44	29.03	1.24	21.43	13906.78	13360.25
Edificio_A_15% Roma	17237.55	1996.71	172.38	19.97	17.24	2.00	21.82	10484.39	15170.53
Edificio_A_15% Palermo	8411.10	3031.38	84.11	30.31	8.41	3.03	22.39	7223.63	16150.29

Tabella 17 – Risultati simulazioni edifici A 15% con ODESSE (OD)

ODESSE	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Tmedia OD	Q_vent OD	Q_sol trasm. OD
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_A_15% Milano	23422.12	622.03	234.22	6.22	23.42	0.62	21.86	14275.57	13062.81
Edificio_A_15% Roma	14160.11	1947.98	141.60	19.48	14.16	1.95	22.22	10911.06	14847.85
Edificio_A_15% Palermo	7173.55	5606.88	71.74	56.07	7.17	5.61	22.83	7727.03	15828.48

Tabella 18 – Confronto tra le potenze di picco potenze di picco invernali e estive degli edifici A 15% simulati per con i tre differenti software

POTENZE DI PICCO	MAX load_inv EP	MAX load_inv TR	MAX load_inv OD	MAX load_est EP	MAX load_est TR	MAX load_est OD
Unità di misura	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
Edificio_A_15% Milano	10.75	13.55	12.13	3.79	5.98	8.45
Edificio_A_15% Roma	8.22	10.58	9.95	4.29	6.64	14.24
Edificio_A_15% Palermo	5.06	6.97	6.38	4.96	7.60	32.89

Fabbisogno energetico invernale

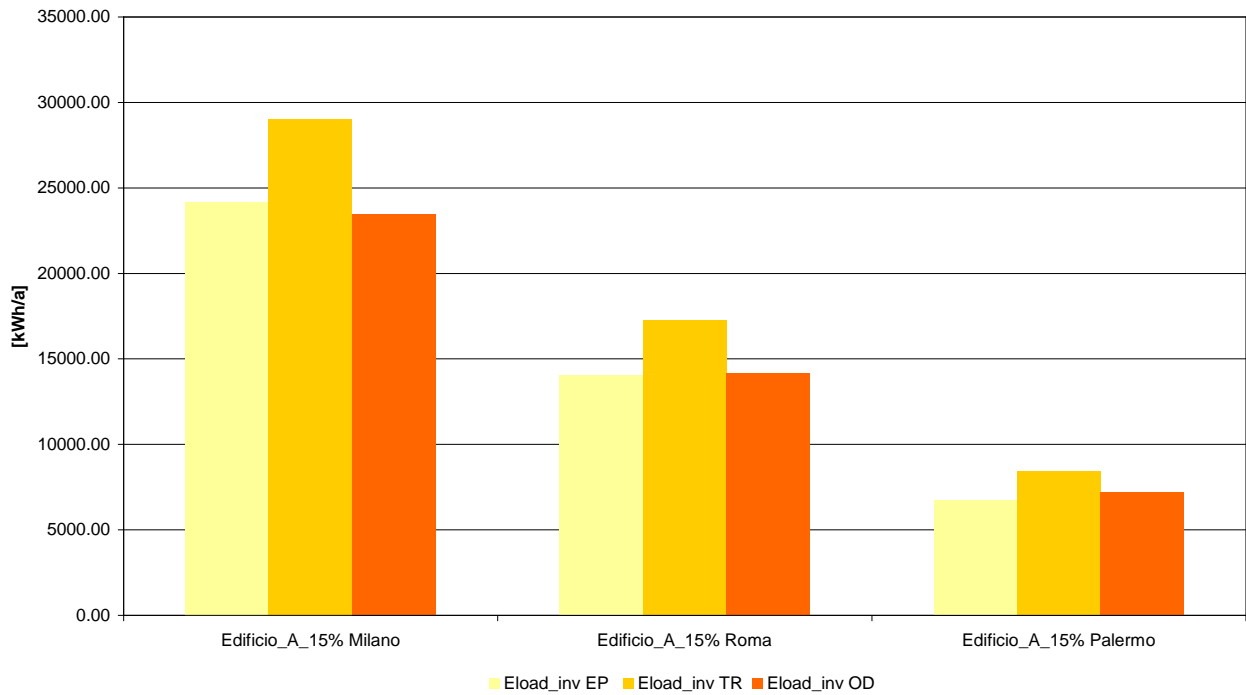


Figura 11 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

Potenza di picco invernale

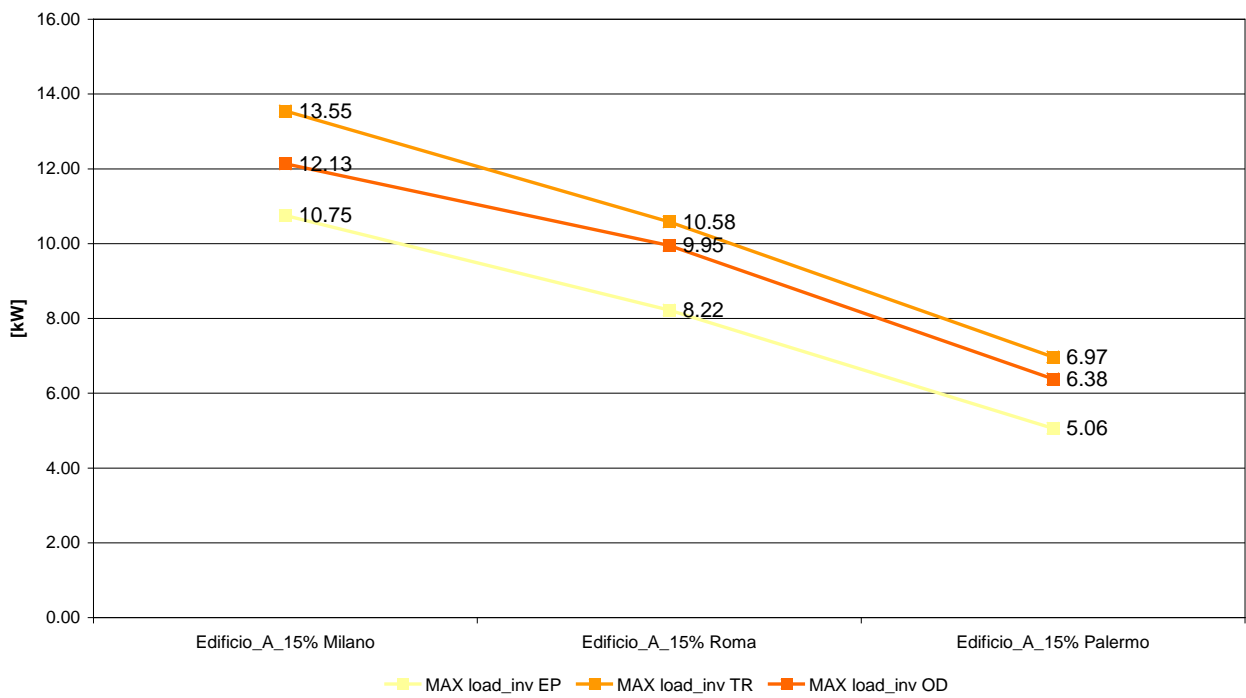


Figura 12 – Confronto tra le potenze di picco invernali degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

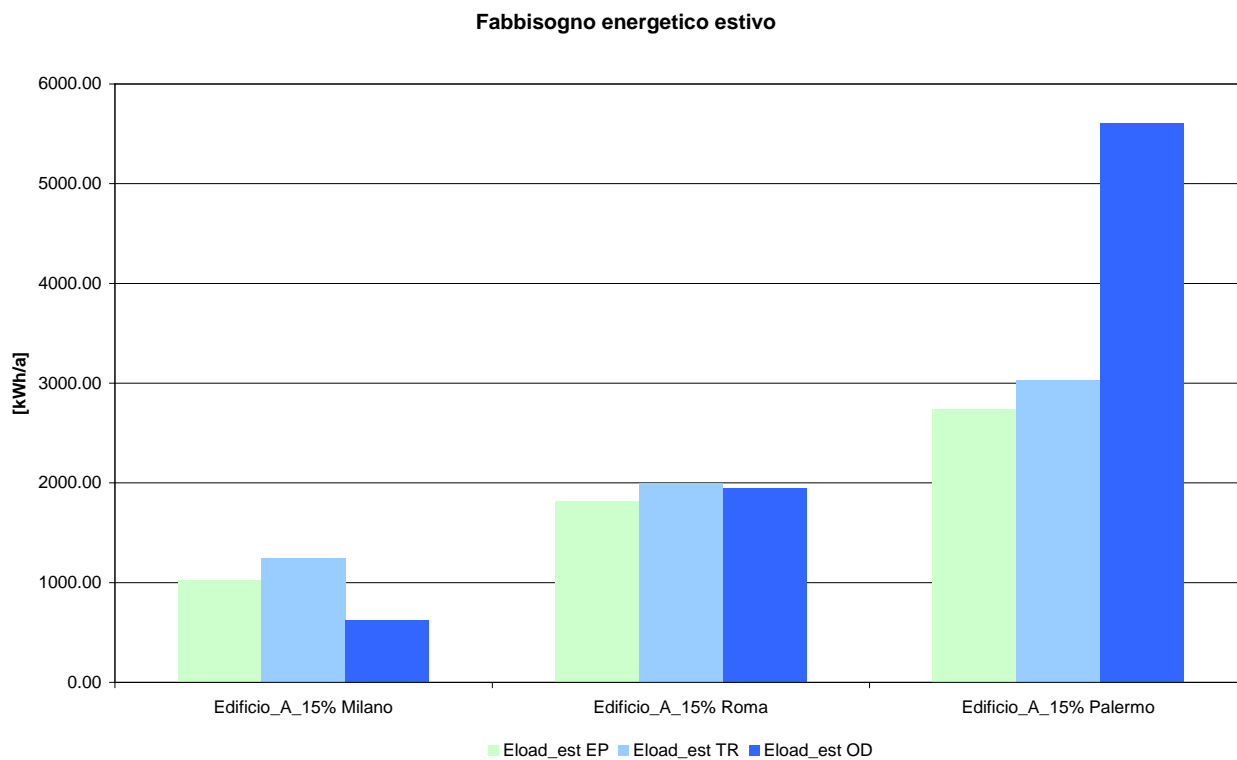


Figura 13 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

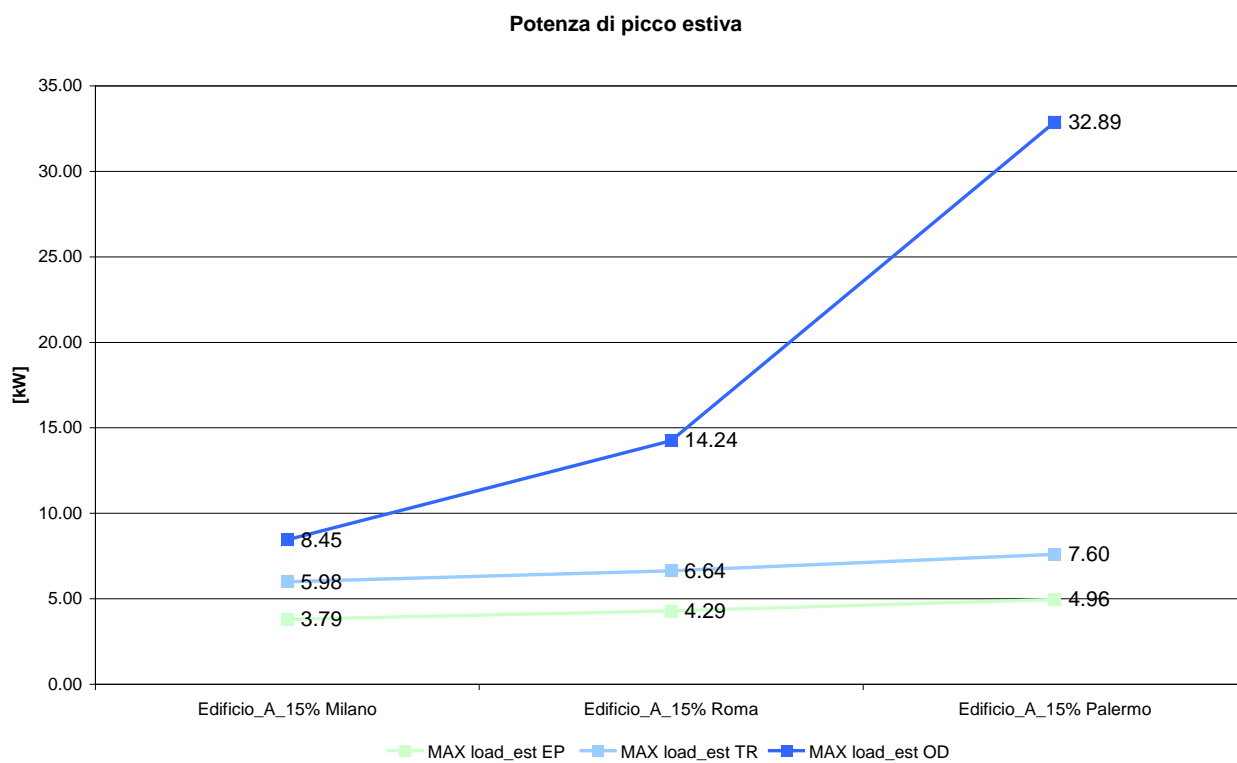


Figura 14 – Confronto tra le potenze di picco estive degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

Fabbisogno energetico invernale

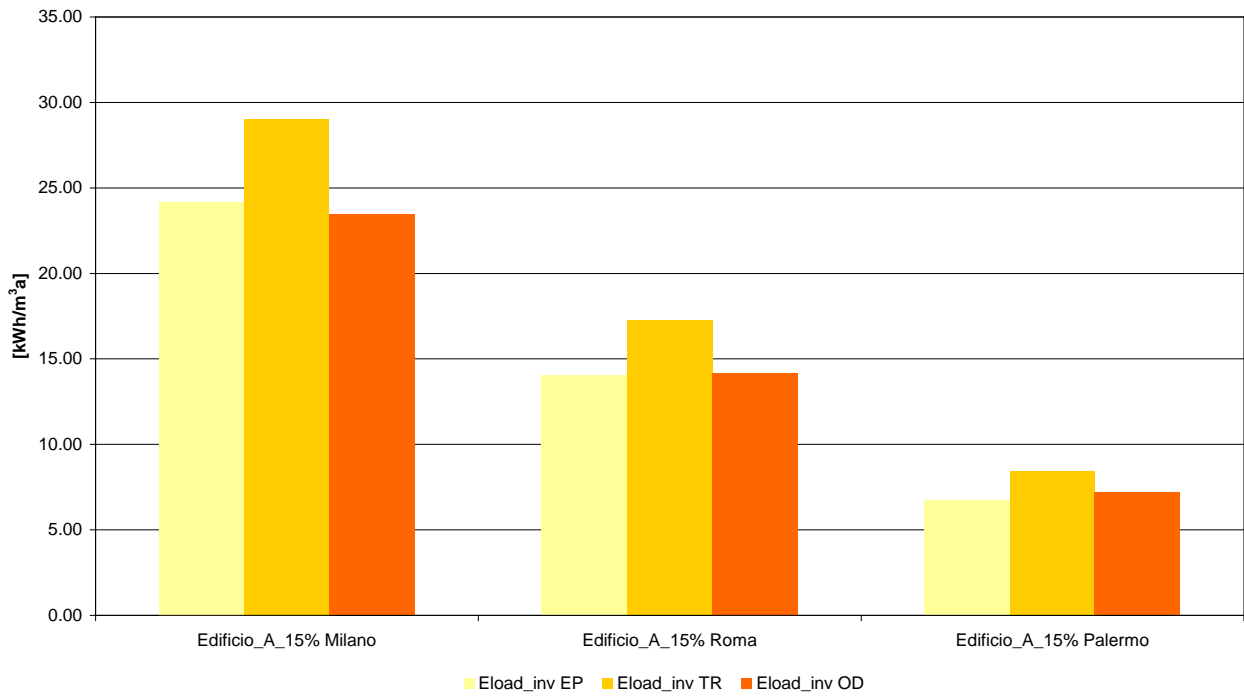


Figura 15 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

Fabbisogno energetico estivo

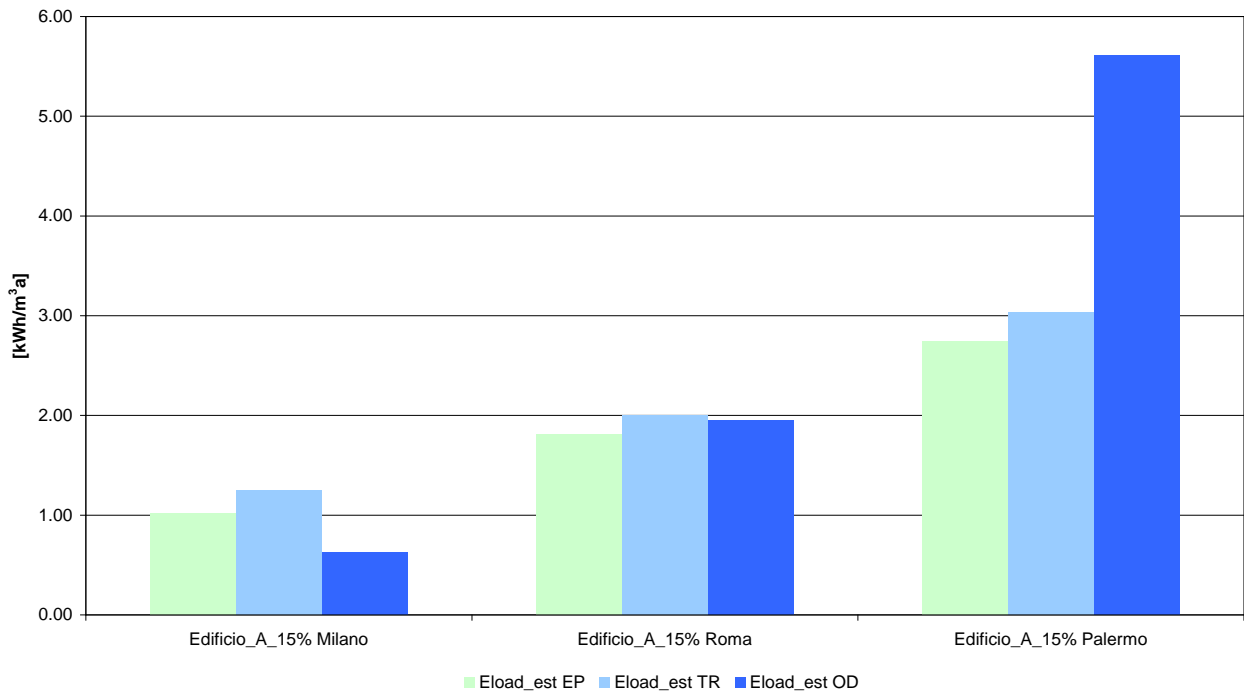


Figura 16 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m³ degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

Temperatura media

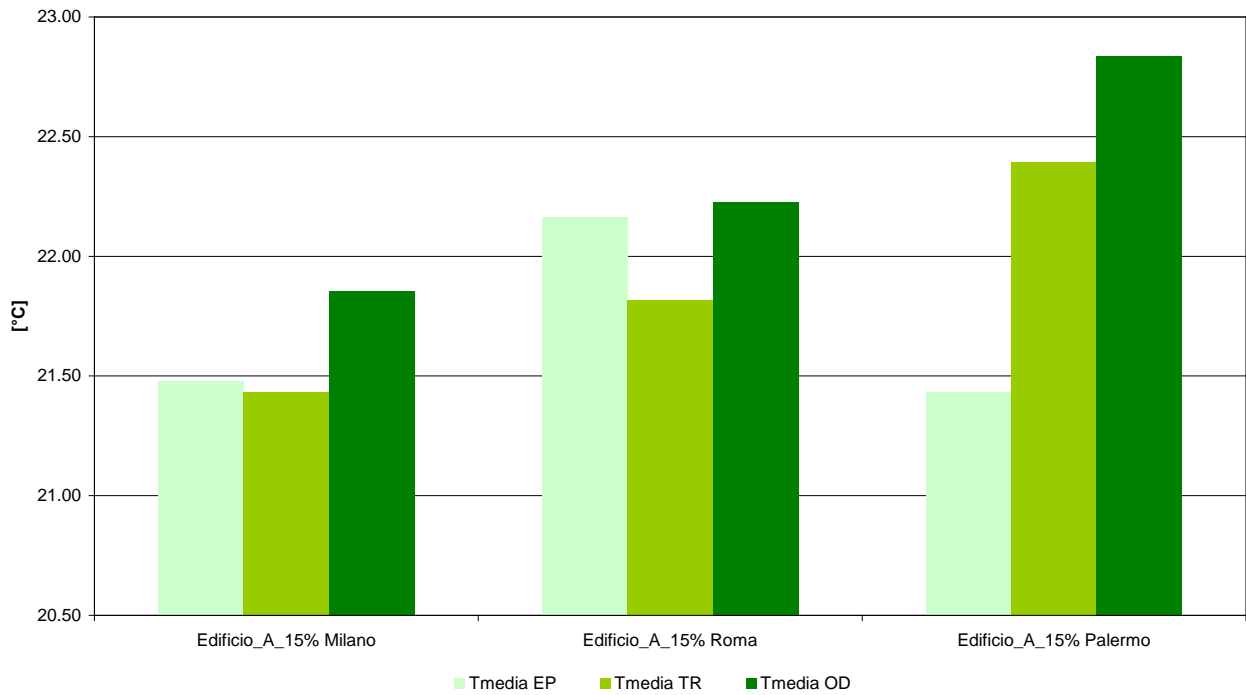


Figura 17 – Temperatura media interna degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

Calore scambiato per ventilazione naturale

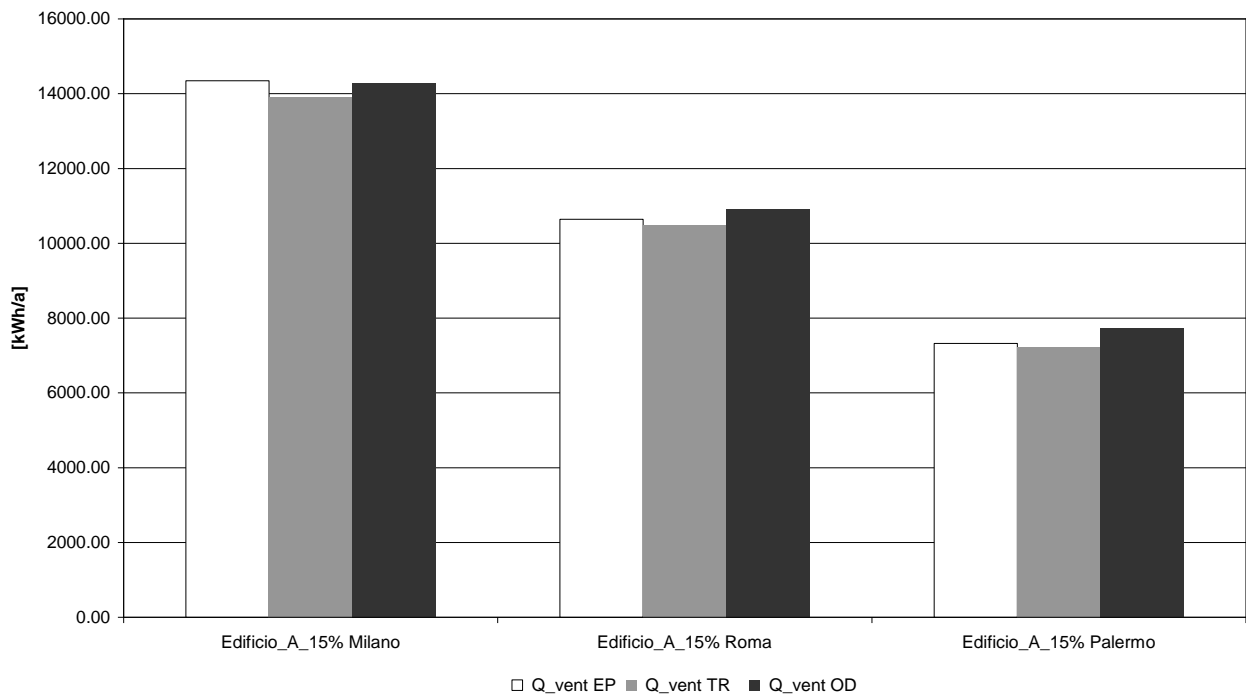


Figura 18 – Confronto tra il calore scambiato per ventilazione naturale negli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

Radiazione solare trasmessa attraverso i vetri

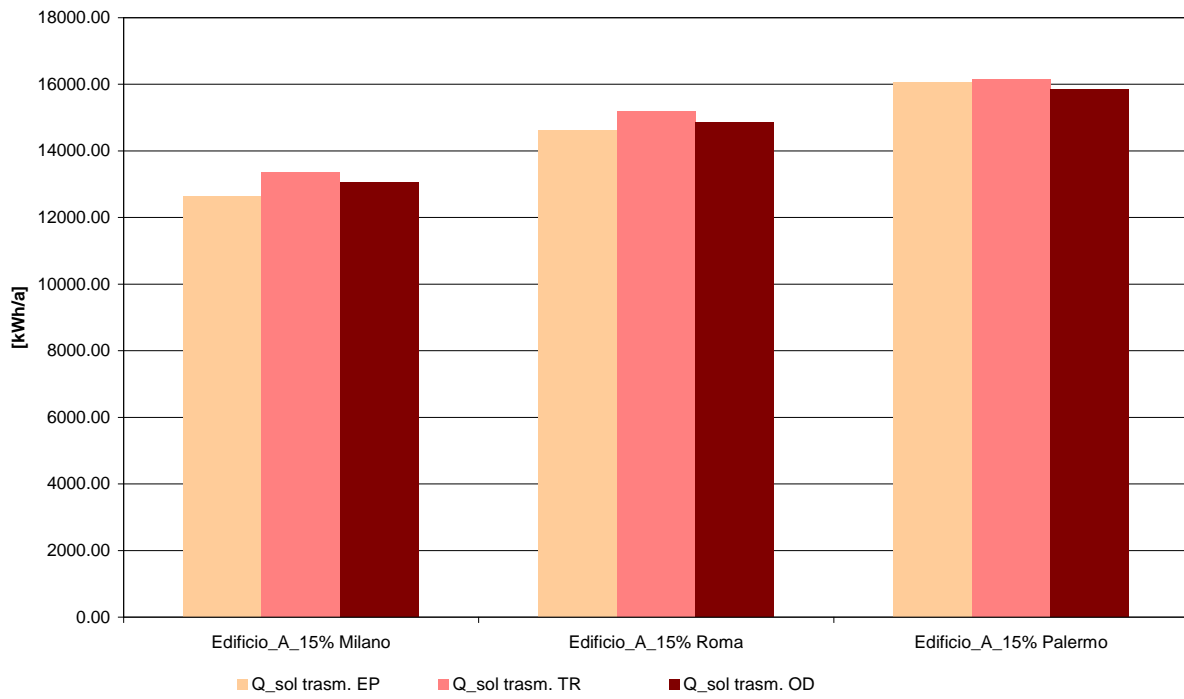


Figura 19 – Confronto tra la radiazione solare attraverso i vetri degli edifici A 15% simulati per Milano, Roma, Palermo

Edificio B 60%

Tabella 19 – Risultati simulazioni edifici B 60% con Energy Plus (EP)

Energy Plus	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Tmedia EP	Q_vent EP	Q_sol trasm. EP
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_B_60% Milano	56435.47	10282.86	282.18	51.41	28.22	5.14	22.00	30170.27	84931.30
Edificio_B_60% Roma	30421.95	14572.99	152.11	72.86	15.21	7.29	22.16	22788.25	98762.14
Edificio_B_60% Palermo	13074.04	19998.17	65.37	99.99	6.54	10.00	23.06	16244.57	109114.64

Tabella 20 – Risultati simulazioni edifici B 60% con Trnsys (TR)

Trnsys	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Tmedia TR	Q_vent TR	Q_sol trasm. TR
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_B_60% Milano	81749.32	11377.17	408.75	56.89	40.87	5.69	21.78	28632.02	80945.62
Edificio_B_60% Roma	47114.66	15717.42	235.57	78.59	23.56	7.86	22.16	21760.78	92363.46
Edificio_B_60% Palermo	22208.38	20804.11	111.04	104.02	11.10	10.40	22.75	15335.89	98866.89

Tabella 21 – Risultati simulazioni edifici B 60% con ODESSE (OD)

ODESSE	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Tmedia OD	Q_vent OD	Q_sol trasm. OD
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_B_60% Milano	56063.24	7376.31	280.32	36.88	28.03	3.69	22.69	30849.58	79111.86
Edificio_B_60% Roma	35355.51	13261.32	176.78	66.31	17.68	6.63	23.23	24567.16	90352.56
Edificio_B_60% Palermo	19470.17	23183.62	97.35	115.92	9.74	11.59	23.92	18460.25	96834.82

Tabella 22 – Confronto tra le potenze di picco potenze di picco invernali e estive degli edifici B 60% simulati per con i tre differenti software

POTENZE DI PICCO	MAX load_inv EP	MAX load_inv TR	MAX load_inv OD	MAX load_est EP	MAX load_est TR	MAX load_est OD
Unità di misura	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
Edificio_B_60% Milano	27.51	39.83	31.51	18.54	26.18	32.94
Edificio_B_60% Roma	21.61	32.18	25.82	19.84	28.60	40.20
Edificio_B_60% Palermo	13.49	20.93	18.02	24.20	31.61	68.13

Fabbisogno energetico invernale

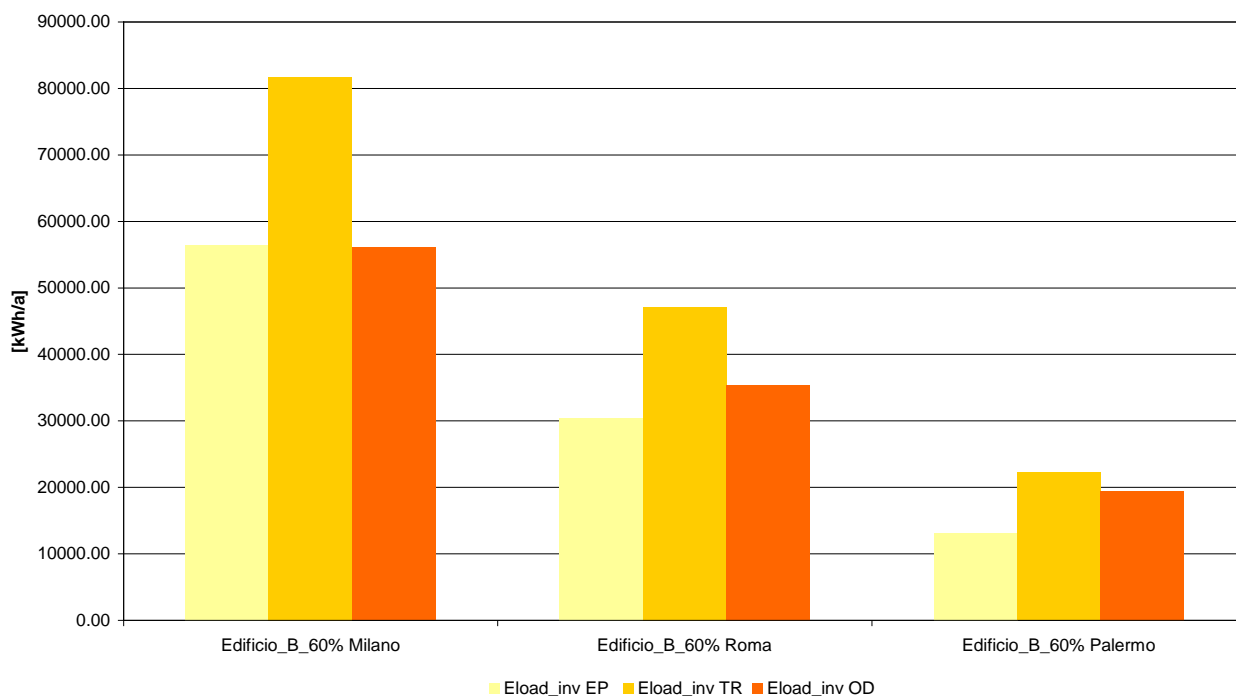


Figura 20 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

Potenza di picco invernale

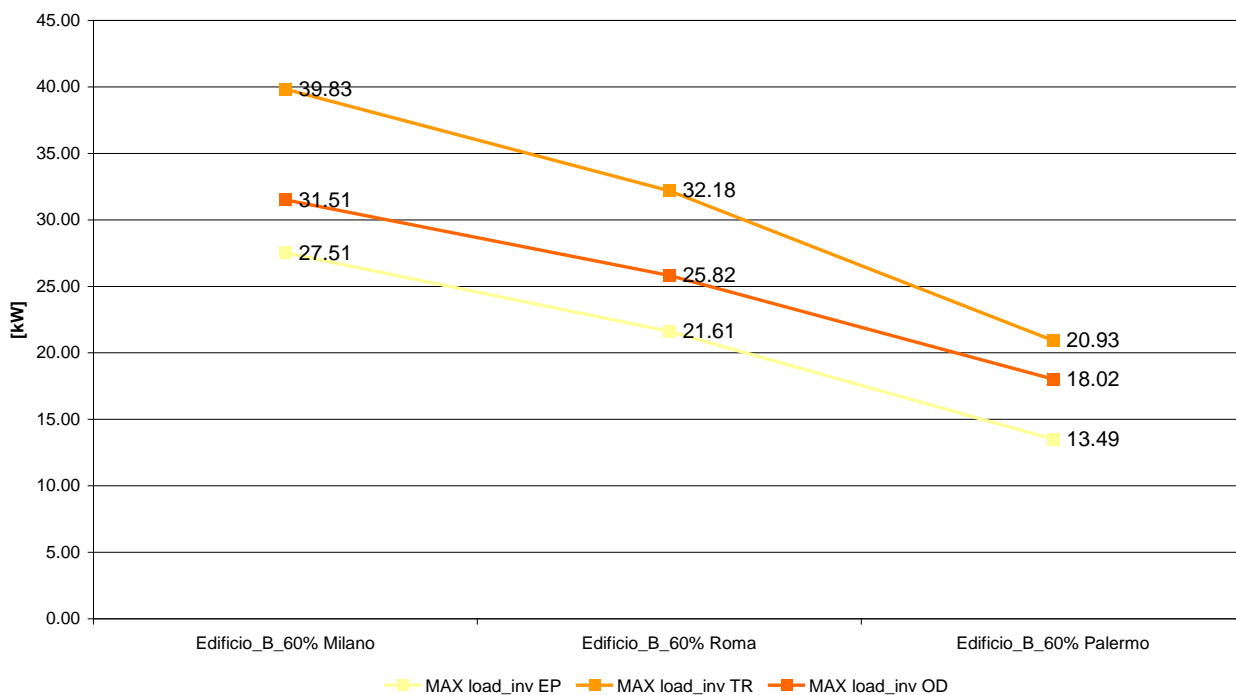


Figura 21 – Confronto tra le potenze di picco invernali degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

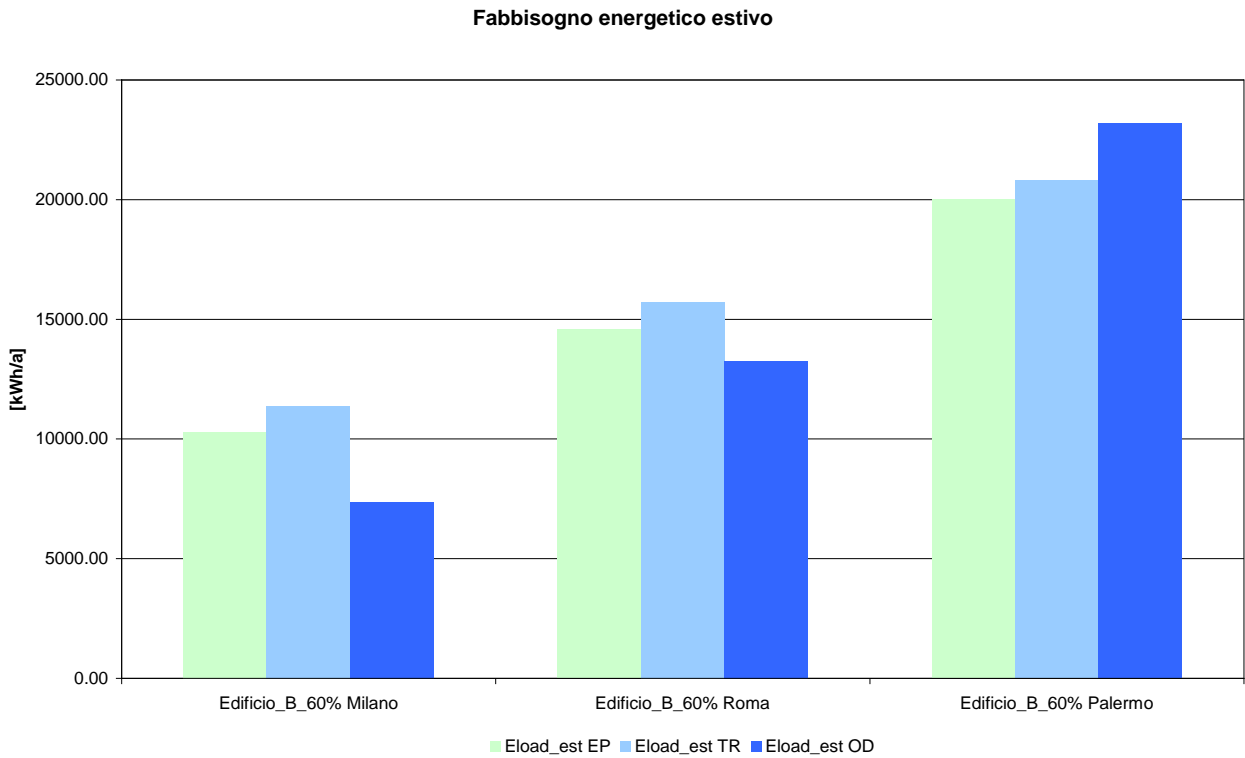


Figura 22 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

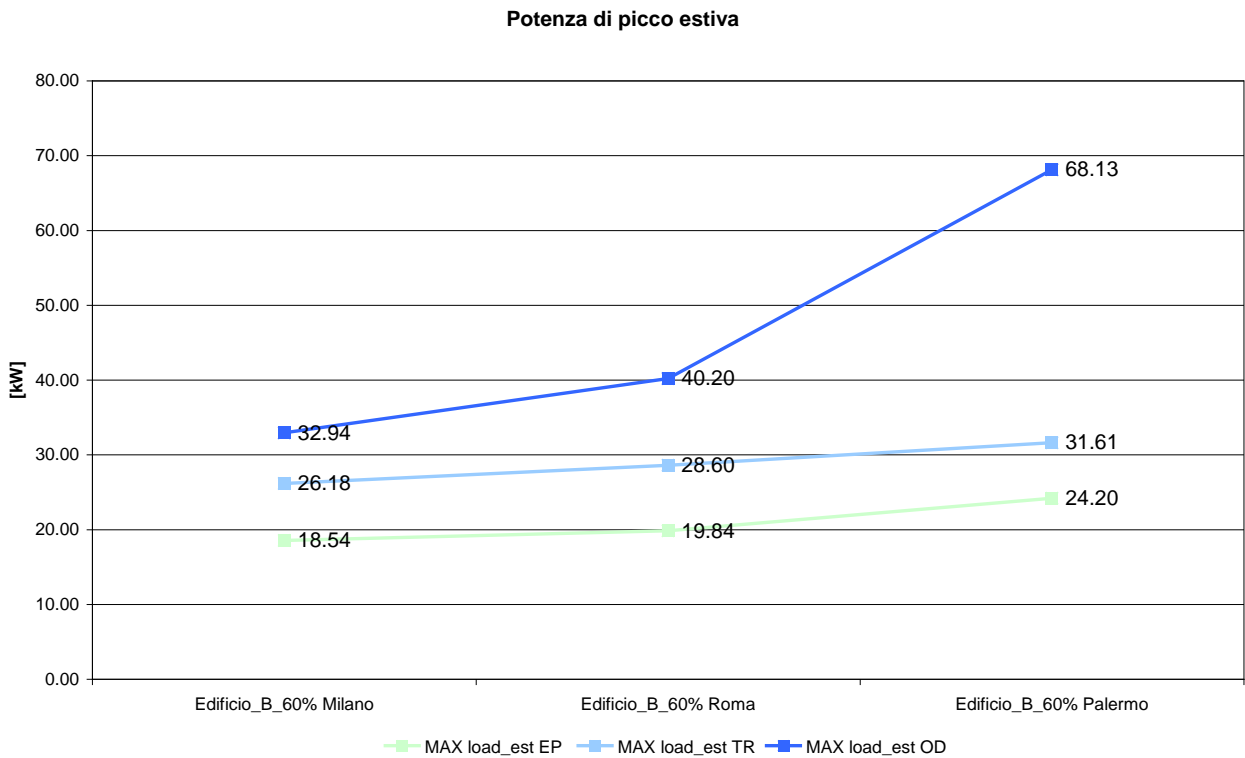


Figura 23 – Confronto tra le potenze di picco estive degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

Fabbisogno energetico invernale

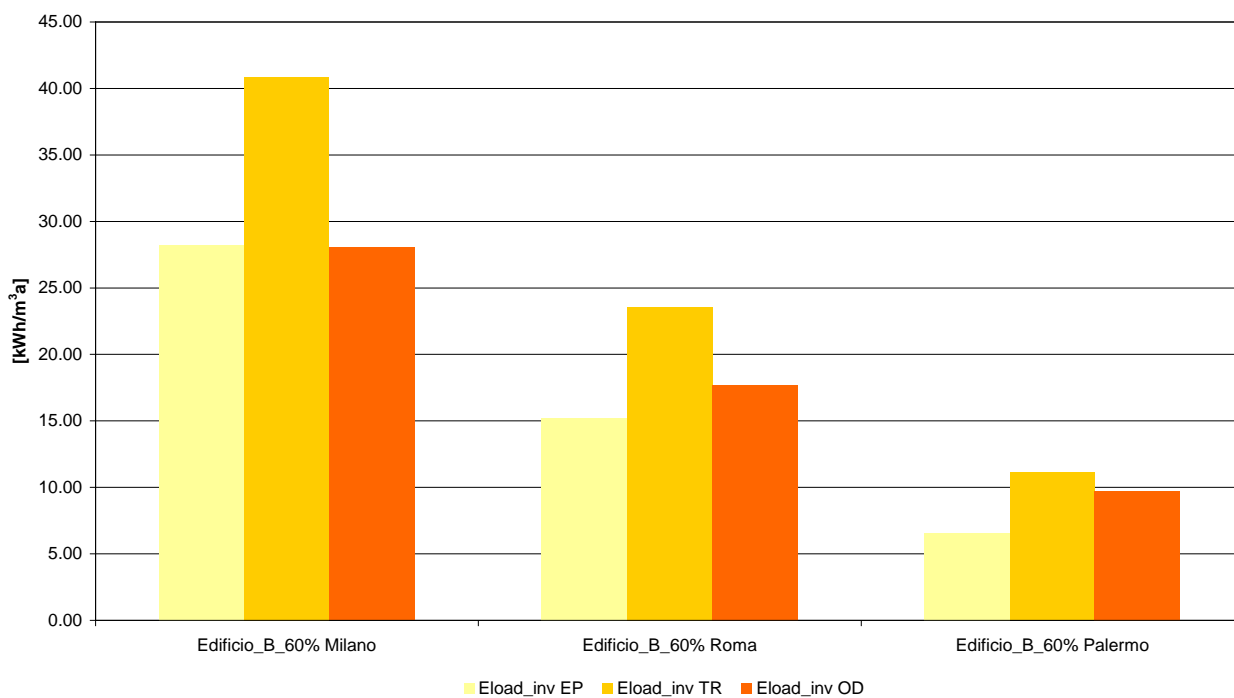


Figura 24 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

Fabbisogno energetico estivo

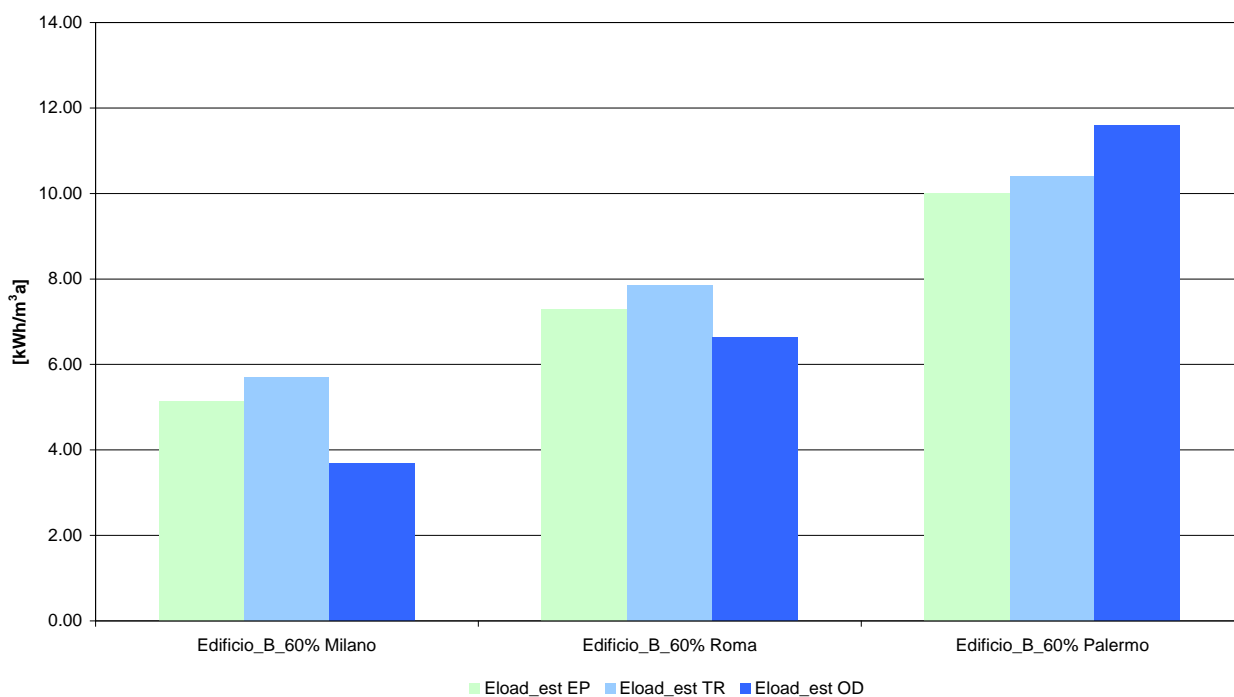


Figura 25 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m³ degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

Temperatura media

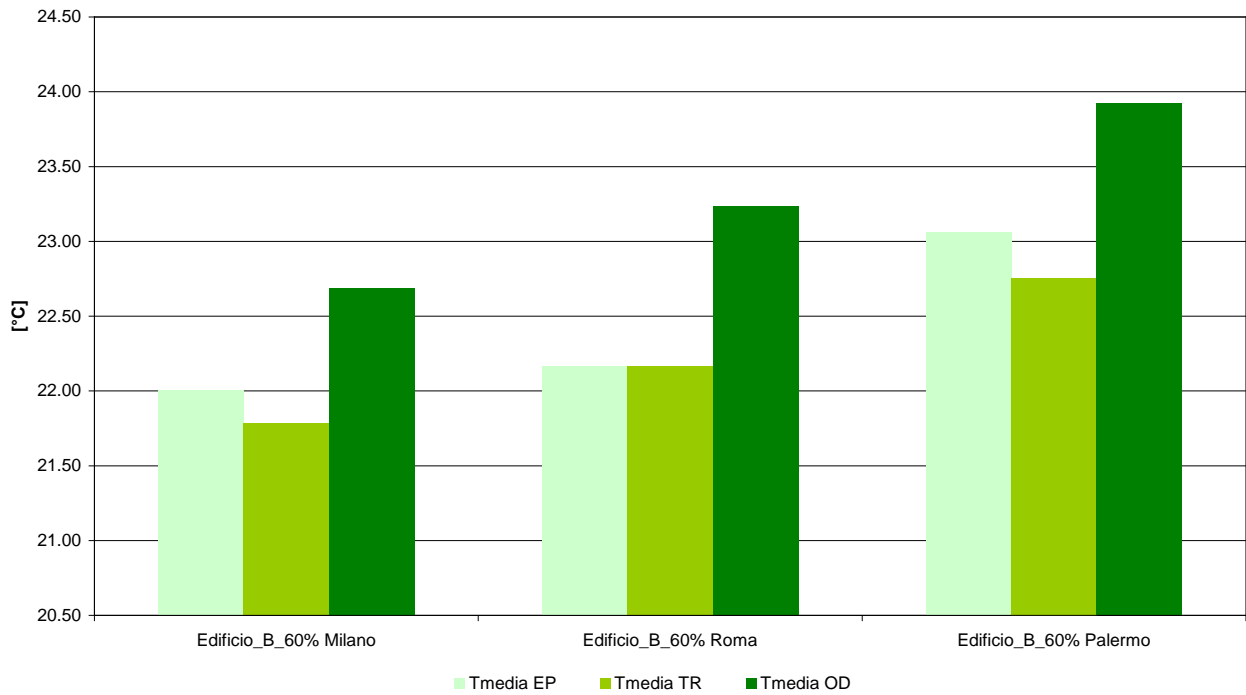


Figura 26 – Temperatura media interna degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

Calore scambiato per ventilazione naturale

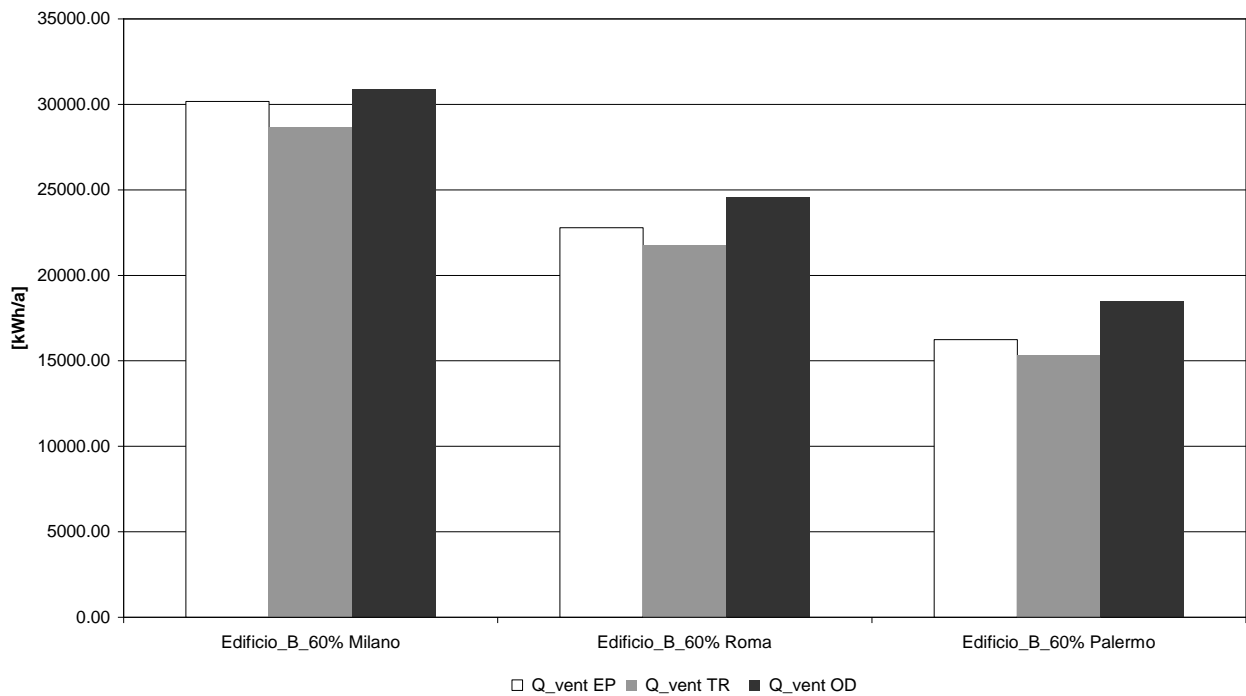


Figura 27 – Confronto tra il calore scambiato per ventilazione naturale negli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

Radiazione solare trasmessa attraverso i vetri

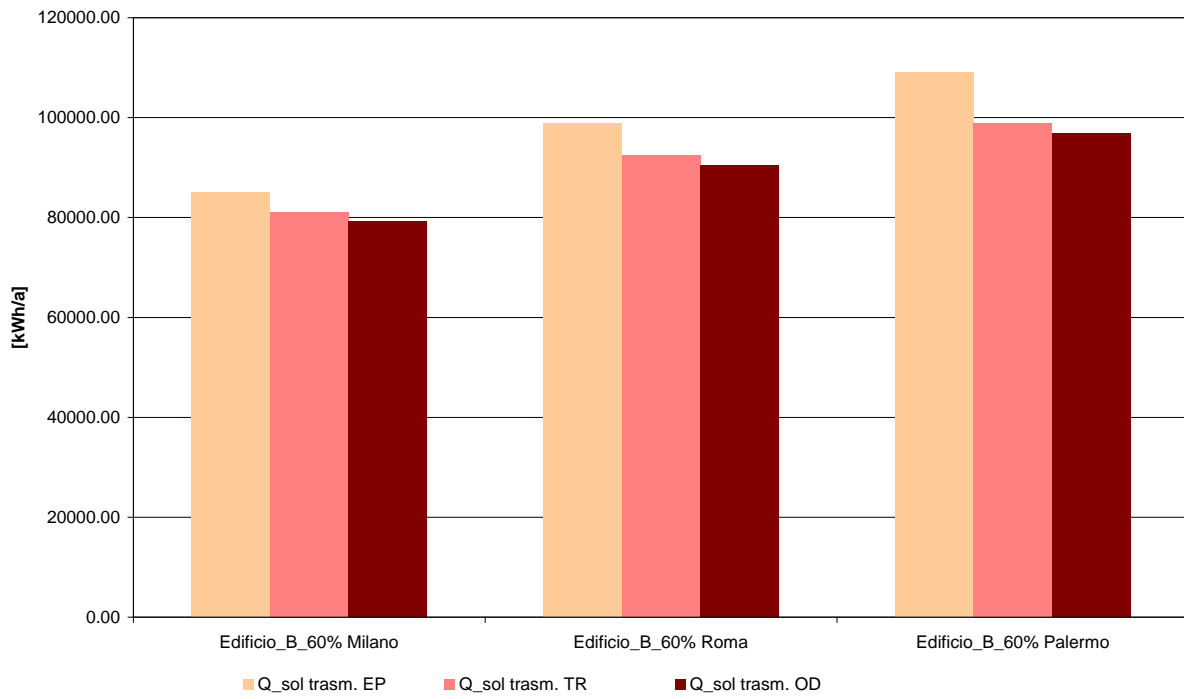


Figura 28 – Confronto tra la radiazione solare attraverso i vetri degli edifici B 60% simulati per Milano, Roma, Palermo

Edificio C 30%

Tabella 23 – Risultati simulazioni edifici C 30% con Energy Plus (EP)

Energy Plus	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Tmedia EP	Q_vent EP	Q_sol trasm. EP
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_C_30% Milano	88920.20	10506.99	444.60	52.53	22.23	2.63	21.83	59515.20	84931.30
Edificio_C_30% Roma	49459.65	15826.88	247.30	79.13	12.36	3.96	22.16	44690.55	98762.14
Edificio_C_30% Palermo	22280.50	22663.48	111.40	113.32	5.57	5.67	22.86	31506.95	109114.64

Tabella 24 – Risultati simulazioni edifici C 30% con Trnsys (TR)

Trnsys	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Tmedia TR	Q_vent TR	Q_sol trasm. TR
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_C_30% Milano	116004.02	11383.19	580.02	56.92	29.00	2.85	21.69	56738.66	80945.62
Edificio_C_30% Roma	67479.10	16359.24	337.40	81.80	16.87	4.09	22.08	43061.80	92363.46
Edificio_C_30% Palermo	32126.40	23210.79	160.63	116.05	8.03	5.80	22.66	30147.88	98866.89

Tabella 25 – Risultati simulazioni edifici C 30% con ODESSE (OD)

ODESSE	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Tmedia OD	Q_vent OD	Q_sol trasm. OD
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_C_30% Milano	86755.25	6545.69	433.78	32.73	21.69	1.64	22.34	59666.76	79111.86
Edificio_C_30% Roma	52452.34	13002.70	262.26	65.01	13.11	3.25	22.71	46103.16	90352.56
Edificio_C_30% Palermo	27432.96	25957.29	137.16	129.79	6.86	6.49	23.39	33902.13	96834.82

Tabella 26 – Confronto tra le potenze di picco potenze di picco invernali e estive degli edifici C 30% simulati per con i tre differenti software

POTENZE DI PICCO	MAX load_inv EP	MAX load_inv TR	MAX load_inv OD	MAX load_est EP	MAX load_est TR	MAX load_est OD
Unità di misura	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
Edificio_C_30% Milano	41.99	55.88	47.01	22.90	32.44	43.27
Edificio_C_30% Roma	32.48	44.92	38.49	24.68	35.66	57.14
Edificio_C_30% Palermo	20.18	29.08	24.79	30.04	40.36	109.93

Fabbisogno energetico invernale

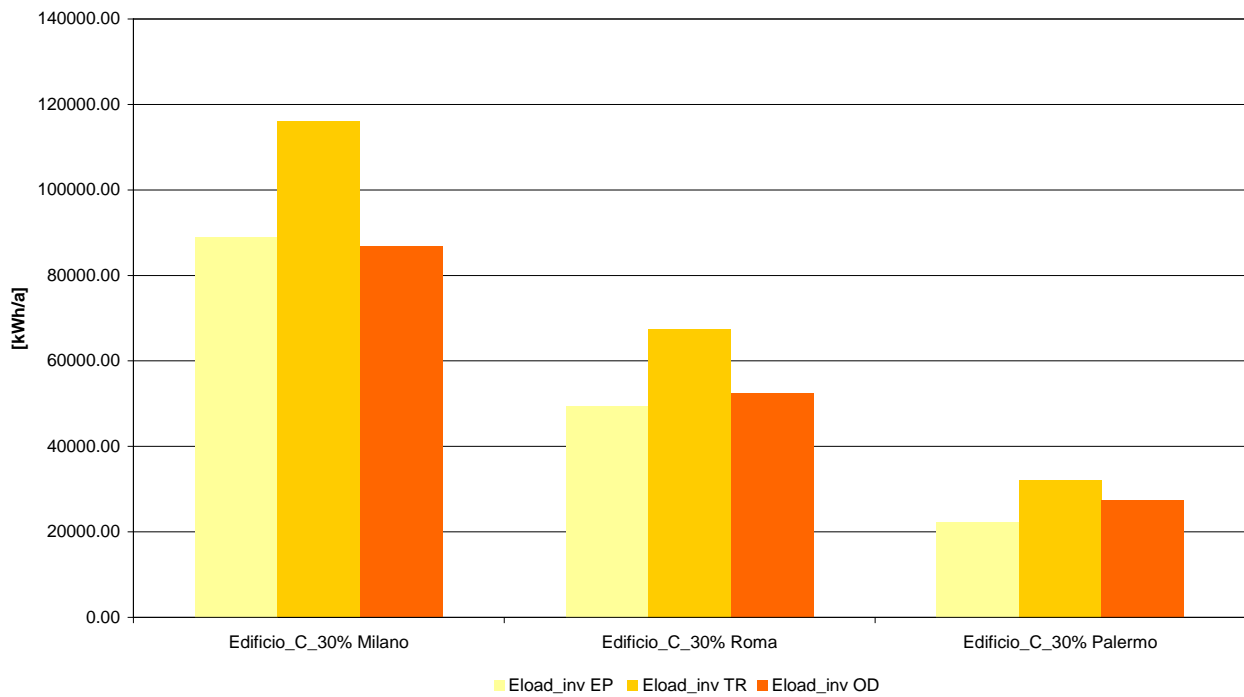


Figura 29 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

Potenza di picco invernale

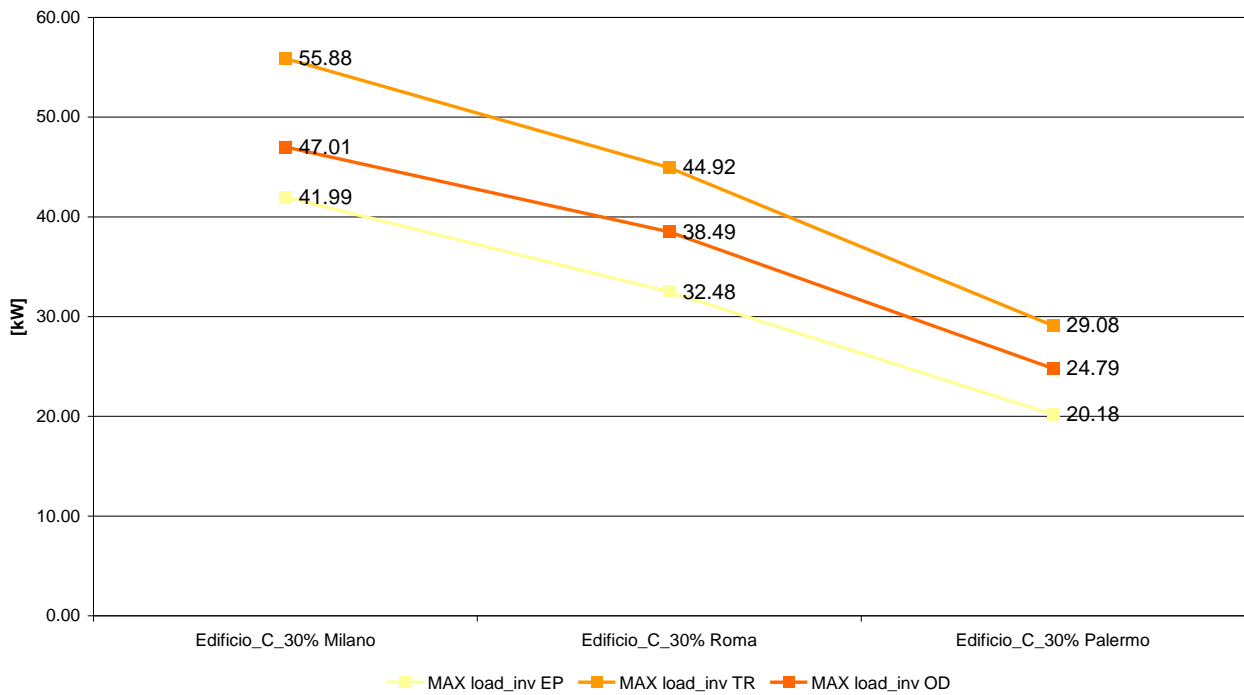


Figura 30 – Confronto tra le potenze di picco invernali degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

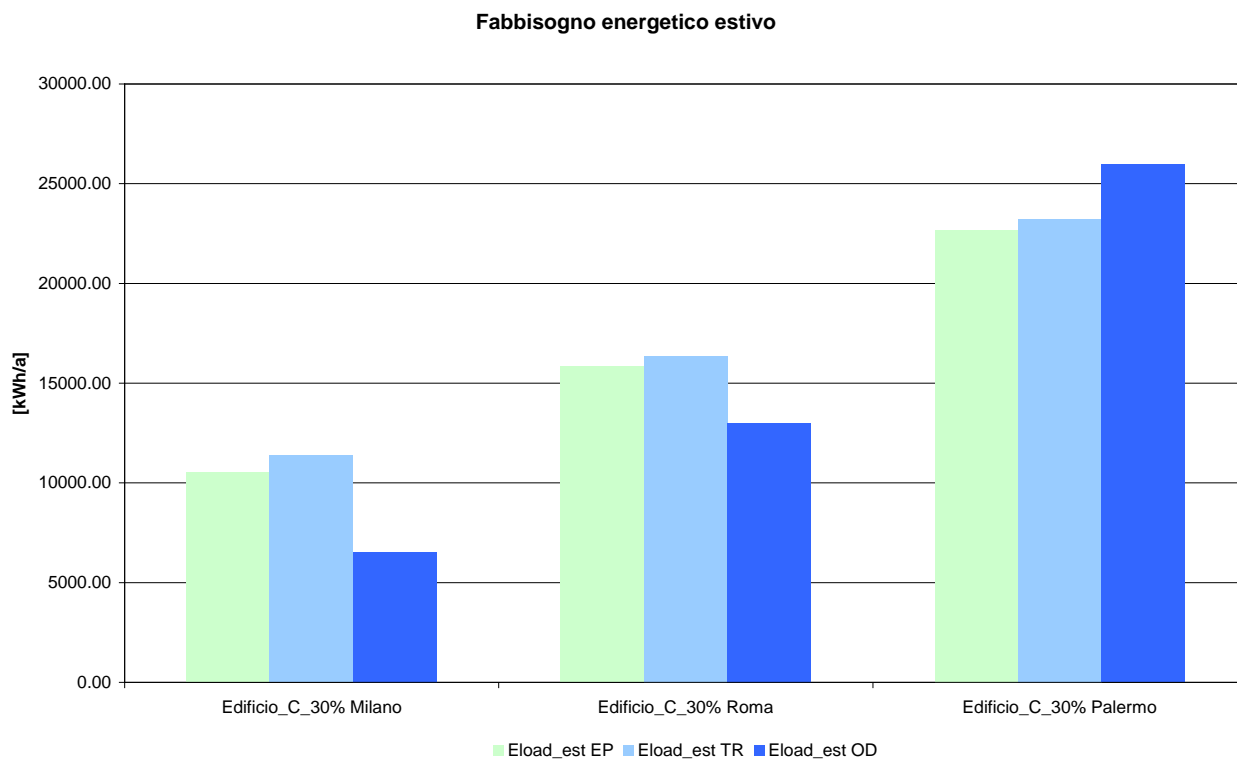


Figura 31 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

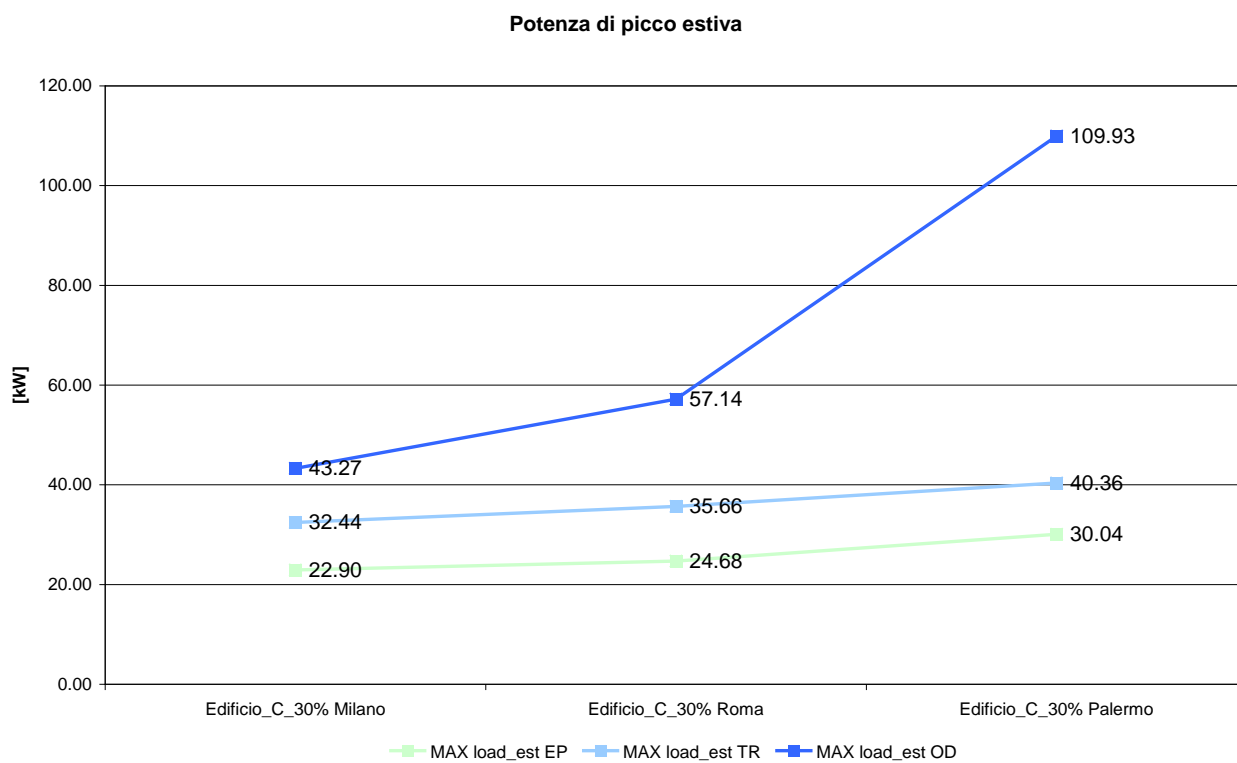


Figura 32 – Confronto tra le potenze di picco estive degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

Fabbisogno energetico invernale

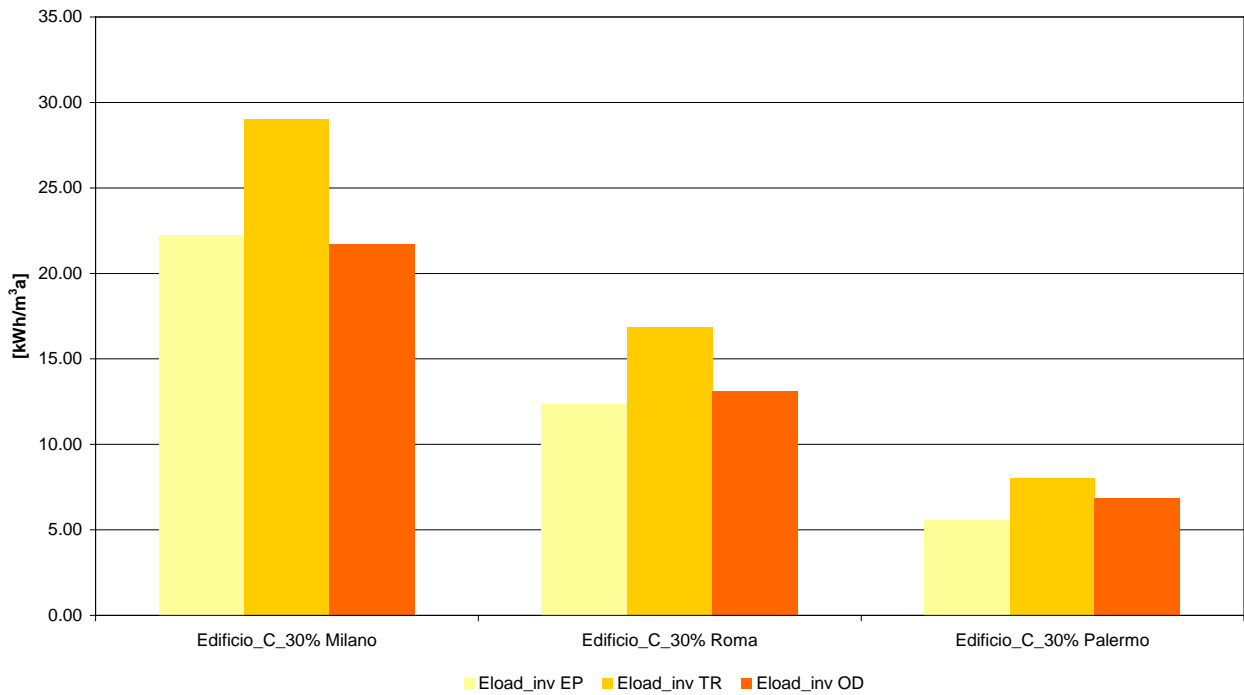


Figura 33 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

Fabbisogno energetico estivo

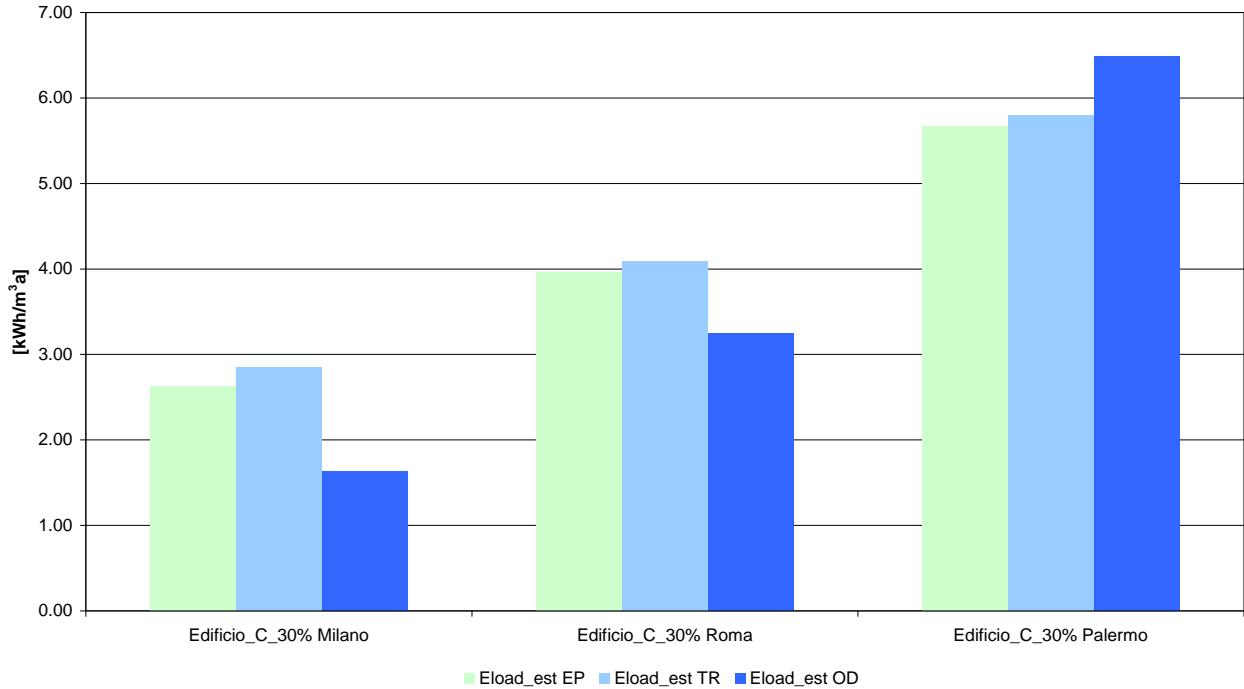


Figura 34 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m³ degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

Temperatura media

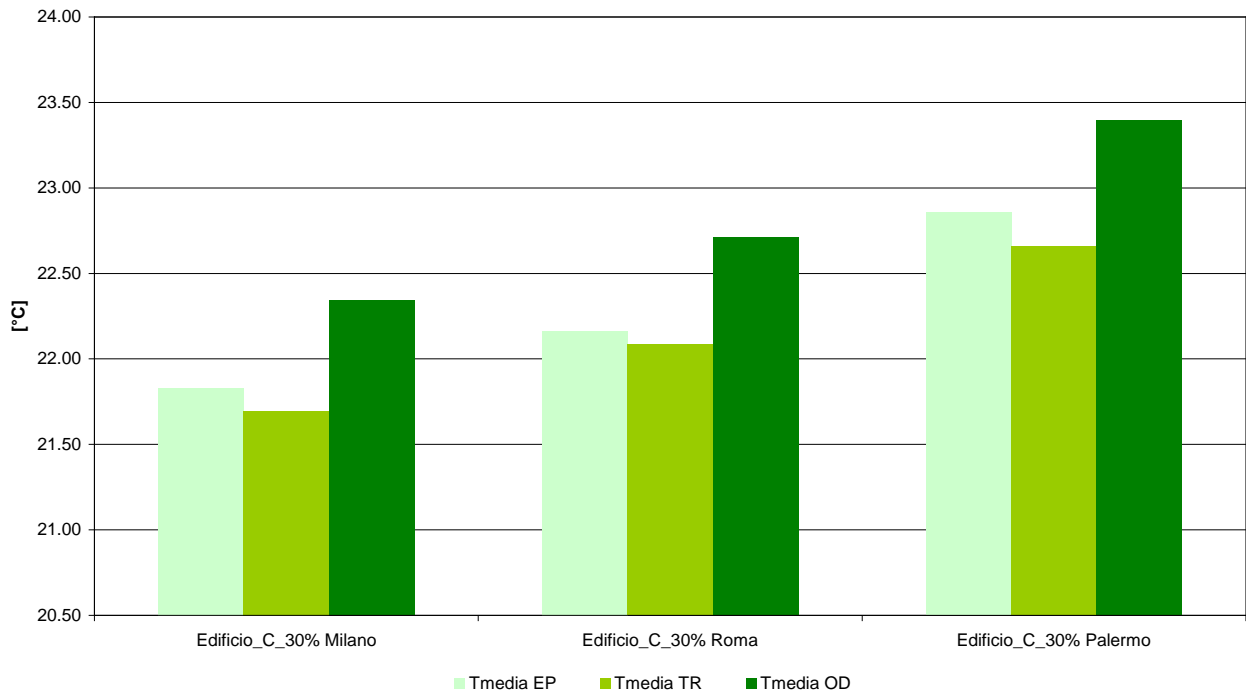


Figura 35 – Temperatura media interna degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

Calore scambiato per ventilazione naturale

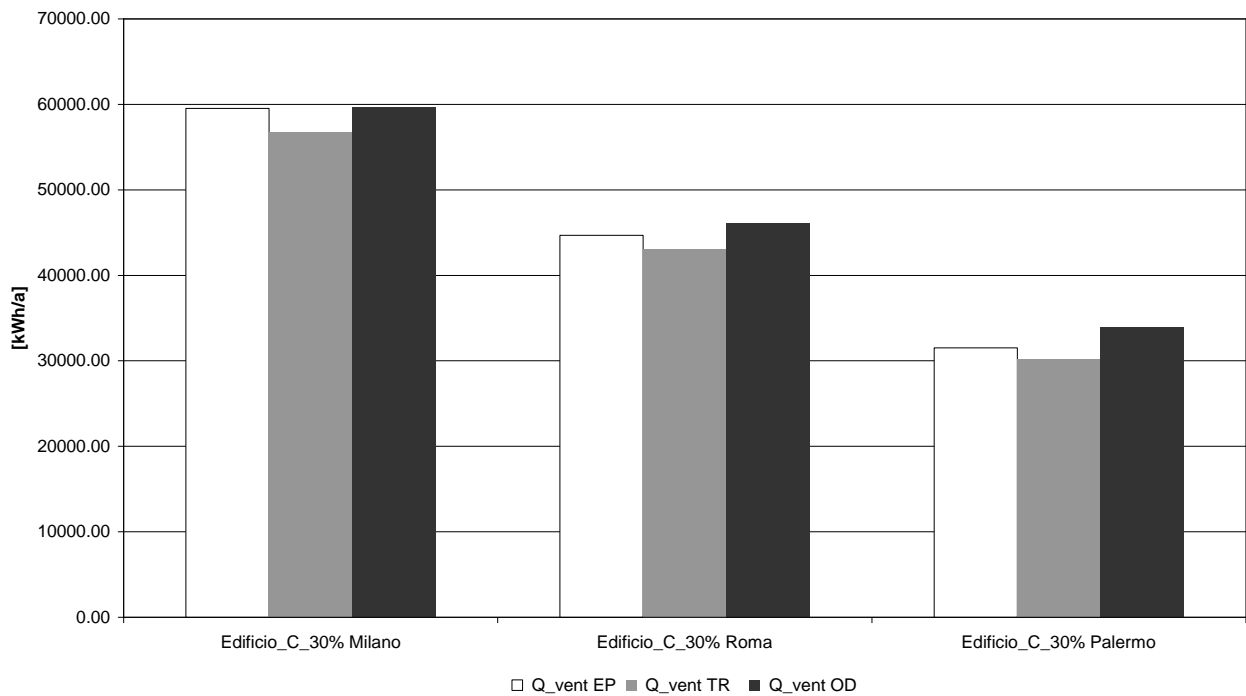


Figura 36 – Confronto tra il calore scambiato per ventilazione naturale negli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

Radiazione solare trasmessa attraverso i vetri

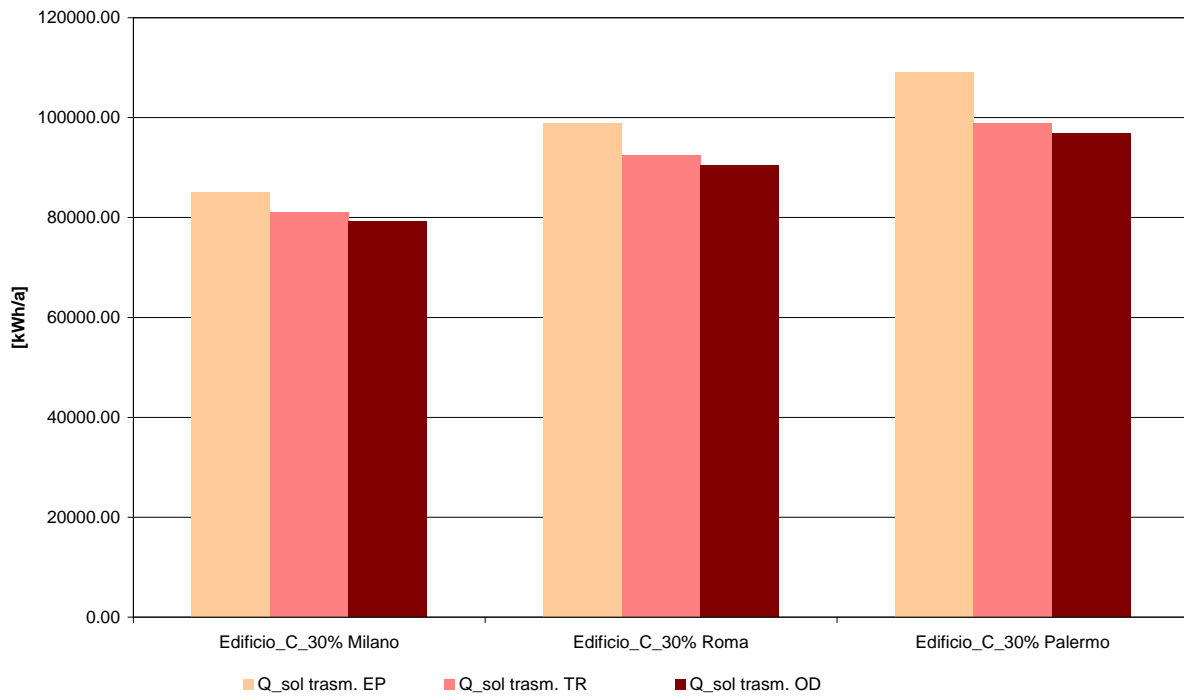


Figura 37 – Confronto tra la radiazione solare attraverso i vetri degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

L'instabilità sopra evidenziata merita di essere approfondita; è presumibile che lo strumento Odesse migliori il proprio comportamento a valle dell'implementazione delle RTS per il calcolo del fabbisogno estivo (operazione in corso).

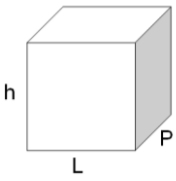

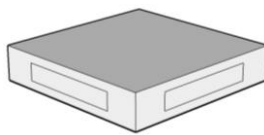
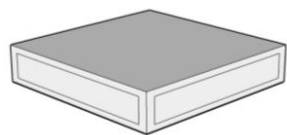
Approfondimento edificio D

Poiché per l'edificio D le differenze tra i risultati ottenuti con Odesse e quelli ottenuti con i 2 strumenti di confronto sono di gran lunga superiori, in particolare in relazione al comportamento estivo dell'edificio, si è provveduto a svolgere elaborazioni più specifiche e ulteriori approfondimenti. Data la grande superficie in pianta e il grande volume dell'edificio, si è pensato dapprima che lo strano comportamento potesse essere legato e eventuali instabilità di Odesse dovute alle grandi dimensioni e al grande volume di aria coinvolto nella trasmissione del calore. Pertanto, si è pensato di affrontare delle simulazioni su edifici geometricamente simili, ma con le 3 dimensioni lineari ridotte rispettivamente a 1/2 e 1/3 di quelle originarie e mantenendo le stesse caratteristiche termofisiche di pareti, solai e finestre.

I risultati delle simulazioni ottenute con Energy plus e Trnsys confermano la stabilità degli strumenti al variare delle dimensioni dell'edificio e sono tra loro comparabili e ragionevolmente proporzionali al variare delle geometria e delle superfici vetrate.

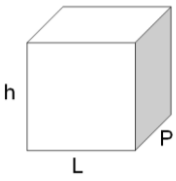

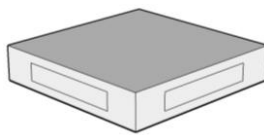
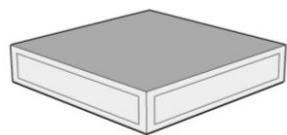
Caratteristiche geometriche e termofisiche dell'edificio D scalato a 1/2

Tabella 27 - EDIFICIO D 1/2 e relative caratteristiche

Dati	Unità di misura	Finestratura 15%	Finestratura 30%	Finestratura 60%
				
Altezza (h) Lunghezza (L) Profondità (P) Trasmittanza parete Massa Frontale Trasmittanza infissi Superficie totale (per fattore di forma) Volume S/V Superficie utile (riscaldata)	[m] [m] [m] [W/m ² K] [kg/m ²] [W/m ² K] [m ²] [m ³] [m ²] [m ²]	5 25 25 0.326 379 2.29 1750 3125 0.56 625	5 25 25 0.326 379 2.29 1750 3125 0.56 625	5 25 25 0.326 379 2.29 1750 3125 0.56 625
PARETI NORD/SUD Superficie Totale Superficie Opaca Superficie Trasparente	[m ²] [m ²] [m ²]	125 106 19	125 88 38	125 50 75
PARETI EST/OVEST Superficie Totale Superficie Opaca Superficie Trasparente	[m ²] [m ²] [m ²]	125 106 19	125 88 38	125 50 75
SOLAIO DI CALPESTIO Superficie Totale Massa Frontale Trasmittanza	[m ²] [kg/m ²] [W/m ² K]	625 551.80 0.362	625 551.80 0.362	625 551.80 0.362
SOLAIO DI COPERTURA Superficie Totale Massa Frontale Trasmittanza	[m ²] [kg/m ²] [W/m ² K]	625 556.20 0.322	625 556.20 0.322	625 556.20 0.322

Caratteristiche geometriche e termofisiche dell'edificio D scalato a 1/3

Tabella 28 - EDIFICIO D 1/3 e relative caratteristiche

Dati	Unità di misura	Finestratura 15%	Finestratura 30%	Finestratura 60%
				
Altezza (h)	[m]	3.333	3.333	3.333
Lunghezza (L)	[m]	16.67	16.67	16.67
Profondità (P)	[m]	16.67	16.67	16.67
Trasmittanza parete	[W/m ² K]	0.326	0.326	0.326
Massa Frontale	[kg/m ²]	379	379	379
Trasmittanza infissi	[W/m ² K]	2.29	2.29	2.29
Superficie totale (per fattore di forma)	[m ²]	778	778	778
Volume	[m ³]	926	926	926
S/V		0.84	0.84	0.84
Superficie utile (riscaldata)	[m ²]	278	278	278
PARETI NORD/SUD				
Superficie Totale	[m ²]	55.6	55.6	55.6
Superficie Opaca	[m ²]	47.2	38.9	22.2
Superficie Trasparente	[m ²]	8.3	16.7	33.3
PARETI EST/OVEST				
Superficie Totale	[m ²]	55.6	55.6	55.6
Superficie Opaca	[m ²]	47.2	38.9	22.2
Superficie Trasparente	[m ²]	8.3	16.7	33.3
SOLAIO DI CALPESTIO				
Superficie Totale	[m ²]	278	278	278
Massa Frontale	[kg/m ²]	551.80	551.80	551.80
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.362	0.362	0.362
SOLAIO DI COPERTURA				
Superficie Totale	[m ²]	278	278	278
Massa Frontale	[kg/m ²]	556.20	556.20	556.20
Trasmittanza	[W/m ² K]	0.322	0.322	0.322

Risultati delle simulazioni di approfondimento dell'edificio D

Tabella 29 – Risultati simulazioni edifici D 1/2 e D 1/3 con Energy Plus (EP) per Roma

Energy Plus	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Tmedia EP	Q_vent EP	Q_sol trasm. EP
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_D 1/2_15% Roma	41613.55	610.12	66.58	0.98	13.32	0.20	21.17	31310.76	17405.27
Edificio_D 1/2_30% Roma	41658.14	2693.64	66.65	4.31	13.33	0.86	21.59	32169.82	36068.94
Edificio_D 1/2_60% Roma	42232.36	9230.91	67.57	14.77	13.51	2.95	22.12	34222.42	77582.23
Edificio_D 1/3_15% Roma	15183.75	173.60	54.62	0.62	16.40	0.19	21.19	9339.66	7372.20
Edificio_D 1/3_30% Roma	15208.87	1129.07	54.71	4.06	16.42	1.22	21.70	9660.37	15636.98
Edificio_D 1/3_60% Roma	15740.30	4122.43	56.62	14.83	17.00	4.45	22.24	10293.40	33139.36

Tabella 30 – Risultati simulazioni edifici D 1/2 e D 1/3 con TRNSYS (TR) per Roma

Trnsys	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Tmedia TR	Q_vent TR	Q_sol trasm. TR
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_D 1/2_15% Roma	45663.40	413.37	73.06	0.66	14.61	0.13	21.18	31643.43	19216.00
Edificio_D 1/2_30% Roma	48837.77	2981.15	78.14	4.77	15.63	0.95	21.61	32161.49	38432.01
Edificio_D 1/2_60% Roma	56803.70	9934.06	90.89	15.89	18.18	3.18	21.99	33313.37	75852.65
Edificio_D 1/3_15% Roma	17020.65	122.54	61.23	0.44	18.38	0.13	21.19	9415.18	8090.95
Edificio_D 1/3_30% Roma	18523.50	1395.39	66.63	5.02	20.00	1.51	21.72	9635.35	17193.27
Edificio_D 1/3_60% Roma	21976.12	4540.64	79.05	16.33	23.73	4.90	22.10	10007.39	33375.16

Tabella 31 – Risultati simulazioni edifici D 1/2 e D 1/3 con ODESSE (OD) per Roma

ODESSE	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Tmedia OD	Q_vent OD	Q_sol trasm. OD
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_D 1/2_15% Roma	39248.00	5656.64	62.80	9.05	12.56	1.81	21.43	31969.08	18580.75
Edificio_D 1/2_30% Roma	40107.24	5915.65	64.17	9.47	12.83	1.89	21.98	33254.64	37175.44
Edificio_D 1/2_60% Roma	44444.14	10833.33	71.11	17.33	14.22	3.47	22.60	35567.32	74336.94
Edificio_D 1/3_15% Roma	14353.85	1747.70	51.63	6.29	15.50	1.89	21.53	9529.95	8264.32
Edificio_D 1/3_30% Roma	14879.58	2226.65	53.52	8.01	16.07	2.40	22.13	10006.18	16514.67
Edificio_D 1/3_60% Roma	17125.64	4845.31	61.60	17.43	18.49	5.23	22.79	10772.74	33043.29

Fabbisogno energetico invernale

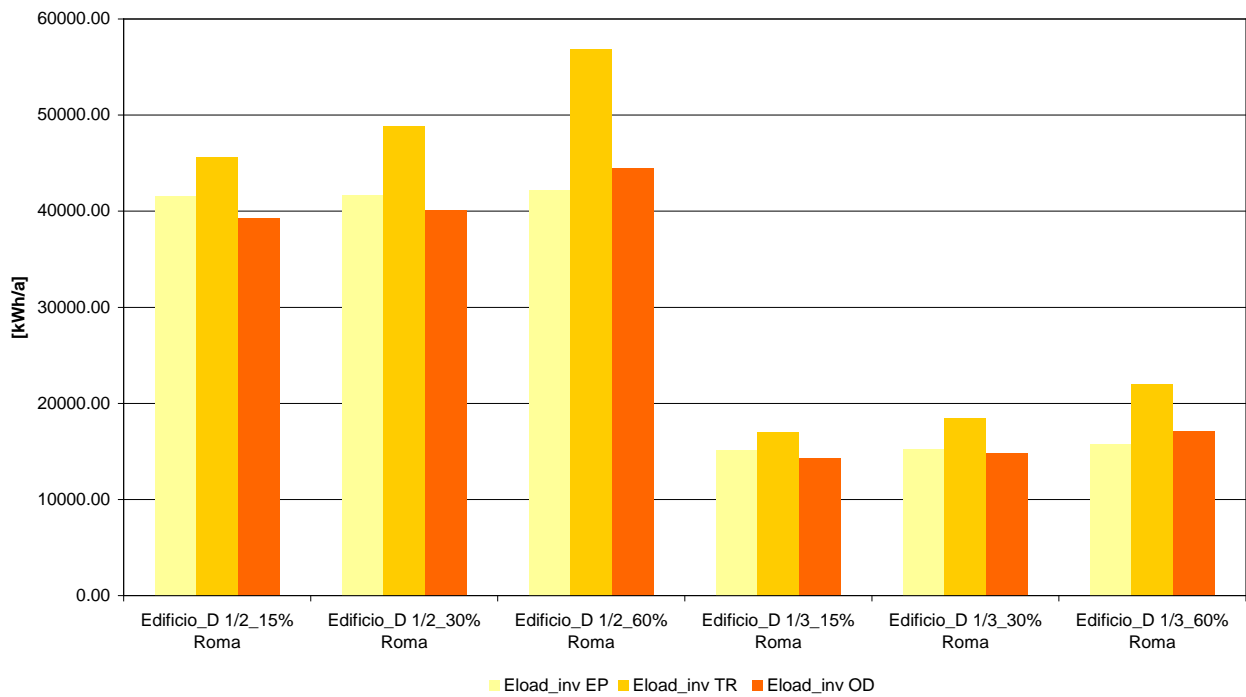


Figura 38 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali degli edifici D 1/2 e D 1/3 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Fabbisogno energetico estivo

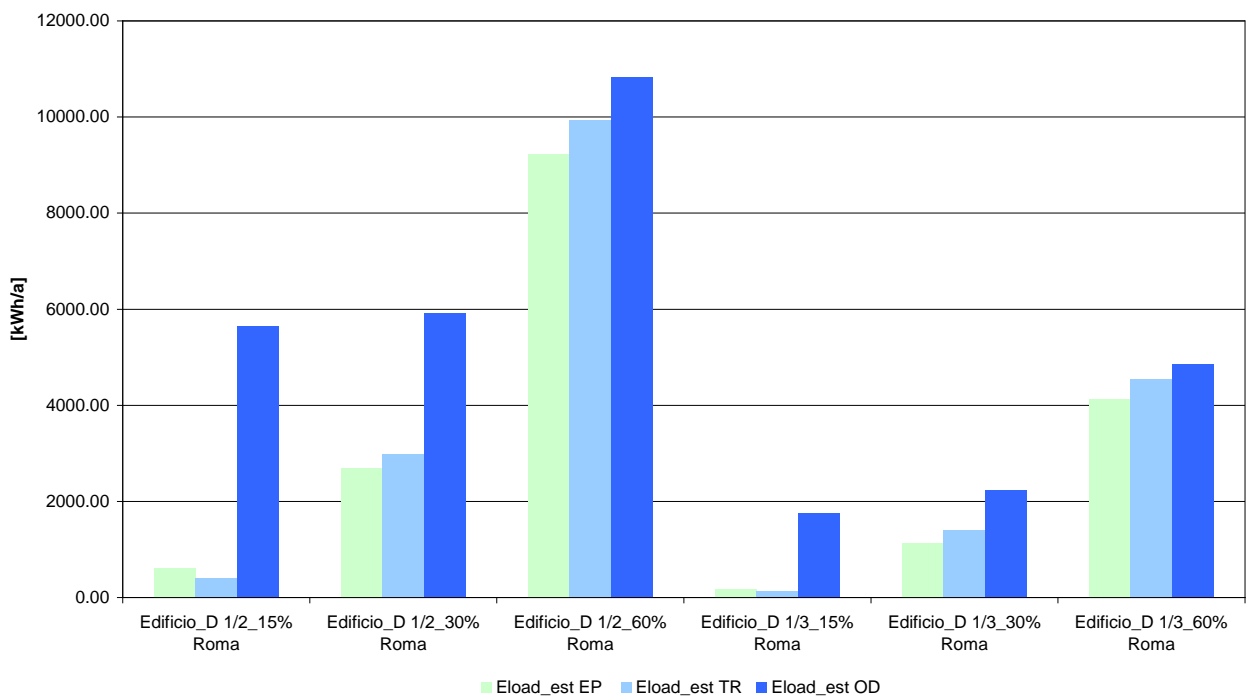


Figura 39 – Confronto tra i fabbisogni estivi degli edifici D 1/2 e D 1/3 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Fabbisogno energetico invernale

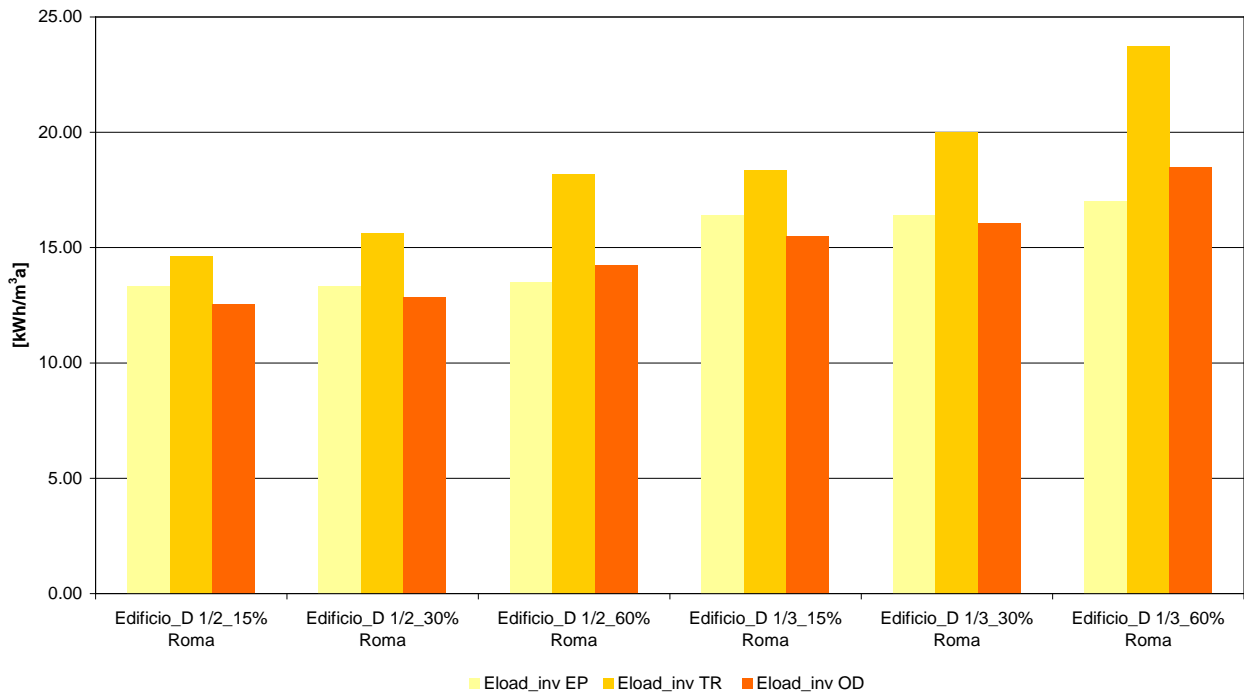


Figura 40 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ degli edifici D 1/2 e D 1/3 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Fabbisogno energetico estivo

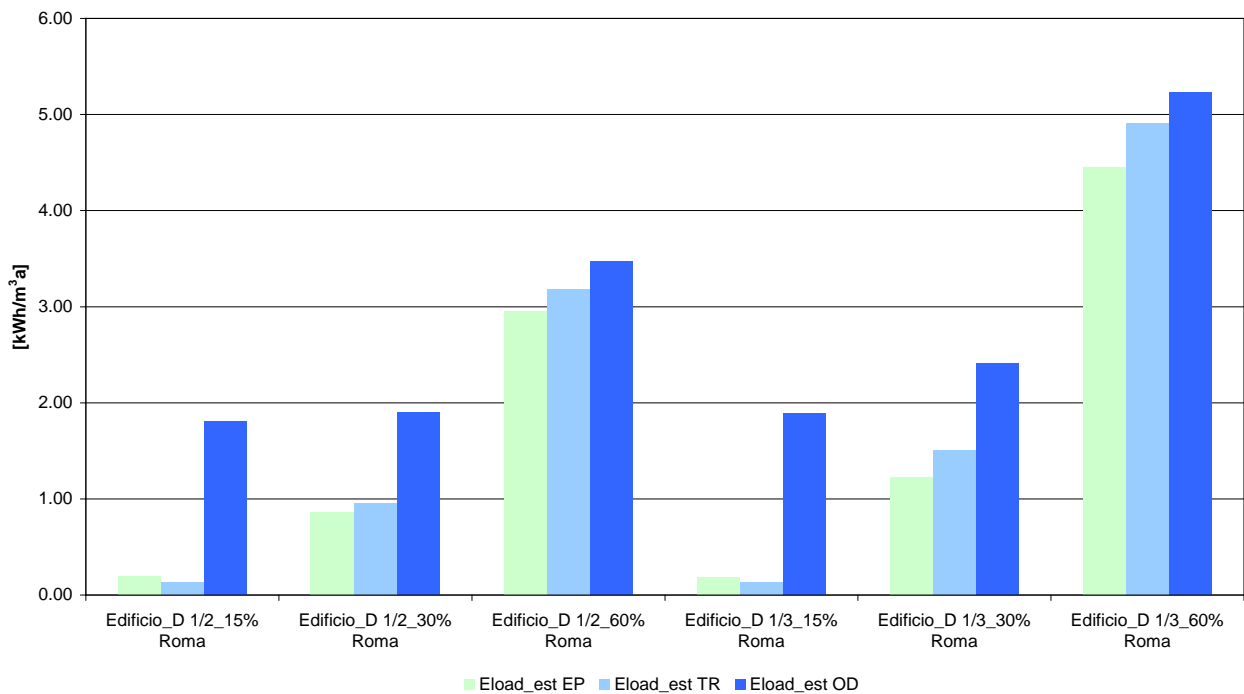


Figura 41 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m³ degli edifici D 1/2 e D 1/3 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Temperatura media

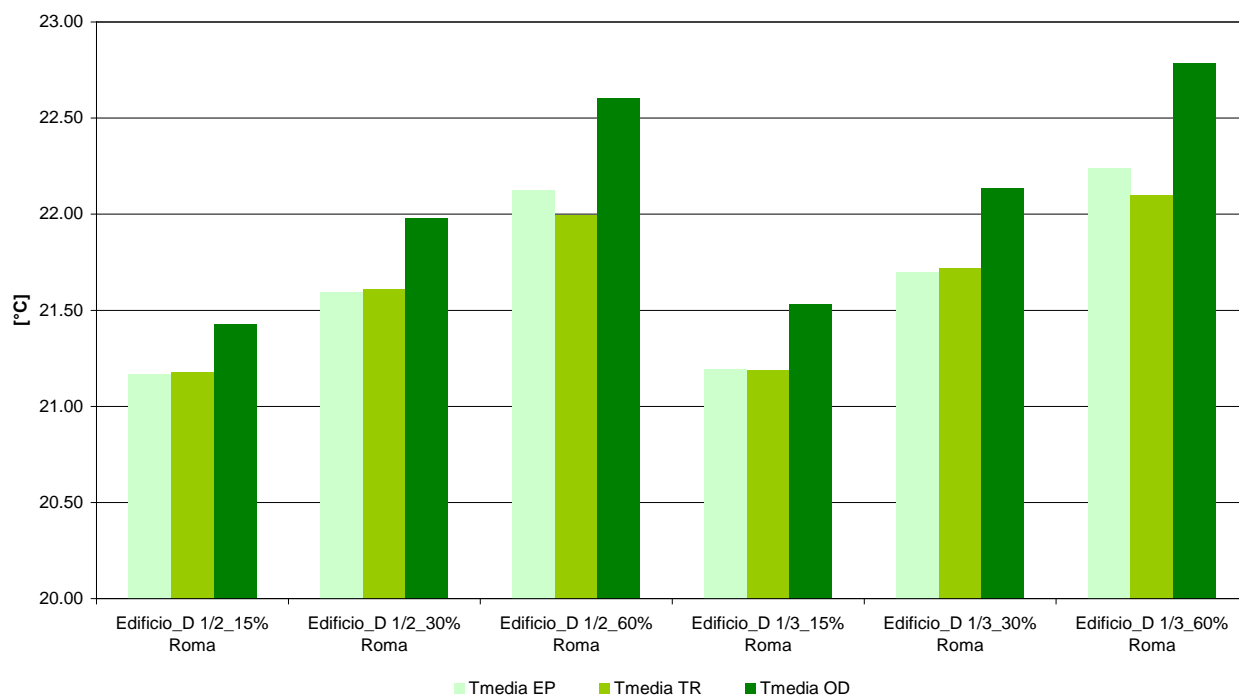


Figura 42 – Confronto tra la temperatura media interna negli edifici D 1/2 e D 1/3 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Calore scambiato per ventilazione naturale

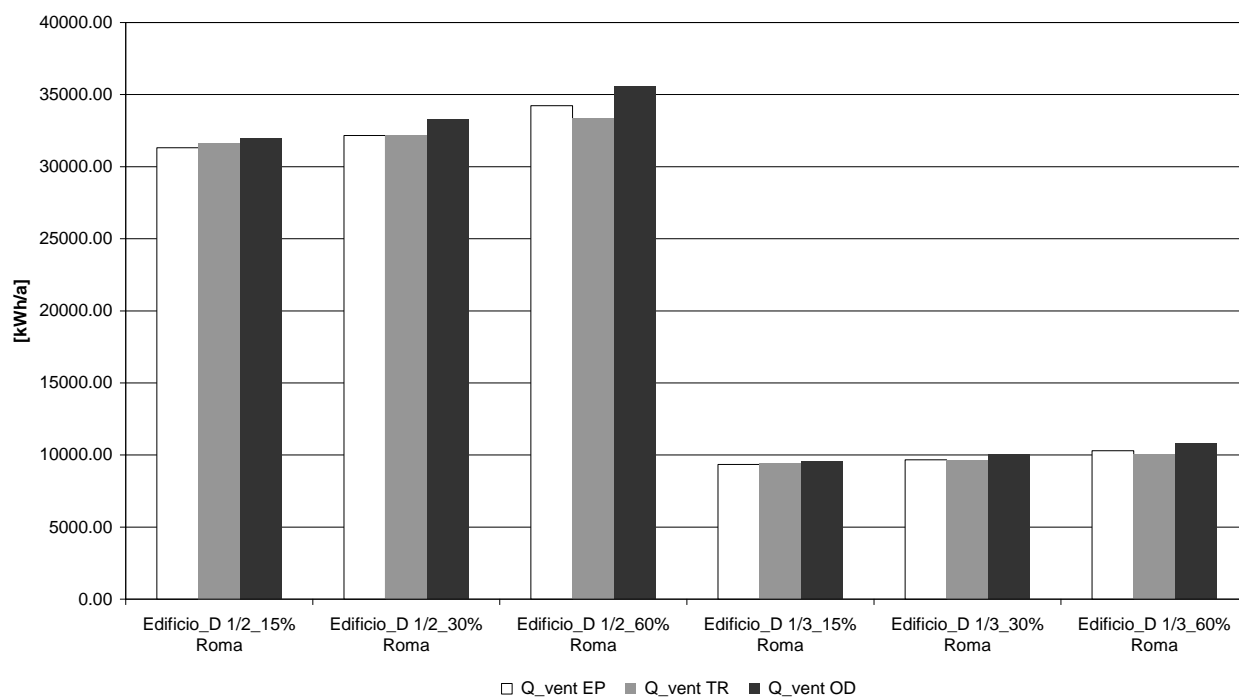
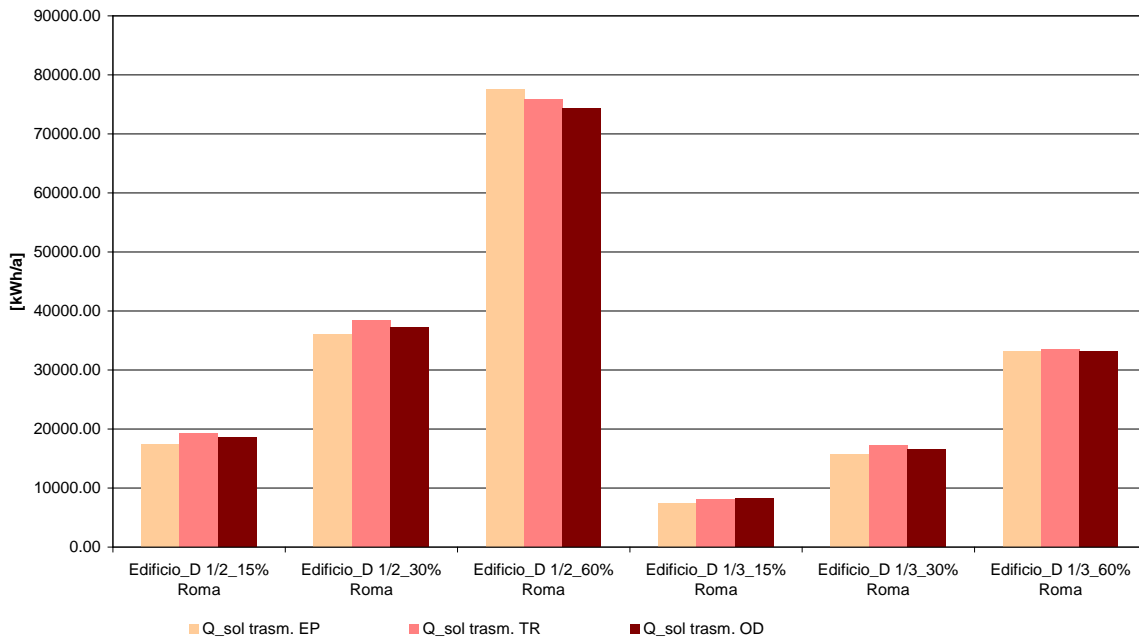


Figura 43 – Confronto tra il calore scambiato per ventilazione naturale negli edifici D 1/2 e D 1/3 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Radiazione solare trasmessa attraverso i vetri



Figura

44 – Confronto tra la radiazione solare trasmessa attraverso i vetri negli edifici D 1/2 e D 1/3 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

A prescindere dalle dimensioni dell'edificio simulato, i risultati ottenuti confermano l'instabilità dello strumento Odesse in relazione alla forma dell'edificio D nella stagione estiva. Tale fenomeno si accentua nel caso di una percentuale vetrata contenuta.

Inoltre, le domande ricavate con TRNSYS sono maggiori rispetto a quelle ricavate con Energy plus sia in estate che in inverno. Tale risultato potrebbe dipendere da un modo differente di trattare i guadagni solari e da eventuali differenze nelle prestazioni termofisiche dell'involucro, in particolare delle finestre inserite. Per cercare di comprendere meglio questo fenomeno, si è fatto anche riferimento al risultato relativo alla trasmissione del calore attraverso l'involucro, rispetto al quale TRNSYS presenta valori superiori a quelli ottenuti con Odesse per l'edificio D di dimensioni originali. Il grafico successivo risulta però purtroppo incompleto perchè in Energy plus non è stato possibile avere il valore di domanda per trasmissione attraverso l'involucro disaggregato.

Scambi termici per trasmissione

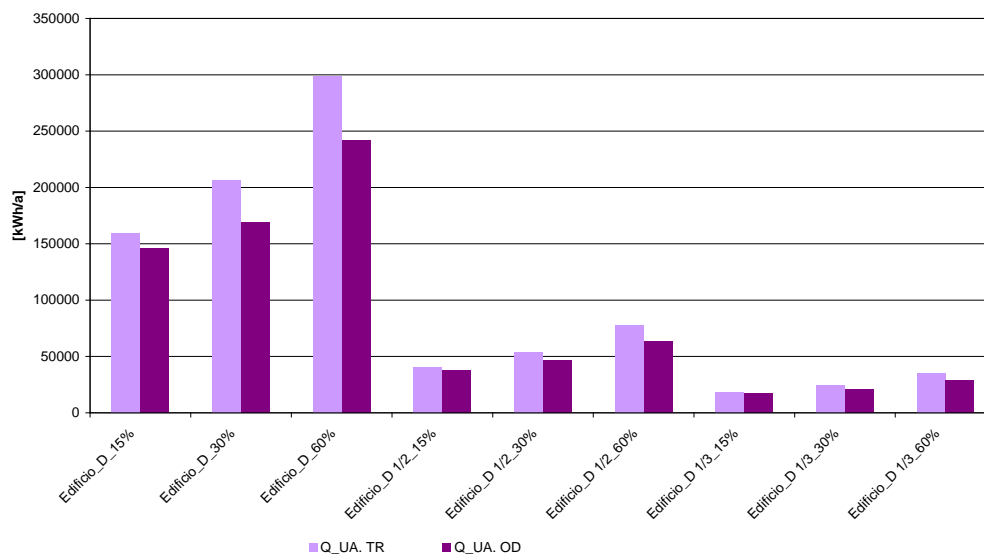


Figura 45 – Confronto tra gli scambi termici per trasmissione negli edifici D, D 1/3 e D 1/2 con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Risultati delle simulazioni di approfondimento dell'edificio D con l'introduzione di massa interna

Per approfondire il fenomeno dell'instabilità di comportamento riscontrata nelle simulazioni relative all'edificio D, si è pensato anche di lavorare sul parametro inerzia, maggiorandolo, in prima battuta, attraverso l'introduzione di pareti interne fittizie.

In particolare è stata introdotta la massa interna corrispondente a due solai intermedi nell'edificio D; lo stesso tipo di incremento di massa è stato poi replicato negli edifici D 1/2 e D 1/, mantenendo costante il rapporto ($m^2/m^3=0,2$) tra la superficie delle pareti interne introdotte e il volume dell'edificio. In definitiva, le masse introdotte fanno riferimento a:

- Superficie introdotta per l'edificio D: 5.000 m²
- Superficie introdotta per l'edificio D 1/2: 625 m²
- Superficie introdotta per l'edificio D 1/3: 185.2 m².

Le superfici introdotte sono caratterizzate da una massa frontale pari a circa 552 kg/m².

Dai primi risultati si evince che la maggiorazione dell'inerzia non rende il comportamento di Odesse più stabile o più vicino a quello dei due strumenti di confronto. In particolare, le differenze maggiori si ottengono nella stagione estiva, relativamente all'edificio di dimensioni intere e con la percentuale vetrata più contenuta (D_15%).

Verifiche delle routine di calcolo non hanno consentito, al momento, di dare una spiegazione concreta del fenomeno, che merita, pertanto, ulteriori approfondimenti. Anche in questo caso, l'introduzione del metodo RTS potrebbe portare a risultati di diverso tipo.

Tabella 32 – Risultati simulazioni edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna con Energy Plus (EP) per Roma

Energy Plus	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Eload_inv EP	Eload_est EP	Tmedia EP	Q_vent EP	Q_sol trasm. EP
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_D_15% + solette	260799.64	3181.35	104.32	1.27	10.43	0.13	21.12	250881.89	71854.76
Edificio_D_30% + solette	257413.63	12502.90	102.97	5.00	10.30	0.50	21.50	255982.75	154532.61
Edificio_D_60% + solette	255663.59	41865.00	102.27	16.75	10.23	1.67	21.99	270035.65	319856.91
Edificio_D 1/2_15% + solette	42642.40	409.27	68.23	0.65	13.65	0.13	21.20	31768.18	17405.27
Edificio_D 1/2_30% + solette	42359.83	2815.04	67.78	4.50	13.56	0.90	21.70	32745.33	36068.94
Edificio_D 1/2_60% + solette	43195.30	11744.00	69.11	18.79	13.82	3.76	22.31	35099.06	77582.23
Edificio_D 1/3_15% + solette	15637.23	112.42	56.25	0.40	16.89	0.12	21.23	9470.71	7372.20
Edificio_D 1/3_30% + solette	15523.02	1244.77	55.84	4.48	16.76	1.34	21.80	9823.25	15636.98
Edificio_D 1/3_60% + solette	15619.25	5316.34	56.18	19.12	16.87	5.74	22.42	10549.57	33139.36

Tabella 33 – Risultati simulazioni edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna con TRSNYS (TR) per Roma

Trnsys	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Eload_inv TR	Eload_est TR	Tmedia TR	Q_vent TR	Q_sol trasm. TR
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_D_15% + solette	272165.47	1147.41	108.87	0.46	10.89	0.05	21.04	252271.05	75852.65
Edificio_D_30% + solette	285775.97	7194.24	114.31	2.88	11.43	0.29	21.35	253341.16	151705.29
Edificio_D_60% + solette	316916.38	29049.23	126.77	11.62	12.68	1.16	21.70	258401.31	303410.58
Edificio_D 1/2_15% + solette	46258.03	126.25	74.01	0.20	14.80	0.04	21.10	31797.37	19216.00
Edificio_D 1/2_30% + solette	49727.29	1854.36	79.56	2.97	15.91	0.59	21.52	32183.33	38432.01
Edificio_D 1/2_60% + solette	57455.91	7964.31	91.93	12.74	18.39	2.55	21.93	33200.31	75852.65
Edificio_D 1/3_15% + solette	17261.15	25.61	62.09	0.09	18.64	0.03	21.09	9451.47	8090.95
Edificio_D 1/3_30% + solette	18912.58	883.93	68.03	3.18	20.42	0.95	21.62	9616.59	17193.27
Edificio_D 1/3_60% + solette	22265.40	3661.97	80.09	13.17	24.04	3.95	22.03	9957.36	33375.16

Tabella 34 – Risultati simulazioni edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna con ODESSE (OD) per Roma

ODESSE	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Eload_inv OD	Eload_est OD	Tmedia OD	Q_vent OD	Q_sol trasm. OD
Unità di misura	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ² a]	[kWh/m ³ a]	[kWh/m ³ a]	[°C]	[kWh/a]	[kWh/a]
Edificio_D_15% + solette	241402.05	699621.32	96.56	279.85	9.66	27.98	20.14	256327.56	74242.02
Edificio_D_30% + solette	241186.18	577293.20	96.47	230.92	9.65	23.09	20.31	253641.52	129132.57
Edificio_D_60% + solette	250092.92	149514.76	100.04	59.81	10.00	5.98	21.10	252391.35	296966.95
Edificio_D 1/2_15% + solette	39201.59	56721.75	62.72	90.75	12.54	18.15	20.40	31623.42	18580.75
Edificio_D 1/2_30% + solette	39905.28	23787.02	63.85	38.06	12.77	7.61	20.97	31513.63	37175.44
Edificio_D 1/2_60% + solette	43633.34	11259.31	69.81	18.01	13.96	3.60	21.93	33141.68	74336.94
Edificio_D 1/3_15% + solette	14332.18	12148.75	51.55	43.70	15.48	13.12	20.63	9333.25	8264.32
Edificio_D 1/3_30% + solette	14795.43	3890.34	53.22	13.99	15.98	4.20	21.38	9460.50	16514.67
Edificio_D 1/3_60% + solette	16773.44	4687.20	60.34	16.86	18.11	5.06	22.31	10201.01	33043.29

Fabbisogno energetico invernale

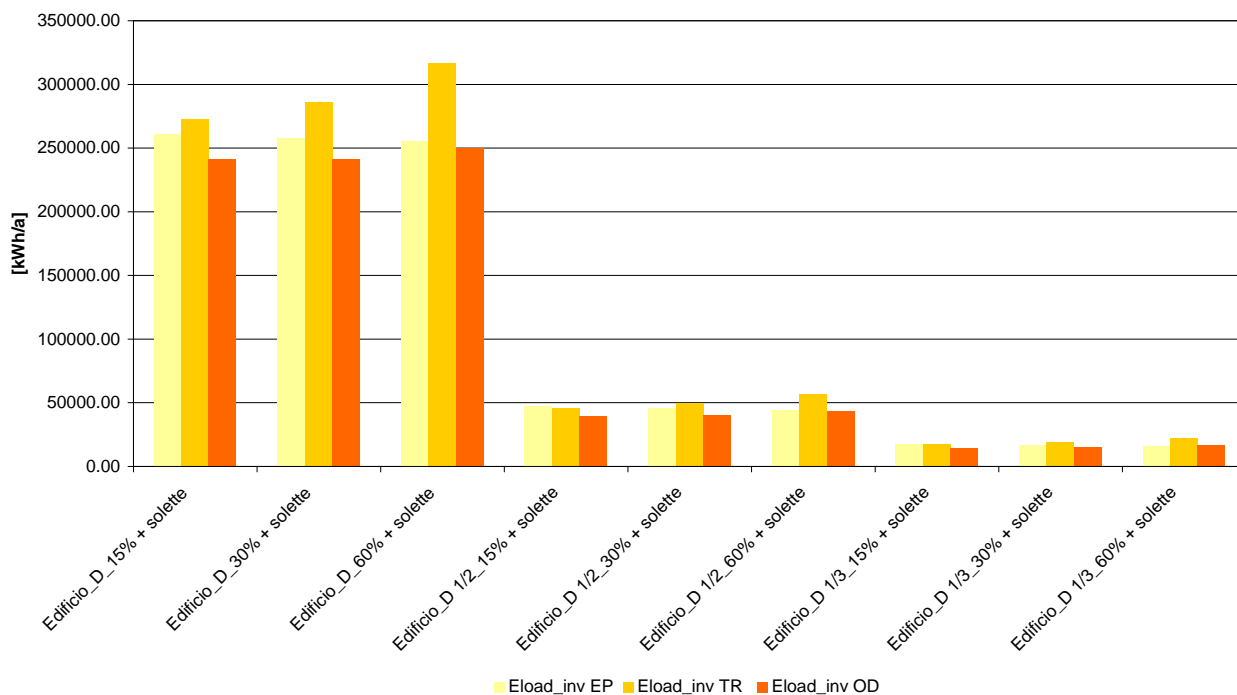


Figura 46 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali degli edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna e con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Fabbisogno energetico estivo

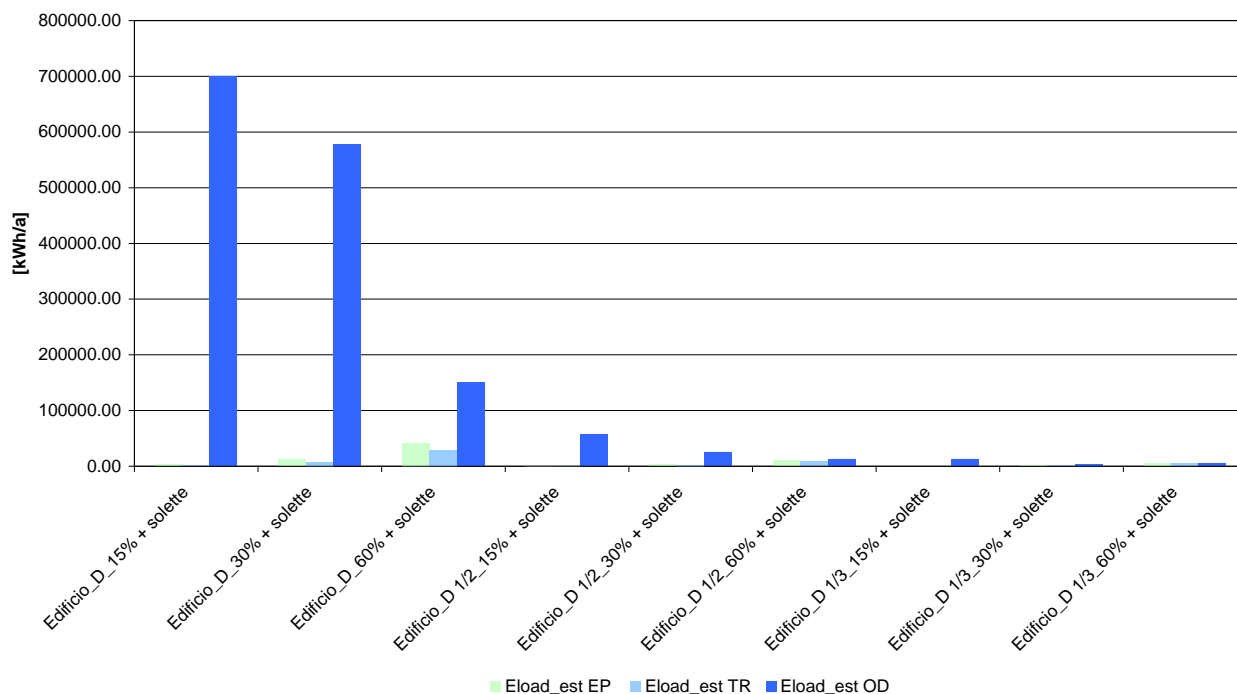


Figura 47 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi degli edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna e con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Fabbisogno energetico invernale

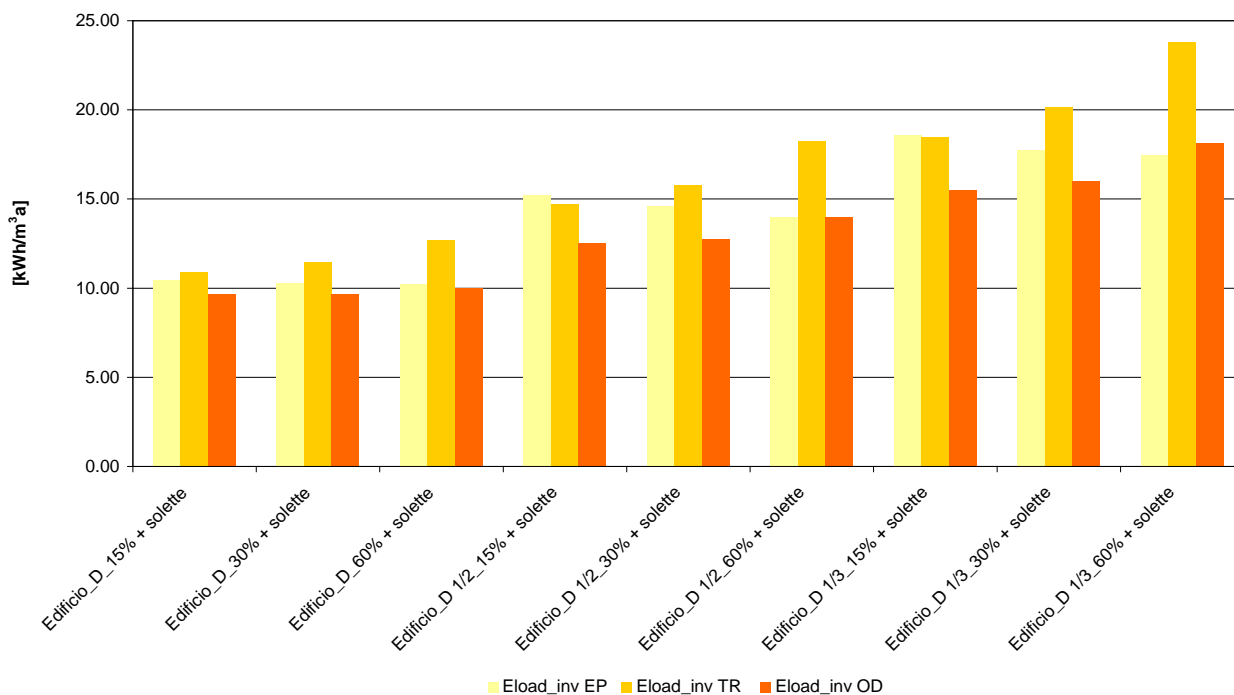


Figura 48 – Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ degli edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna e con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Fabbisogno energetico estivo

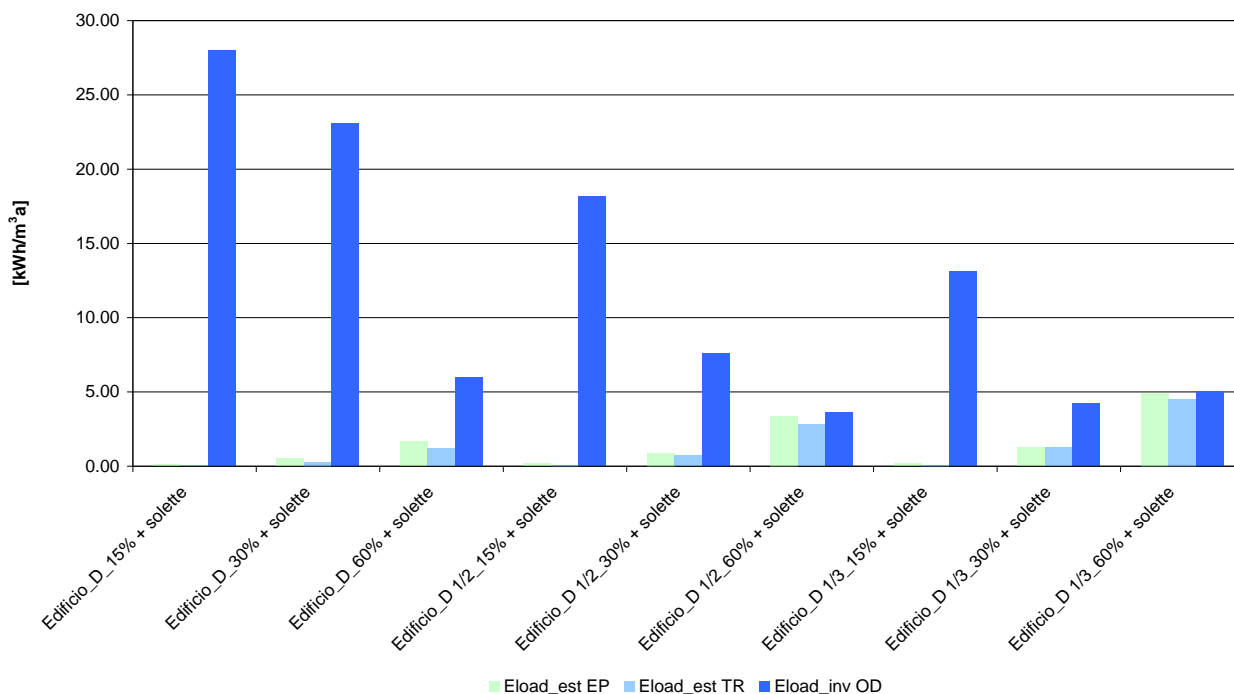


Figura 49 – Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m³ degli edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna e con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

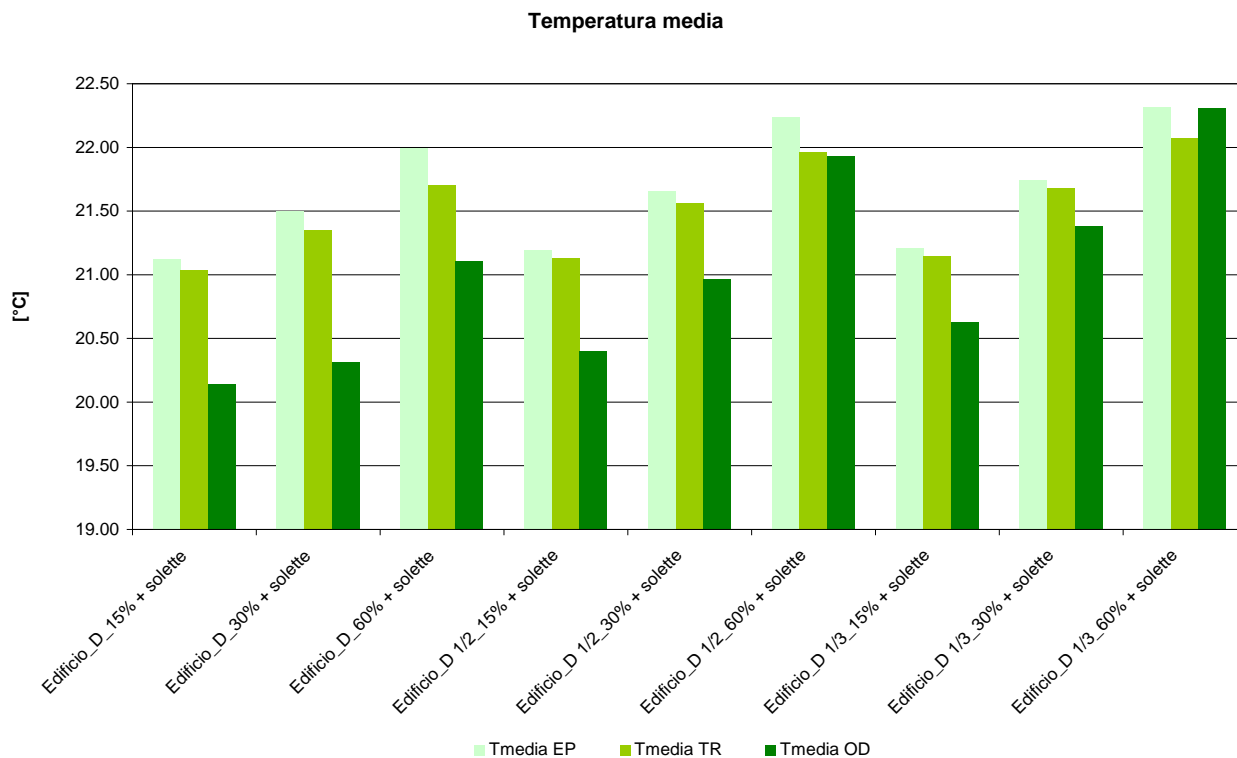


Figura 50 – Confronto tra la temperatura media interna negli edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna e con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

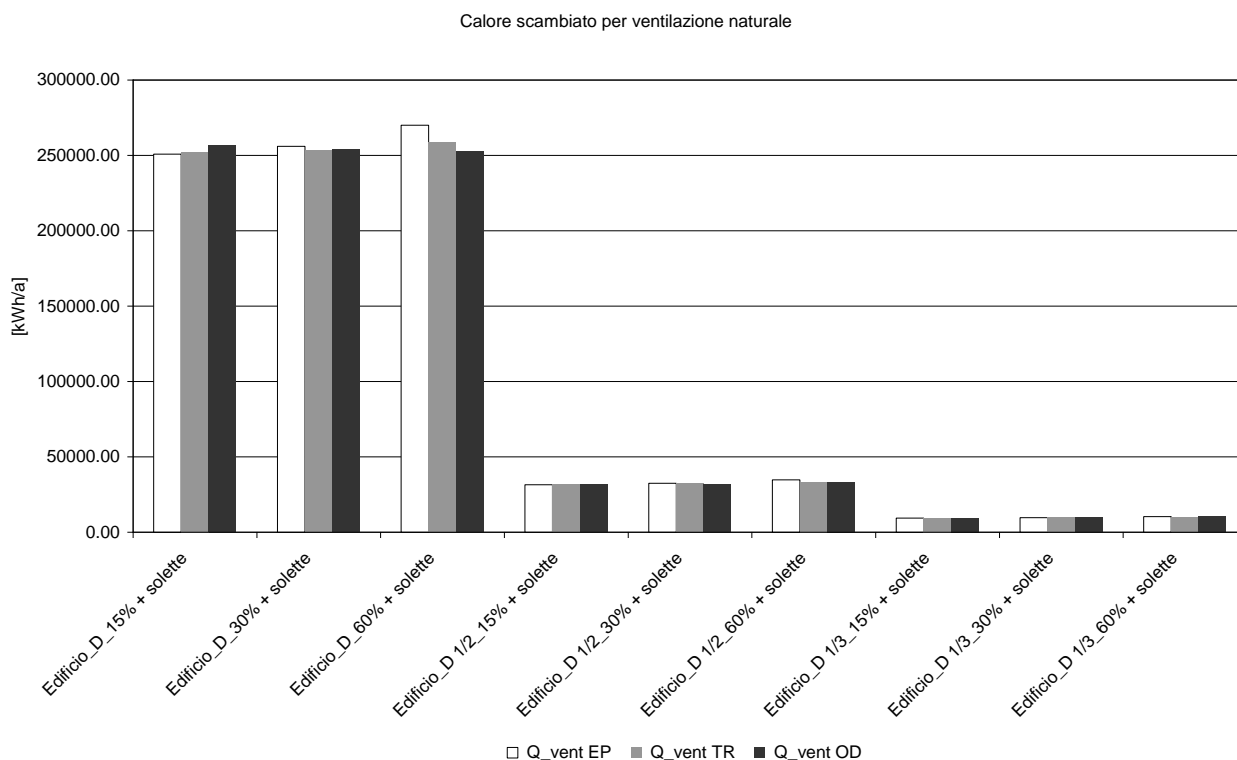


Figura 51 – Confronto tra il calore scambiato per ventilazione naturale negli edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna e con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

Radiazione solare trasmessa attraverso i vetri

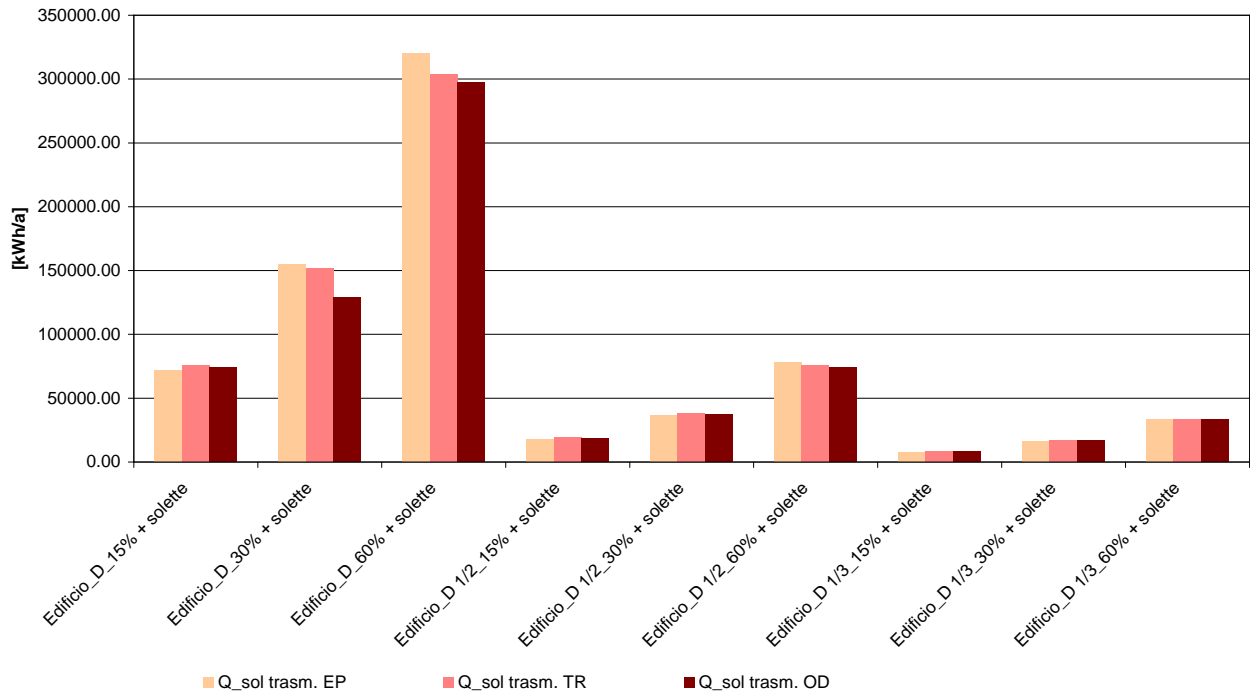


Figura 52 – Confronto tra il calore scambiato per radiazione solare attraverso i vetri negli edifici D, D 1/2 e D 1/3 con massa interna e con i 3 tipi differenti di vetrate simulate per Roma

5 Commenti e conclusioni

Come anticipato, la collaborazione del gruppo di ricerca fa riferimento alla valutazione di Odesse_edificio_monozona, Odesse_edificio_multizona, Odesse_impianti e Odesse_distretto (alcune considerazioni preliminari in merito alla scala di distretto sono riportate nell'**allegato 1**).

Al momento, le informazioni acquisite da ENEA consentono di affrontare soltanto valutazione di Odesse_edificio_monozona; ulteriori valutazioni sugli altri elementi della piattaforma verranno condotte in futuro.

Sulla base delle analisi comparative svolte, complessivamente è possibile verificare congruenze significative sui risultati ottenuti con i 3 software considerando il comportamento degli edifici A, B e C. Infatti, per tali edifici, in termini assoluti il margine di errore rispetto a Energy plus è in ogni caso inferiore al 7%, mentre, il margine di errore rispetto a TRNSYS è inferiore al 30%.

Tuttavia, in riferimento al lavoro sino ad ora condotto, è possibile indicare una serie di perplessità che meritano di essere approfondite attraverso ulteriori indagini, eventualmente estese a un set di edifici più ampio (introducendo nuove geometrie, masse termiche e trasmittanze) e caratterizzato da condizioni più realistiche di massa interna, regimi di ventilazione e guadagni interni;

Per riassumere:

- in relazione al periodo di riscaldamento, individuato in Odesse attraverso la scelta della zona geografica dell'edificio, sarebbe necessario valutare meglio gli effetti di tale vincolo temporale in relazione alla domanda, all'andamento delle temperature dell'aria interna e, in futuro, al comportamento del sistema edificio-impianto;
- in relazione al periodo di raffreddamento, sarebbe opportuno ripetere le simulazioni e le comparazioni (prestando attenzione non solo alle domande ma anche ai picchi di potenza richiesta, parametro che condiziona poi pesantemente le soluzioni di impianto) a valle dell'implementazione della procedura RTS e verificare anche il comportamento di Odesse in relazione alle singole località climatiche introducendone, eventualmente, nuove;
- in relazione all'edificio D, vanno approfonditi i motivi delle discrepanze riscontrate, con particolare attenzione alla stagione estiva.

Oltre a ciò, ulteriori analisi potrebbero riguardare il calcolo della trasmissione del calore attraverso l'involucro (TRNSYS presenta valori superiori rispetto a quelli ottenuti con Odesse; in Energy plus non è stato possibile avere questo dato di domanda disaggregato) e la verifica dell'uniformità delle proprietà termofisiche assegnate agli edifici attraverso i 3 strumenti.

6 Riferimenti

- ANSI/ASHRAE Standard 140 (2007). *Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer program*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- CAPUTO P., MANFREN M., (2009). *Modelli per la simulazione energetica*, Report RSE/2009/59. ENEA, Roma.
- CAPUTO P., COSTA G., MANFREN M., (2010). *Energy simulations at community levels; a new methodological approach for a new model*, Proceedings of PALENC Conference, Rhodes.
- CRAWLEY D.B., Hand J.W., Kummert M., Griffith B.T. (2005). *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Report, July.
- Directive 91/EC (2002). *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. Brussels: European Parliament and Council.
- EN ISO 13786 (2007). *Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods*. Brussels: European Committee of Standardization.
- EN ISO 13790 (2008). *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*. Brussels: European Committee for Standardization.
- UNI TS 11300-1 (2008). *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

Allegato 1: proposta per la formulazione di un nuovo modello

Vista l'effettiva necessità di sviluppare uno strumento interoperabile di supporto la progettazione di sistemi energetici efficienti prima a scala di edificio e successivamente a scala di distretto, vengono di seguito riassunte alcune caratteristiche relative a strumenti già implementati o in corso di implementazione che possono essere considerati come validi spunti per lo sviluppo globale della piattaforma integrata Odesse⁶.

Modelli a scala di distretto

Le tabelle successive riportano le caratteristiche salienti di alcuni strumenti utili alla simulazione energetica di un distretto caratterizzato dalla presenza di un ambiente costruito vario e da diversi sistemi per la conversione e gestione dell'energia.

Tabella 35 – Informazioni sui tools analizzati

	Licenza	Documentazione	Scala
RETScreen	Freeware	Manuale d'uso	Locale
LEAP	Licenza a pagamento	Manuale d'uso	Locale/Regionale/Nazionale
HOMER	Freeware	Manuale d'uso	Locale
TRNSYS	Licenza a pagamento	Manuale Engineering	Locale
GENOPT ⁷	Open source	Manuale d'uso	-
EnergyPlus	Freeware	Manuale Engineering	Locale
EnergyPLAN	Freeware	Manuale Engineering	Locale/Regionale/Nazionale
DER-CAM	Freeware	Manuale Engineering	Locale
DEECO	Open source ⁸	Manuale Engineering	Locale
ExternE	Freeware	Lineeguida	Locale/Regionale/Nazionale
GEMIS	Freeware	Manuale d'uso	Locale/Regionale/Nazionale
CO2DB	Freeware	Manuale d'uso	-
PLACE3S	Licenza a pagamento	Lineeguida	Locale/Regionale/Nazionale
LEED for Neighborhood Development	Licenza a pagamento	Lineeguida	Locale

⁶ Tralasciando gli specifici algoritmi per l'elaborazione dei dati all'interno degli strumenti GIS ed i protocolli per l'efficienza energetica nella pianificazione della "crescita intelligente" delle comunità, due elementi fondamentali potrebbero essere proposti: un modulo per l'analisi preliminare e un modulo per la simulazione dinamica. Il primo dovrebbe essere finalizzato a fornire indicazioni di massima, sufficientemente affidabili, per la progettazione dei sistemi di generazione distribuita; il secondo dovrebbe consentire la corretta simulazione del sistema in regime dinamico, al fine di testare strategie di gestione, regolazione e controllo. Tale procedura renderebbe possibile una vera e propria ottimizzazione economico-ambientale dei distretti energetici, consentendo la messa in atto di importanti sinergie legate all'aggregazione delle domande di energia, all'uso di tecnologie di generazione efficienti, ai meccanismi di inter-scambio con la rete e allo stoccaggio di energia.

⁷ GENOPT deve essere accoppiato a TRNSYS o EnergyPlus.

⁸ Richiede una licenza C++.

Tabella 36 – tools per simulazioni a scala di distretto

Categoria	Tool	Descrizione
Strumenti di valutazione	RETScreen	Pacchetto di programmi che permette di valutare la produzione energetica e di svolgere un'analisi del ciclo di vita e della riduzione delle emissioni di gas climalteranti di vari tipi di tecnologie per lo sfruttamento delle energie rinnovabili ed il miglioramento dell'efficienza energetica.
	LEAP	Modello integrato per la pianificazione energetica basata su scenari.
Strumenti di simulazione	HOMER	Programma per la valutazione di configurazioni impiantistiche con generazione elettrica e termica distribuita a scala di distretto, sia connesse alla rete elettrica che autonome.
	TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation)	Programma per l'analisi dinamica del comportamento del sistema edificio-impianto e delle tecnologie di microgenerazione.
Strumenti di ottimizzazione	HYDROGEMS	Libreria di modelli per la simulazione dinamica di tecnologie di generazione elettrica e conversione in idrogeno da fonti rinnovabili.
	TESS	Libreria di modelli per l'analisi degli impianti termici.
	STEC	Raccolta di modelli di TRNSYS sviluppati per l'analisi dinamica di impianti solari termoelettrici.
	TRNOPT/GENOPT	Strumento per l'ottimizzazione.
	EnergyPlus	Programma per l'analisi dinamica del comportamento del sistema edificio-impianto e delle tecnologie di microgenerazione.
	EnergyPLAN	Strumento sviluppato per lo studio di sistemi energetici su larga scala; svolge un'analisi di tipo orario ed è volta ad analizzare le conseguenze di investimenti e strategie nel settore energetico, in relazione a regolamenti di tipo tecnico ed ottimizzazione economica.
Strumenti per il calcolo delle esternalità e dell'impatto ambientale	DER-CAM	Modello di ottimizzazione per i sistemi di generazione distribuita dell'energia.
	DEECO	Ambiente di simulazione di sistemi energetici, usato per valutare miglioramenti in termini di emissioni ed efficienza rispetto ai costi da sostenere.
	ExternE	Metodologia di calcolo delle esternalità.
	ECOSENSE	Modello di valutazione dell'impatto ambientale.
Database	AERMOD	Strumento per la valutazione delle dispersioni di sostanze inquinanti e climalteranti.
	GEMIS	Strumento che permette di svolgere un'analisi del ciclo di vita di catene energetiche calcolando le emissioni, l'uso di risorse e i costi
	CO2DB	Database realizzato per raccogliere ed organizzare dati riguardanti le tecnologie per la mitigazione delle emissioni di anidride carbonica e gas climalteranti
Strumenti di pianificazione energetica avanzati	PLACE3S	Metodo di pianificazione territoriale innovativo che integra partecipazione pubblica, sviluppo a scala di comunità e analisi alla scala territoriale tramite sistemi informativi geografici (GIS)
	LEED for Neighborhood Development	Lineeguida per la valutazione della sostenibilità e dell'impatto ambientale complessivo degli edifici e dei progetti alla scala urbana, al fine di determinarne una classificazione di qualità tramite punteggio
Strumenti in fase di sviluppo	XEONA	Strumento per la simulazione di sistemi di generazione distribuita
	H2RES	Strumento per la simulazione di sistemi di generazione distribuita per regioni isolate e isole

Tabella 37 – ambiti di analisi dei tools analizzati

Tool	Settore			Tipo di analisi		
	Electricità	Riscaldamento	Trasporti	Economia	Energia	Ambiente
RETScreen	Sì	Sì	-	Sì	Sì	Sì
LEAP	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì
HOMER	Sì	Sì	Parziale	Sì	Sì	Sì
TRNSYS	Sì	Sì	-	-	Sì	-
GENOPT	-	-	-	-	-	-
EnergyPlus	Sì	Sì	-	Sì	Sì	Sì
EnergyPLAN	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì
DER-CAM	Sì	Sì	-	Sì	Parziale	Parziale
DEECO	Sì	Sì	-	Sì	Sì	Sì
ExternE	Sì	Sì	Sì	Sì	-	Sì
GEMIS	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì
CO2DB	Sì	Sì	Sì	Parziale	Parziale	Parziale
PLACE3S	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì
LEED for Neighborhood Development	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì

Tabella 38 – caratteristiche applicative dei tools analizzati

Tool	Tipo di uso					
	Valutazione	Sensibilità	Simulazione	Ottimizzazione	Database	Metodologia
RETScreen	Sì	Sì	-	-	Sì	-
LEAP	Sì	Sì	-	Parziale	Sì	-
HOMER	-	Sì	Sì	Sì	-	-
TRNSYS	-	Parziale	Sì	Sì	-	-
GENOPT	-	-	-	Sì	-	-
EnergyPlus	-	Parziale	Sì	Sì	-	-
EnergyPLAN	-	Sì	-	Sì	-	-
DER-CAM	-	-	-	Sì	-	-
DEECO	-	-	Sì	Sì	-	-
ExternE	-	-	-	-	-	Sì
GEMIS	Sì	Sì	-	-	Sì	-
CO2DB	-	-	-	-	Sì	-
PLACE3S	Sì	-	-	-	Sì	Sì
LEED for Neighborhood Development	-	-	-	-	-	Sì