



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Strumento per l'analisi di reti energetiche complesse in contesti civili

*F. Ceravolo, B. Di Pietra, R. Iannucci, F. Margiotta, A. Pannicelli, G. Puglisi*

Report RdS/2012/078

STRUMENTO PER L'ANALISI DI RETI ENERGETICHE COMPLESSE IN CONTESTI CIVILI

F. Ceravolo, B. Di Pietra, R. Iannucci, F. Margiotta, A. Pannicelli, G. Puglisi (ENEA)

Settembre 2012

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 del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

## Indice

---

<b>1. Le reti energetiche locali (introduzione)</b> .....	4
<b>2. Simulatore di reti energetiche locali</b> .....	7
2.1 Rete Elettrica: modello in Simulink e integrazione con il modello multiedificio .....	7
2.2 Rete Termica: modello in simulink e integrazione con il modello multiedificio.....	10
2.3 Modello Multi edificio .....	13
2.3.1 Processore solare -.....	15
2.3.2 Calcolo della temperatura interna dell’edificio .....	16
2.3.3 Sottostazione d’utenza .....	17
2.3.4 Carico elettrico edificio .....	21
2.3.5 Sistema di distribuzione della potenza termica (fan coil, radiatori) all’interno ciascun edificio.....	22
<b>3. Software disponibili per la simulazione di sistemi energetici distribuiti</b> .....	26
3.1 TRNSYS.....	26
3.2 EnergyPlus .....	26
3.3 HOMER .....	26
3.4 MESSAGE .....	27
3.5 TELERIS.....	27
3.6 DIGSILENT .....	27
<b>4. Applicazione del nuovo software di simulazione ad un cluster di edifici reale</b> .....	29
4.1 Caratteristiche degli edifici simulati nel esempio applicativo .....	30
4.1.1 Edificio 1.....	30
4.1.2 Edificio 2.....	30
4.1.3 Edificio 3.....	32
4.2 Caratteristiche della rete termica locale .....	33
4.3 Caratteristiche rete elettrica .....	33
4.4 Caratteristiche stazione di generazione centralizzata .....	34
4.5 Descrizione dei singoli scenari .....	34
4.6 Tariffe gas ed energia elettrica di riferimento .....	35
4.7 Risultati di simulazione caso applicativo .....	35
4.7.1 Scenario zero .....	35
4.7.2 Scenario uno .....	37
4.7.3 Scenario due .....	39
4.7.4 Scenario tre.....	41
4.7.5 Scenario quattro .....	43
4.7.6 Scenario cinque.....	45
4.7.7 Sintesi degli scenari applicativi .....	47
<b>5. Acquisizione dei profili di consumo elettrico orario di utenze civili a uso ufficio</b> .....	64
5.1 Elaborazione di profili di carico elettrico standardizzati per utenze tipo uffici .....	64
<b>6. Compensazione del carico elettrico degli edifici</b> .....	69
<b>7. Il sistema multizona (introduzione)</b> .....	50
7.1. Implementazione in simulink del nuovo modello di edificio.....	50
7.2. Caratteristiche edificio monozona – multizona.....	53
7.3. Confronto edificio monozona – multizona .....	57
<b>8. L’interfaccia Grafica del software Odessa</b> .....	62
8.1. Razionalizzazione ed ottimizzazione del codice. ....	62
8.2. Revisione Distribuzione Impianti .....	63
<b>Bibliografia</b> .....	72

## 1. Le reti energetiche locali (introduzione)

---

Con il D. Lgs. 28/11: attuazione della direttiva 2009/28/CE, dal 28 Maggio 2012 gli impianti di produzione di energia termica per edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti devono essere progettati e realizzati in modo da garantire la copertura di almeno il 20% del fabbisogno termico di acqua calda sanitaria, riscaldamento e raffrescamento da fonti rinnovabili; il decreto prevede inoltre un incremento al 50% dal 1 Gennaio 2017.

Gli obiettivi previsti dal decreto potrebbero risultare particolarmente ambiziosi, in particolare per complessi edilizi ad alta densità abitativa, dove l'adozione di tecnologie capaci di produrre la necessaria energia termica da fonte rinnovabile potrebbero trovare difficoltà applicativa, per mancanza di spazi o per difficoltà integrative, tali da spingere i progettisti a invocare il vincolo tecnico.

In questo contesto si ritiene particolarmente importante analizzare le potenzialità delle reti energetiche locali come possibile soluzione ai vincoli tecnici che contrastano la diffusione delle fonti rinnovabili.

La rete energetica locale è vista come il mix dei due sottosistemi elettrici e termici a servizio di un agglomerato urbano ben definito (centro commerciale, centro direzionale, piccolo quartiere) alla quale possono essere connessi sistemi di poligenerazione distribuita di piccola taglia combinando fonti rinnovabili elettrici (Fv, piccolo eolico) e termici (collettori solari) con tecnologie per la cogenerazione diffusa.

L'applicazione delle reti energetiche locali combinati con sistemi ICT comporta diversi vantaggi tecnico economici:

- **Vantaggio energetici:** La vicinanza degli impianti di produzione dell'energia ai punti di consumo finale (utenza) consente un minore trasporto dell'energia elettrica e una minore dispersione nella rete distributiva
- **Vantaggio gestionali:** La gestione con sistemi ICT di piccole reti locali facilita l'erogazione, da parte di un unico gestore dei servizi ancillari di rete come la stabilizzazione della frequenza e della tensione dei nodi o ancora il servizio di "load levelling" delle utenze livellando il carico elettrico complessivo delle utenze connesse alla micro rete rete limitandone gli effetti negativi dovuti allo sbilanciamento delle fonti non programmabili
- **Maggiore sicurezza:** la generazione locale (in particolare da CHP) garantisce una maggiore continuità del servizio alle utenze prioritarie come ospedali o centri commerciali.
- **Maggiore integrazione** con i sistemi di distribuzione elettrica nazionali e europei.

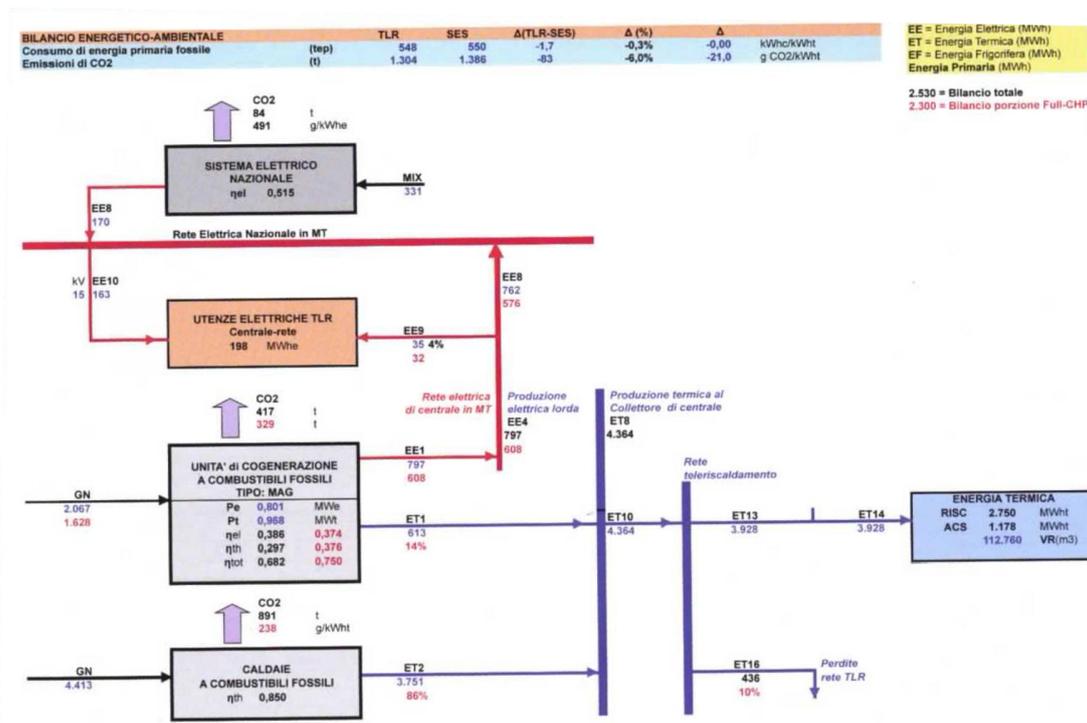
Attualmente le reti energetiche locali presenti sul territorio nazionale sono principalmente del tipo termico caratterizzate da classici sistemi di teleriscaldamento urbano la cui estensione, secondo il Rapporto AIRU 2011, ha raggiunto i 2.772 km a cui risultano allacciate 48.568 sottocentrali d'utenza.

Dal censimento AIRU 2011 risulta comunque una diffusa presenza, soprattutto nel nord Italia, di reti energetiche di piccole dimensioni con diversi livelli di densità di carico ed estensione massima entro 6 km come riportato nella seguente tabella; tali reti potrebbero rappresentare ottimamente il concetto di rete energetica locale nell'ottica dell'integrazione di sistemi di poligenerazione distribuita.

**Tabella 1. Diffusione delle reti energetiche termiche locali con estensione inferiore a 6 km (qnnuario AIRU 2011)**

Nome rete	Citta	Utenza	n° utenti	estensione [km]	Potenza totale installata [MW]	presenza cogenerazione
S. Giacomo - Università	Bologna	R/T	43	6.8	40	si
Fossolo	Bologna	R/T	5	2.1	7.4	si
San Biagio	casalecchio di Reno	R	509	3.8	3.7	si
Sede comune	Bologna	T	3	0.21	5	
Quartier PEEP	Modena	T/R	17	1.68	12	
Comparto ex Mercato	Modena	R	3	1.5	3.2	
Monterenzio	Monterenzio	T	6	0.78	2	si
Impianto cogenerazione Sede	Rovereto	T/R	14	1.5	6.8	si
parco città	Vicenza	T/R	258	4	6	si
PEEP Viserba	Rimini	T/R	746	5.5	5.8	si
Fierà Forlì	Forlì	T	4	2.9	9.3	si
teleriscaldamento Bomporto 1	Bomporto	T/R	54	4.8	5.9	si
castel Bolognese	castel Bolognese	R	14	4.6	3.15	si
Rete di teleriscaldamento Piossasco	Piossasco Torinese	T/r	14	3.5	6	si
Rete San felice 1	Sanfelice Sul panaro	T/R	19	2	2.2	si
rete di teler. Canale	Canale (CN)	T/R	26	5.4	1.9	si
rete di teler. Cortemilia	Cortemilia (CN)	T/R	9	1	1.79	si
Anaconda	Borgaro torinese	T/R	34	5.7	15	si
rete di teleri. Pinerolo 1	Pinerolo	T/R	3	1.8	7.6	si
rete di teler. Casale Monferrato	Casale Monferrato	T/R	27	5.3	9.5	si
rete di san sicario	cesana Torinese	R	54	4.8	13.8	si
Telerisc. Cairo Montenotte	Cairo Montenotte (SV)	T/R	11	3.14	8.8	
rete mirandola	Mirandola (MO)	T/R	14	3.2	3.5	si
rete di Teler. Coredo	Coredo	T/R	180	5	4.3	si
rete di teleris. Santa Caterina Valfurva	santa caterina valfurva (SO)	T/R	60	3.6	18	
<b>Totale</b>			<b>2127</b>	<b>84.61</b>	<b>202.64</b>	

Nella figura seguente, si riporta lo schema semplificato del bilancio elettrico e termico di una rete termica locale con unità CHP connessa in rete



**Figura 1: Schema bilancio energetico rete termica locale (Annuario AIRU 2011- Casalecchio di Reno, rete San Biagio )**

In ambito internazionale, la partecipazione a gruppi di lavoro della IEA (Annex 54, Integration of Micro-Generation and Related Energy Technologies in Buildings) ha evidenziato la volontà delle altre nazioni ad investire nelle micro reti locali come strumento di sviluppo, sicurezza e salvaguardia ambientale. In particolare la Tokyo gas dal 2010 si sta occupando della realizzazione e gestione della prima Smart Energy Networks il cui schema è riportato nella seguente figura:

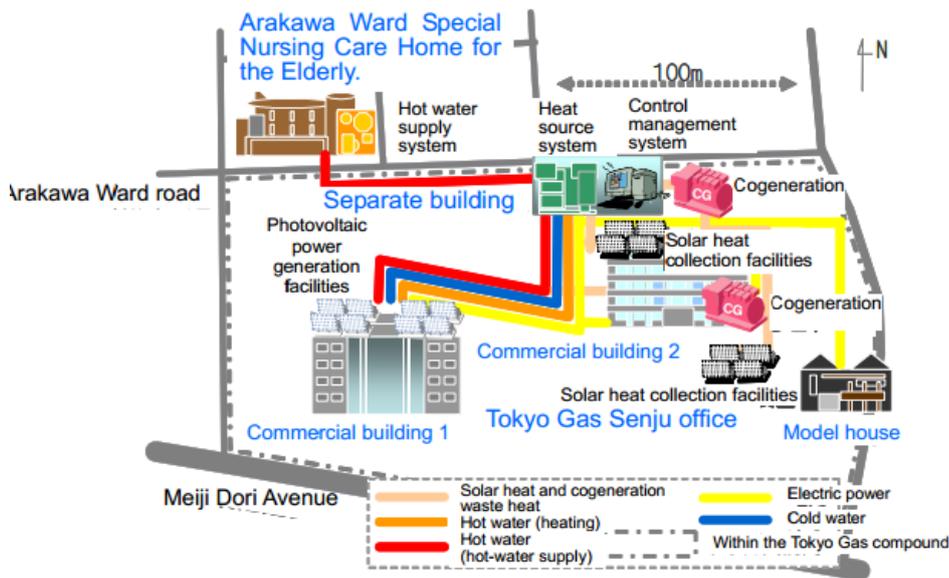


Figura 2: Tokyo Gas- - Smart Energy Networks

Il progetto della Tokyo Gas prevede un sistema di poligenerazione distribuita (elettrica e termica) a servizio tramite le relative reti di un cluster di edifici eterogenei e con profili di utilizzo tali da poter appiattire il diagramma di carico giornaliero. La poligenerazione comprende un sistema fotovoltaico distribuito su più installazioni di circa 90 kWp, un campo solare di circa 300 mq e due unità CHP da 370 kWe e 700 kWe.

Ritenendo particolarmente importante e strategico per il paese il concetto delle reti energetiche locali nel presente report viene descritta l'attività intrapresa sull'analisi e sviluppo di strumenti hardware e software capaci di studiare le potenzialità delle micro-reti locali a scala ben definita (centro commerciale, centro direzionale, piccolo quartiere).

Lo studio è condotto sviluppando modelli matematici in grado di valutare l'evoluzione nel tempo delle principali grandezze che caratterizzano lo stato delle reti di distribuzione elettrica e termica integrandoli con i modelli energetici delle utenze e dei sistemi di poligenerazione locali.

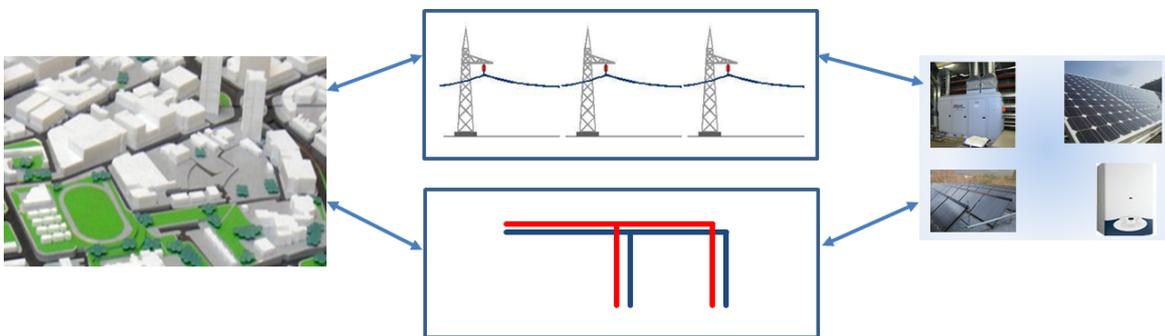
Proseguendo l'attività iniziate nelle precedenti annualità, è stata ampliata in Ambiente Matlab/Simulink la piattaforma di simulazione ODESSE, (descritta nei report Rds/2011/178, RSE/2009/188, Rds/2010/251) implementando un sistema integrato capace di riprodurre la richiesta energetica oraria di un sistema "multi edificio" connesso tramite appositi modelli di rete elettrica e termica locale agli impianti di generazione in assetto generazione distribuita

La nuova piattaforma di simulazione integrata consentirà al progettista di valutare oltre richieste frigo-termo-elettriche differenziate del distretto locale anche le problematiche tecniche economiche connesse al vettoriamento dell'energia termica ed elettrica sulla rete.

## 2. Simulatore di reti energetiche locali

L'obiettivo dell'attività svolta in questa annualità è stato lo sviluppo e la loro integrazione in ambiente Matlab/Simulink dei modelli rappresentativi dei principali componenti che costituiscono una rete energetica locale:

- rete termica per la fornitura del servizio riscaldamento e ACS a un agglomerato di utenze
- rete elettrica urbana in MT e bt
- sistema multi edificio in grado di simulare il carico termico ed elettrico orario di un pluralità di utenze eterogenee
- sistema di controllo per la gestione dei generatori elettrici e termici connessi alla rete

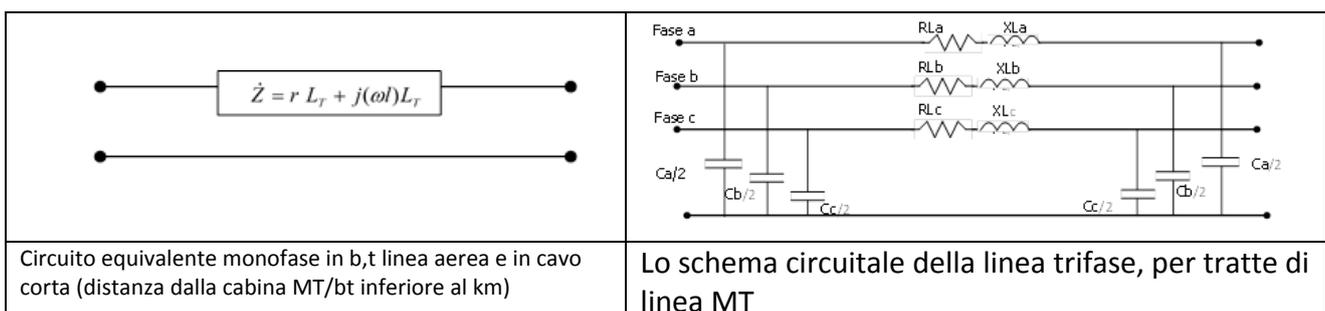


**Figura 3: Schema interconnessione dei modelli multi edificio, reti e generatori che costituiscono la piattaforma di simulazione integrata**

Nei seguenti paragrafi è descritto nel dettaglio come sono stati implementati i singoli elementi che costituiscono la piattaforma software per la simulazione delle micro reti locali.

### 2.1 Rete Elettrica: modello in Simulink e integrazione con il modello multiedificio

Il modello delle reti elettrica è stato implementato in collaborazione con l'Università di Palermo Dipartimento DIETCAM, per una descrizione dettagliata si rimanda al report DIETCAM RdS/2012/70. In questa sezione si vuole descrivere sinteticamente il modello utilizzato per il sottosistema elettrico e come lo stesso viene integrato con i modelli analitici del sistema multi edificio e del sotto sistema termico. Il modello implementato in ambiente Matlab/simulink si presta a rappresentare le principali grandezze elettriche delle linee urbane in MT e bt sia aeree sia in cavo, adottando gli schemi equivalenti di seguito riportati.



**Figura 4: Circuito equivalente della rete elettrica utilizzato per la costruzione dei modelli in Matlab**

Lo studio della rete viene condotto nell'ipotesi di nelle ipotesi di sistema in regime permanente, simmetrico nelle tensioni, con linee identiche nelle tre fasi in presenza di soli carichi equilibrati.

Inoltre, poiché si prevede un campo di applicazione del software a scala urbana con sole utenze civili, si ipotizzano i carichi elettrici rifasati con un fattore di potenza medio pari a 0,9.

Il modello implementato effettua ad ogni passo di simulazione (15 min) una analisi dei flussi di potenza (load flow analysis) della rete , calcolando le tensioni (in modulo e fase) in tutti i nodi della rete, per data configurazione del sistema elettrico, una volta note le potenze generate e le richieste di carico, (fornite dai relativi modelli presenti all'interno della piattaforma integrata) in modo da risalire alla corrente che interessa i collegamenti tra i vari nodi e quindi alla potenza attiva e reattiva che vi transita.

Definito lo schema della rete, l'utente, tramite due strutture dati definisce la topologia di ciascun nodo (di carico, di generazione, di saldo) e i parametri elettrici della linea

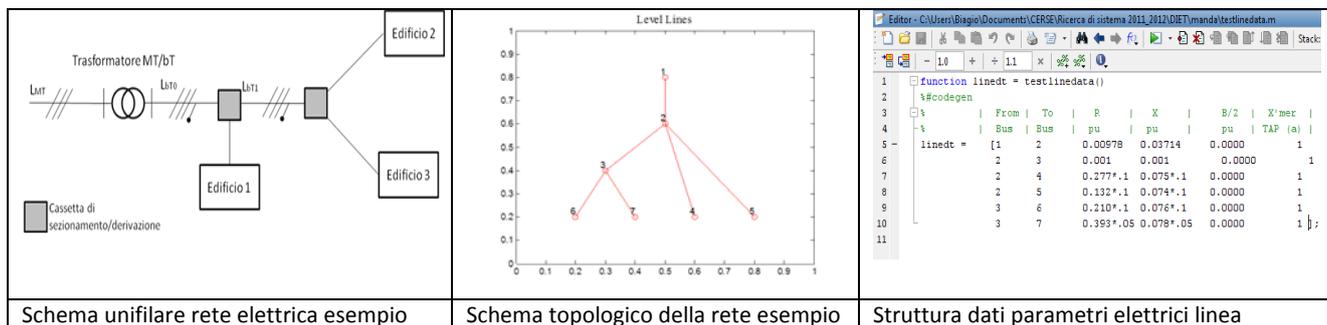


Figura 5: schema topologico e struttura dei parametri elettrici in Matlab di una rete elettrica

Affinché il modello della rete elettrica possa interagire ottimamente con i sottosistemi che compongono la piattaforma di simulazione integrata, il calcolo del Load flow (algoritmo di Newton Raphson), inizialmente codificato in linguaggio MatLab è stato inglobato in un blocco Embedded function di Simulink.

L'estensione del modello prevede la realizzazione di una interfaccia grafica (possibilmente anche con un layer per la rete termica) che faciliti l'utente nella costruzione topologica della rete e nella caratterizzazione di ciascuna linea e nodo.

Stabilita l'interazione tra i vari sottosistemi, come rappresentato nello schema Simulink riportato di seguito, all'avvio delle simulazione (durata 8760 ore) il sottosistema di utenza (multi edificio) e il sottosistema di generazione (cogeneratore, FV) forniscono al blocco loadflow i seguenti input necessari al calcolo:

- Potenza elettrica attiva e reattiva prodotta dai generatori allacciati ai nodi di generazione: vengono utilizzati i modelli degli impianti di generazione sviluppati per la piattaforma ODESSE (cogeneratore e fotovoltaico) descritti nei report RdS/2011/178, RdS/2010/251 e RdS/2010/227.

I modelli utilizzati generano esclusivamente potenza attiva a fattore di potenza costante  $\cos\phi=1$ . E' previsto che venga implementata la regola introdotta dalla CEI 0-21 relativa all'obbligo di regolazione della tensione tramite assorbimento/erogazione di potenza reattiva, quindi a fattore di potenza variabile

- Carico elettrico degli edifici connessi a nodi della rete: la potenza elettrica richiesta da ciascuna utenza allacciata alla rete (edifici) viene fornita dal sistema "multi-edificio" descritto nei paragrafi successivi

Il modello elettrico fornisce in output i risultati del calcolo del load flow nel dominio del tempo:

- Perdite totali sulla rete per effetto Joule: *loss*
- Potenza iniettata nel nodo di saldo: *(coincidente con la cabina MT/bt)*
- *Massima caduta di tensione sulla rete*
- *Tensione di ciascun nodo*

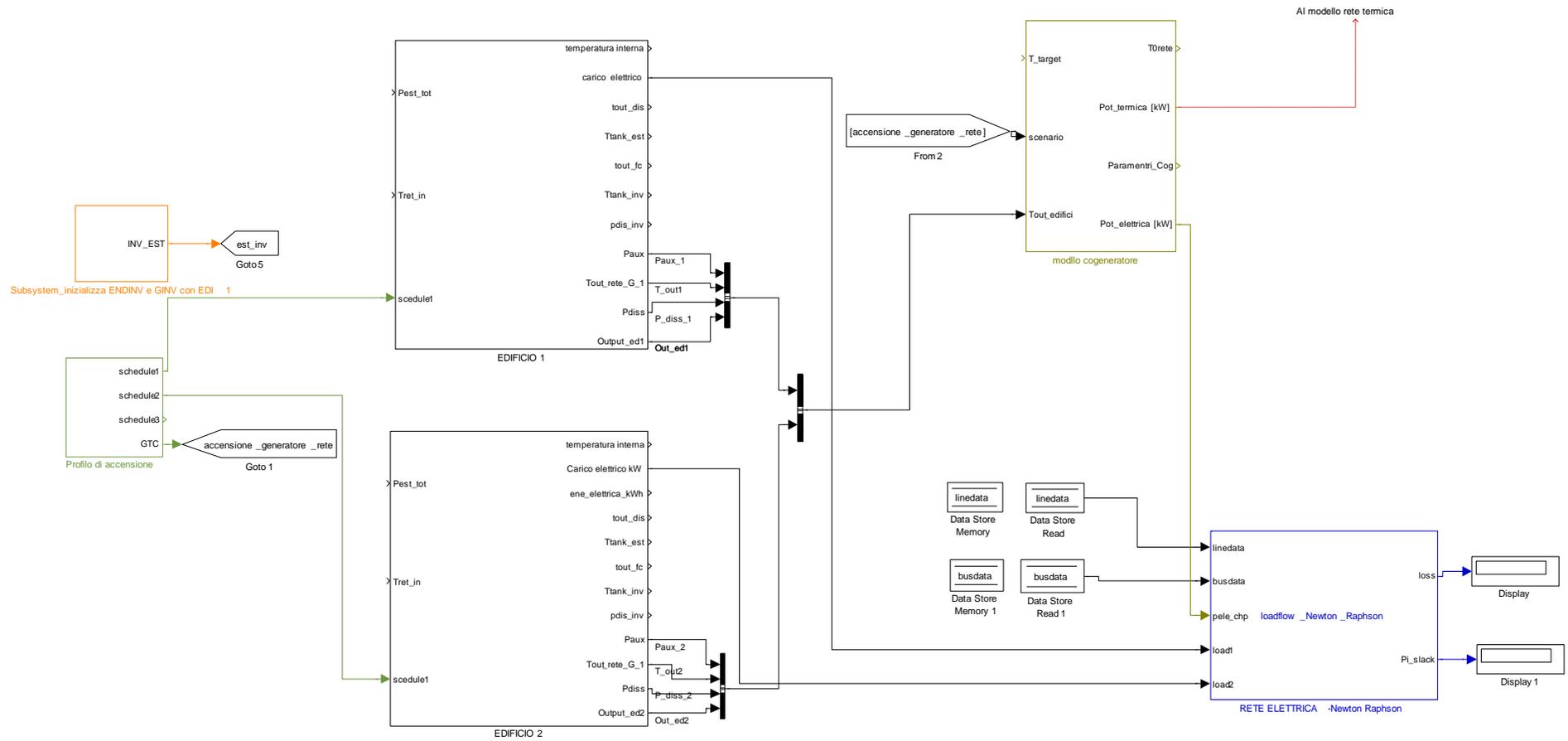


Figura 6: Modello simulink: esempio integrazione sistema multi edificio – rete elettrica - sistema multi utenza con due edifici

## 2.2 Rete Termica: modello in simulink e integrazione con il modello multi edificio

Il modello delle rete termica è stato implementato in collaborazione con l'Università La Sapienza Di Roma Dipartimento DIAE, per una descrizione dettagliata si rimanda al report DIAE RdS/2012/70. In questa sezione si vuole descrivere sinteticamente il modello utilizzato per il sottosistema termico e come lo stesso è stato integrato con i modelli analitici del sistema multi edificio e del sotto sistema elettrico.

Al fine di snellire l'onere e i tempi di calcolo, trattandosi di una simulazione annuale con time step di 900 sec, e semplificare la richiesta dei dati di input, sono state adottate delle semplificazioni che comunque non allontanano il risultato fino dalla realtà.

Il modello termico della rete fornisce in output la temperatura ad ogni nodo della rete, l'andamento nel dominio del tempo della temperatura media della rete e le perdite energetiche lungo la rete.

Nota la temperatura di mandata del fluido ( $T_0$ ), a valle del generatore è possibile calcolare l'andamento della temperatura lungo la rete e in particolare nei nodi di derivazione in ingresso alle sottostazioni di ogni edificio, secondo la formula:

**Tabella 2: Temperatura ad ogni nodo della rete nel dominio del tempo**

$T(x,t) = T_a + (T_{0(t)} - T_a)e^{-\frac{2\pi r H}{G\gamma}x} \text{ [}^\circ\text{C]}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• x è la distanza che separa l'edificio dal nodo a temperatura nota (<math>T_{0t}</math>)</li> <li>• dove</li> <li>• G: Portata del fluido del tratto di rete di cui si calcola la temperatura, ipotizzato costante [kg/s]</li> <li>• r: raggio del tubo sezione circolare [m]</li> <li>• H: trasmittanza del tubo [W/m2K]</li> <li>• <math>\gamma</math>: Calore specifico [J/kgK]</li> <li>• <math>T_a</math>= temperatura del terreno circostante, ipotizzata costante [°C]</li> </ul>

L'ipotesi di regime stazionario non consentirebbe comunque lo studio degli eventuali effetti benefici apportati dall'inerzia termica della rete nella gestione degli impianti di generazione.

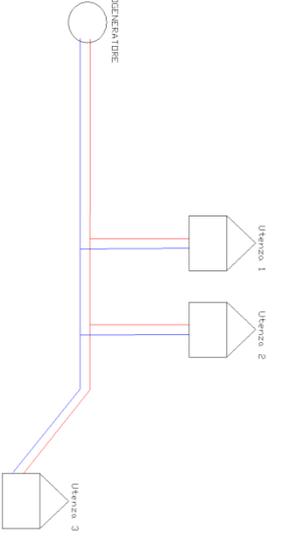
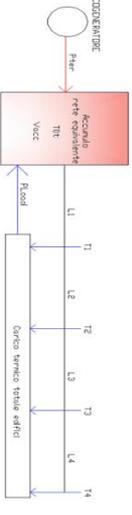
Lo studio nel dominio del tempo è stato reso possibile modellizzando la rete come un unico accumulo termico con volume e massa coincidente con quella del fluido termo-vettore contenuto nella rete da simulare, la cui temperatura media si ipotizza coincidente con la temperatura di mandata  $T_0$  della rete.

L'andamento orario della temperatura media dell'accumulo ideale  $T_0(t)$  è data dalla soluzione dell'equazione differenziale già implementata nei modelli d'impianto del Software ODESSE come descritto nel report RdS/2010/251

**Tabella 3: Temperatura dell'accumulo fittizio nel dominio del tempo**

$CAP * \frac{dT_t}{d\tau} = Q_{aux} - Q_{load} - U * S * (T_{0,t} - T_a)$ $Q_{loss} = (FF * V_{acc} * K * (T_t - T_{amb})) / 1000 \text{ [kW]}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cap: è la capacità termica dell'acqua accumulate nella rete;</li> <li>• <math>Q_{aux}</math>: la potenza fornita alla rete dal o dai generatore termici distribuiti a ogni step di simulazione;</li> <li>• <math>Q_{load}</math>: carico termico orario totale richiesto dagli edifici</li> <li>• U: trasmittanza termica delle tubazioni</li> <li>• <math>T_{0t}</math>: temperatura media dell'acqua all'istante t</li> <li>• <math>T_a</math>: temperatura del terreno circostante</li> <li>• FF: fattore di forma della tubazione</li> <li>• <math>V_{acc}</math>: volume totale della rete</li> <li>• K: inverso della costante di tempo dell'accumulo termico ideale</li> </ul>
<p>Equazione differenziale dell'accumulo termico ideale e calcolo delle perdite energetiche della rete</p>	

Definito lo schema della rete, l'utente, tramite una struttura dati in Simulink definisce i parametri dello schema equivalente della rete (Volume equivalente, lunghezze singole tratti, parametri tubi).

		<pre> %Configurazione parametri Rete Tt=15; %Temperatura del terreno (C) Diam=0.1; %Diam=Diametro tubazione(Metri) s_tubo=0.003; %Spessore tubo(m) s_isolante=0.072; %Spessore isolante (m) K_isolante=0.027; %Conducibilità termica coibentazione (W/mK)  %Configurazione topologia di rete L1=100; lunghezza tratto di rete L1 [m] L2=500; L3=100; L4=100;;  %ACCUMULO rete (fittizio) Vacc = pi*(Diam/2)^2*(L0+L1+L2+L3) %Volume accumulo [m3] sup=2*pi*(Diam/2)*(L0+L1+L2+L3); totale superficie disperdente tubazione [m2] FF=sup/VaccRE; fattore di forma tubazione </pre>
<p>Schema fisico rete termica esempio</p>	<p>Schema equivalente rete termica esempio</p>	<p>Struttura file Parametri in Simulink - configurazione rete termica esempio</p>

Lo scambio di informazioni run time tra la rete (accumulo termico ideale) e gli edifici avviene tramite le relative sottostazione d'utenza modellizzate con uno scambiatore di calore come descritto nei paragrafi seguenti.

Stabilita la modalità di interazione tra i sottosistemi, come rappresentato nello schema Simulink riportato di seguito, all'avvio delle simulazione (durata 8760 ore) il sottosistema di utenza (multi edificio) e il sottosistema di generazione fornisce i seguenti input necessari al calcolo della temperatura oraria dell'accumulo equivalente (T0t) e le perdite della rete (Qloss):

- Potenza termica prodotta dai generatori allacciati alla rete. Per il sottosistema di generazione possono essere utilizzati i modelli degli impianti di sviluppati per la piattaforma ODESSE (cogeneratore, caldaia, pompa di calore, solare termico) descritti nei report RdS/2011/178, RdS/2010/251 e RdS/2010/227.
- Carico termico orario di tutte le utenze connesse (edifici), fornito dal modello multi edificio descritto nei paragrafi successivi
- Portata costante (G) del fluido termo-vettore: è valutato in ogni ramo della rete dal sottosistema "multi edificio" in funzione del carico termico nominale di tutte le utenze servite.

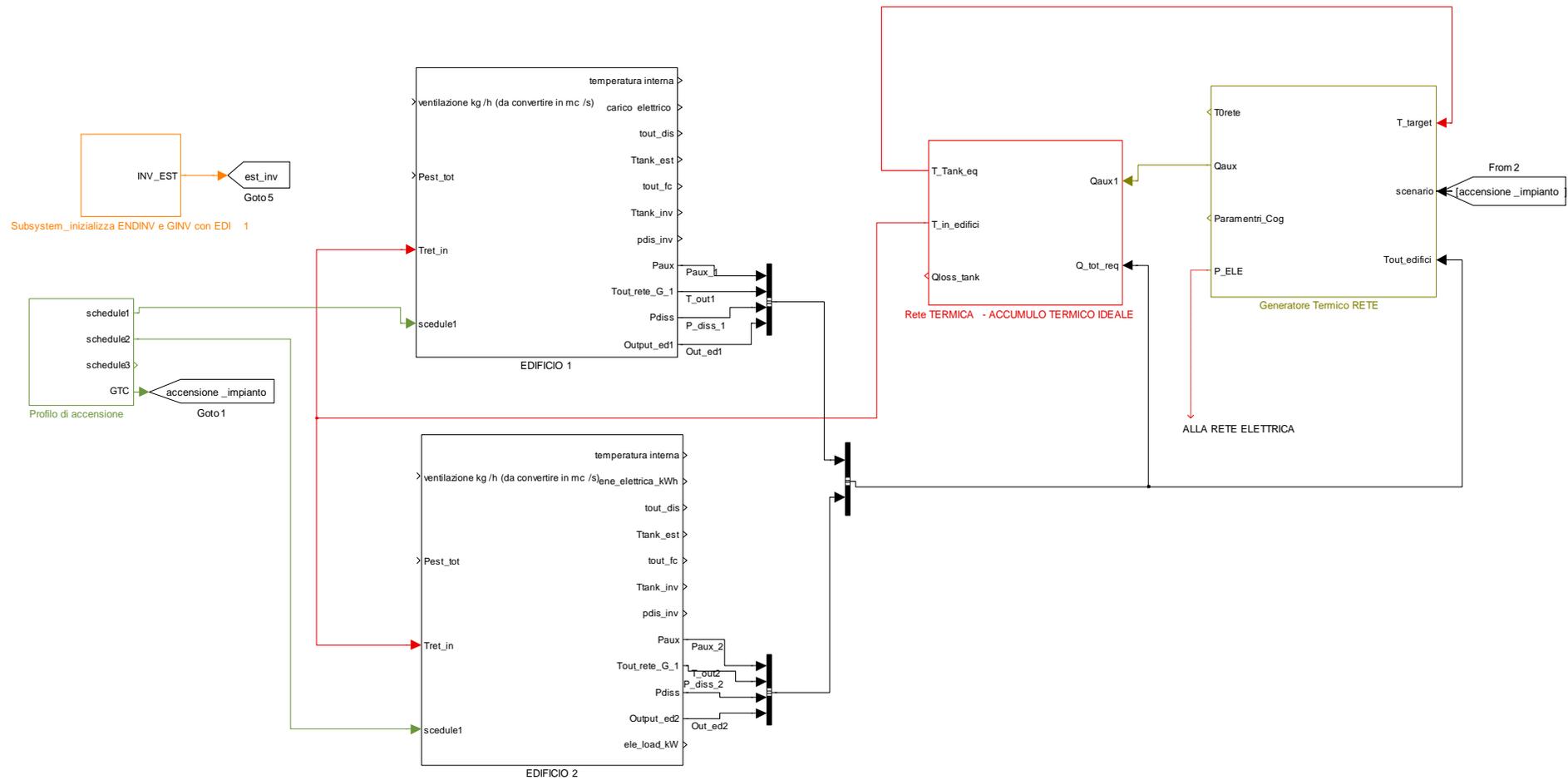


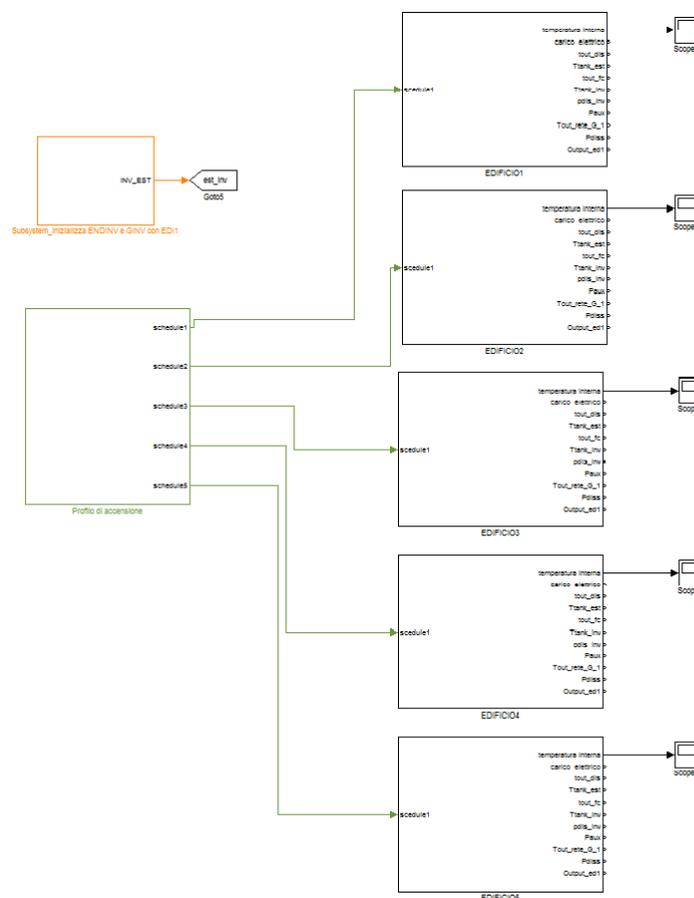
Figura 7: Modello simulink: esempio integrazione sistema multi edificio – rete termica- sistema multi utenza con due edifici

## 2.3 Modello Multi edificio

La gestione ottimizzata di una rete energetica non può prescindere dalla previsione dei carichi elettrici e termici delle singole utenze servite. A tal fine è stato esteso il modello di edificio “monozona” descritto dettagliatamente nel corso dei report delle annualità precedenti, riproducendolo, opportunamente modificato, in un numero definito di blocchi pari al numero massimo di utenze previste per la rete energetica locale.

Per lo studio in oggetto il cluster di edifici è stato limitato a cinque unità con l’intento di estendere, nel proseguo dell’attività, il numero di utenze ad un numero comunque scalabile, ma in ogni caso limitato alla dimensione di quartiere nell’ottica di ottimizzare l’interazione tra consumo e generazione locale dell’energia secondo il concetto di micro rete attiva.

Nella seguente figura si riporta la versione semplificata dello schema a blocchi simulink in cui sono riportati i cinque edifici che costituiscono il cluster potenziale del modello multi edificio in oggetto.



**Figura 8: Schema Simulink del modello Multi Edificio**

Ogni blocco contiene i modelli necessari per simulare il comportamento termico ed elettrico orario di ciascun edificio; in particolare il blocco edificio contiene i seguenti moduli :

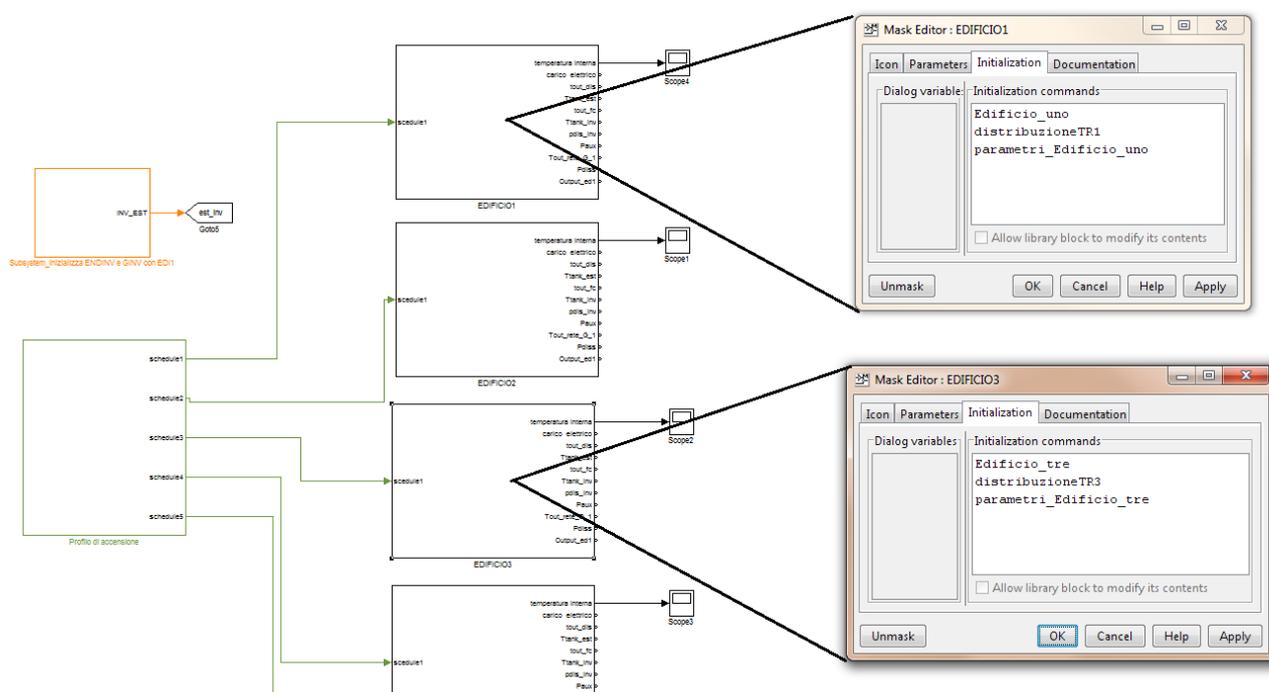
- Processore solare- Neural Weather Generator
- Calcolo della temperatura interna
- Sottostazione d’utente con scambiatore e accumulo per la connessione alla rete termica
- Calcolo del carico elettrico orario
- Calcolo del carico termico per acqua calda sanitaria
- Generatori profili di occupazione, infiltrazione illuminazione dell’edificio
- Generatore termico interno ausiliario
- Sistema di distribuzione della potenza termica (fan coil, radiatori)



Per la caratterizzazione di ciascun modulo che costituisce il singolo edificio sono stati opportunamente modificati i file di inizializzazione dei parametri già utilizzati per il modello monozona descritti nei precedenti report (RdS/2011/178, RSE/2009/188, RdS/2010/251).

Per continuare a utilizzare la stessa struttura dati per l’inizializzazione dei parametri termofisici degli edifici “monozona”, già implementata nelle precedenti annualità per il software ODESSE, è stato utilizzato lo strumento “mask editor” di simulink con il quale ogni blocco edificio viene inizializzato indipendentemente dagli altri senza la necessità di rinominare tutti i parametri della struttura dati del modello edificio.

Come si evince dalla seguente figura, ogni blocco edificio viene inizializzato con tre file contenenti rispettivamente le caratteristiche termofisiche dell’edificio, le caratteristiche dell’impianto termico (compresa la distribuzione) e i profili di utilizzo.



**Figura 10: Dettaglio dello strumento “mask editor” di simulink applicato all’inizializzazione dei singoli edifici**

Lo strumento “mask editor” di simulink da inoltre la possibilità di pianificare l’estensione dell’attuale modello “multi edificio” ad un cluster di edifici avente scala più ampia e comunque personalizzabile, rinominando semplicemente il nome dei singoli file lasciando inalterati i nomi dei singoli parametri. Di seguito si riporta una descrizione sintetica dei moduli che costituiscono ogni singolo edificio.

### 2.3.1 Processore solare

Come ampiamente descritto nei precedenti report (Report RSE/2009/188) il processore solare o Neural weather generator stima i dati climatici del sito, in particolare la temperatura ambientale e la radiazione solare incidente su ciascuna giacitura dell’edificio, attraverso l’utilizzo reti neurali evolutive (ENN) sviluppate in ENEA.

Il modello del Neural Weather Generator è stato importato dal software ODESSE e inserito all’interno di ciascun blocco edificio del nuovo simulatore.

La necessità di inserire all’interno di ciascun blocco edificio un modulo Neural Weather Generator è dettata dalla presenza di più edifici che potrebbero avere un numero di pareti con giaciture differenti tali da non consentirne la copertura con le 10 uscite dell’unico processore solare comune.

### 2.3.2 Calcolo della temperatura interna dell'edificio

Per il calcolo della temperatura interna oraria è stato importato il modello matematico utilizzato per l'edificio "monozona" di ODESSE implementato nelle annualità precedenti e descritto in RSE/2009/188. Il modello è stato ulteriormente semplificato eliminando il modulo per il calcolo del carico termico orario dell'edificio in quanto l'obiettivo del nuovo software sarà quello di stimare l'interazione tra edifici e reti energetiche in termini di flussi di potenza elettrica e termica tralasciando lo studio termico del singolo edificio effettuato nel dettaglio con il software ODESSE.

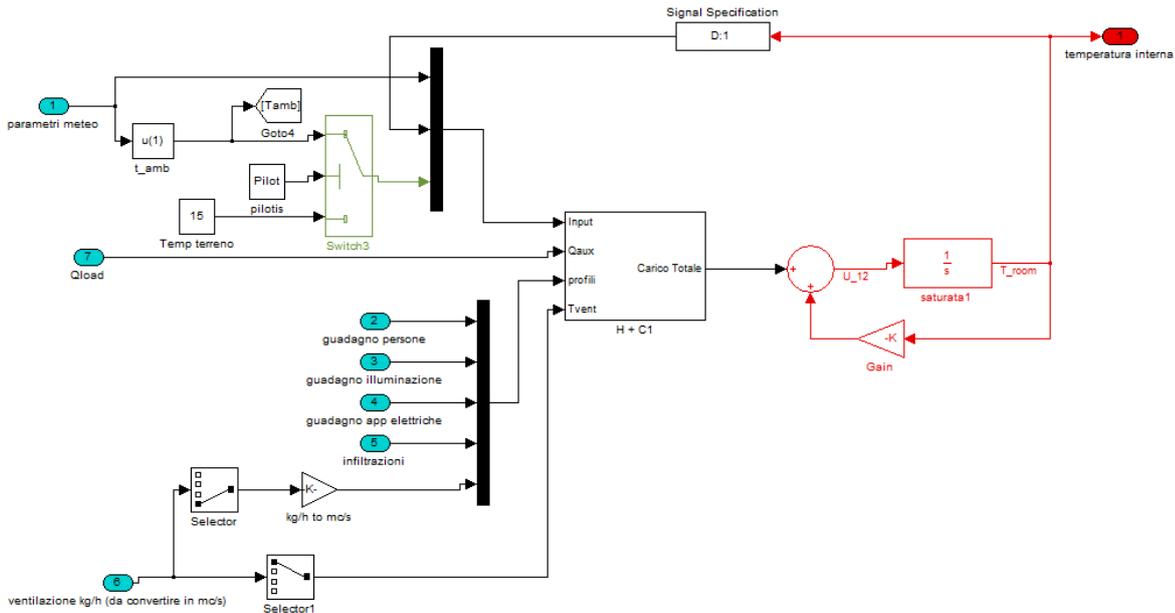


Figura 11: Blocco Simulink per il calcolo della temperatura interna oraria di ciascun edificio

Rispetto alla versione precedente, il parametro K non è più costante in quanto dipende dal numero di ricambi d'aria per infiltrazione e/o ventilazione che hanno un andamento variabile ad ogni passo; il calcolo di K è eseguito quindi, non più dal preprocessore in fase di inserimento dati da interfaccia ma da una *embedded function* implementata nel modello che consente di avere in input il profilo di infiltrazione e/o ventilazione impostato. Di seguito si riporta il codice implementato:

```

Embedded MATLAB Editor - Block: ODESSE_MZ_v03/EDIFICIO ZONA 1/K
File Edit Text Debug Tools Window Help
1 function K = fcn(u, ninf, dispers_tot, disp_ter, ThermCap_tot)
2 % This block supports the Embedded MATLAB subset.
3 % See the help menu for details.
4
5 - K = -(((ninf*1.2*1)+dispers_tot+disp_ter)/ThermCap_tot)*u;
Ready Ln 1 Col 1
    
```

in cui:

- ninf è il numero di ricambi d'aria per infiltrazione e/o ventilazione;
- 1.2 è la densità dell'aria in Kg/m<sup>3</sup>;
- 1 è il calore specifico dell'aria in KJ/kg K;
- dispers\_tot sono le dispersioni delle pareti verticale e della copertura;
- disp\_ter è la dispersione del terreno;
- ThermCap\_tot è la capacità termica dell'involucro edilizio;
- u è la variabile in ingresso al blocco (temperatura interna della zona considerata).

### 2.3.3 Sottostazione d'utenza

Ogni utenza che costituisce il modello "multi edificio" è connessa alla rete di teleriscaldamento tramite una sottostazione i cui componenti principali sono:

- scambiatore di calore
- accumulo termico
- valvole di sezionamento
- sistema di controllo e misura

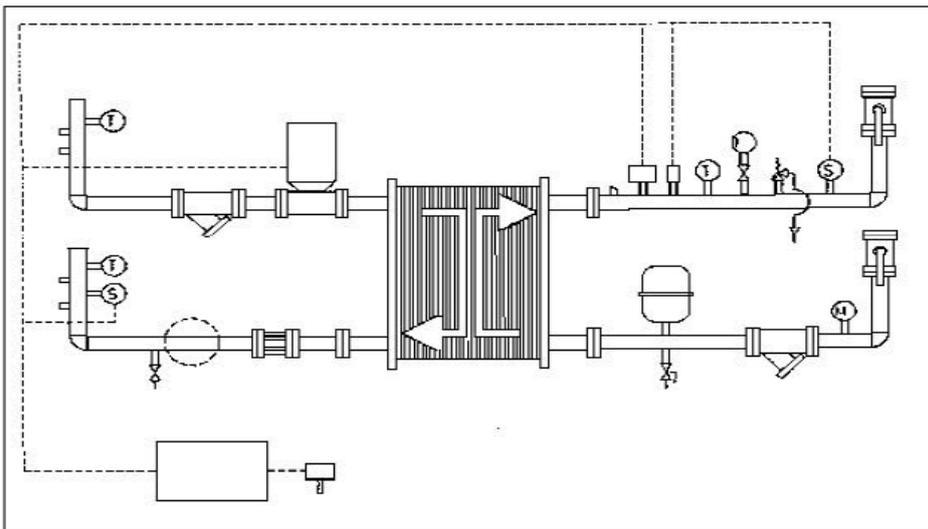


Figura 12: Schema impianto sottostazione d'utenza

#### Scambiatore di calore

Il modello dello scambiatore di calore implementa un sistema a flussi contrapposti, dove la potenza trasferita dalla rete all'utenza,  $P_{th}$ , è data da :

$$P_{th} = c_p * G * (T_{rete\_in} - T_{rete\_out})$$

La temperature di uscita lato rete,  $T_{rete\_out}$ , è calcolta come

$$T_{rete\_out} = T_{rete\_in} - [\eta * (T_{rete\_in} - T_{ute\_in}) * contr]$$

- $T_{rete\_in}$  : fornita dal modello dell'accumulo termico alimentato dallo scambiatore
- $T_{rete\_in}$ : fornita dal modello della rete termica
- $\eta$ : rendimento di scambio termico fissato al valore di 0,75
- $contr$ : è l'output d'uscita del sistema di controllo, descritto di seguito, variabile tra 0 e 1

La portata d’acqua calda G, in ingresso alla scambiatore di calore, è calcolata come funzione del carico termico nominale dell’edificio (dato dal prodotto tra il numero degli elementi terminali installati, fan coil o radiatori, e la potenza termica nominale di ciascuno) e dal salto termico nominale della rete tra mandata e ritorno (Delta\_T\_rete), come indicato di seguito:

$$G = P_{\text{fancoil}} * n_{\text{fancoil}} / (c_p * \Delta T_{\text{rete}})$$

La portata G in ingresso a ciascuna sottostazione d’utenza è uno dei parametri utilizzati per il dimensionamento della rete termica.

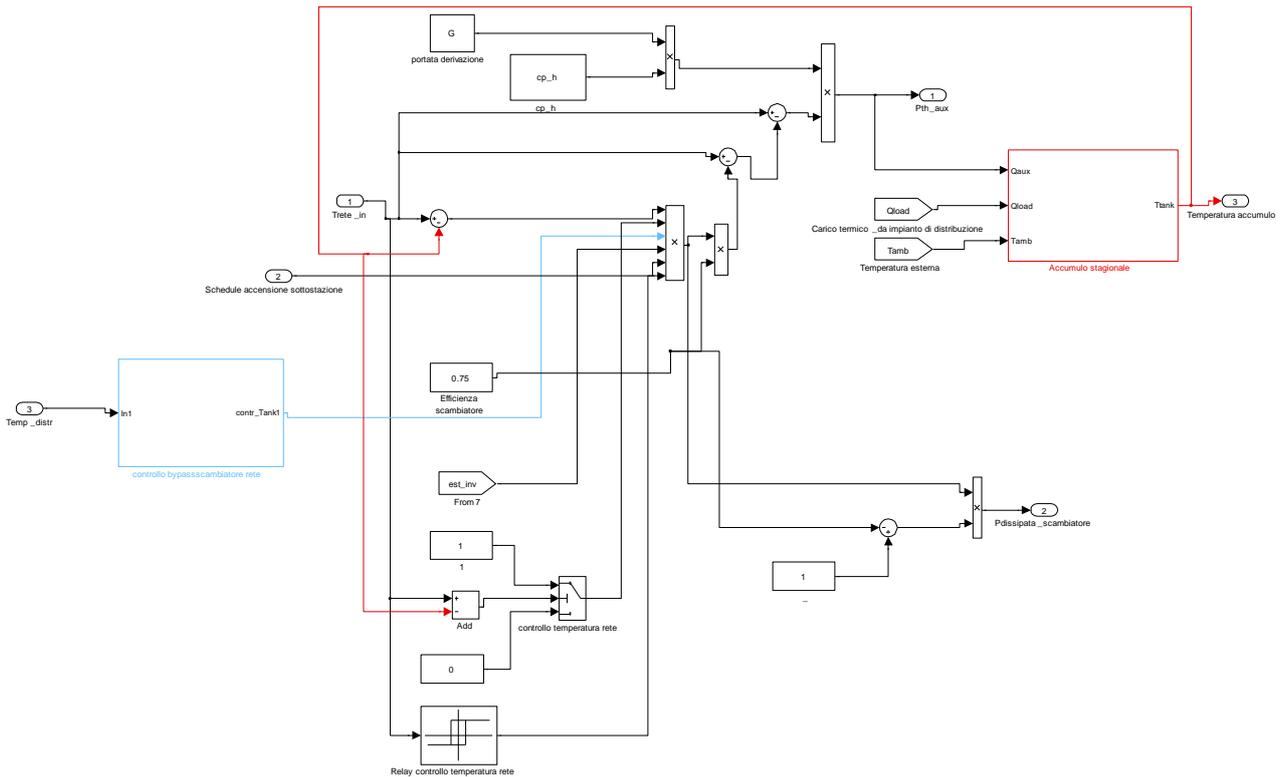


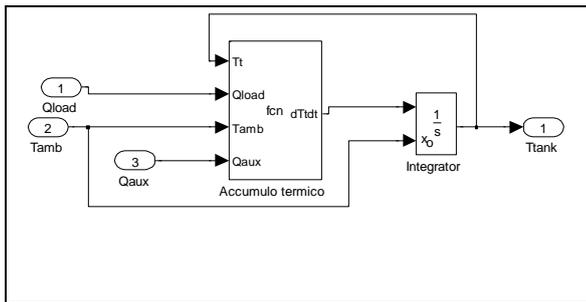
Figura 13: Schema simulink scambiatore di calore

**Accumulo termico**

Il modello dell’accumulo termico, presente nella sottostazione d’utenza, rappresenta il nodo di saldo tra il carico termico (Qload) dell’edificio e la potenza fornita dalla rete (Pth\_aux); la sua presenza ha una valenza non solo impiantistica (si disaccoppia il sistema di distribuzione interna dell’edificio con la rete termica esterna, in mood da poter lavorare anche a temperature diverse da quelle del teleriscaldamento, utile soprattutto nel caso di terminali a fan coil) ma anche modellistica in quando rappresenta con il suo volume l’inerzia del sistema di distribuzione interna dell’edificio. Quando la potenza termica fornita non riesce a compensare il carico termico, la temperatura nell’accumulo si abbassa fino raggiungere il valore della temperatura di accensione della caldaia di integrazione se presente nella sottostazione.

Il modello dell’accumulo termico è stato implementato riprendendo l’equazione differenziale già utilizzata nel software ODESSE (Report RdS/2010/251) e trascritta in una embedded Matlab function come di seguito descritto

**Tabella 4: Modello Simulink accumulo termico inerziale della sottostazione d'utenza**

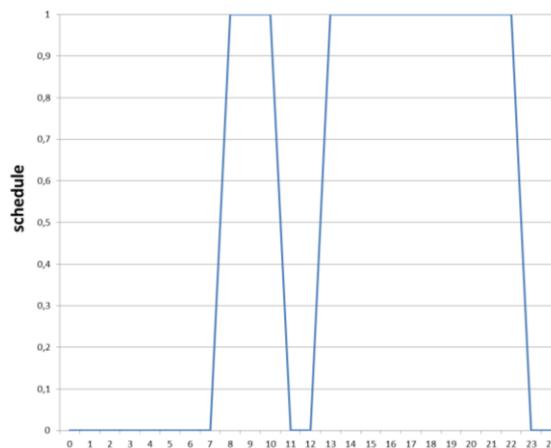
	<pre>function dTtdt = fcn(Tt,Qload,Tamb,Qaux,KTR,FFTR,VaccTR,cp_h) %#eml  dTtdt = (Qaux-Qload-(K/1000)*FF*Vacc*(Tt-Tamb))/(cp_h*1000*Vacc);  dove FF è il fattore di forma dell'accumulo Vacc è il volume in mc dell'accumulo K è la trasmittanza termica delle pareti dell'accumulo</pre>
---	--

### Sistema di controllo della sottostazione

La sottostazione d'utenza è gestita con quattro livelli di controllo :

a) *Schedule orario:*

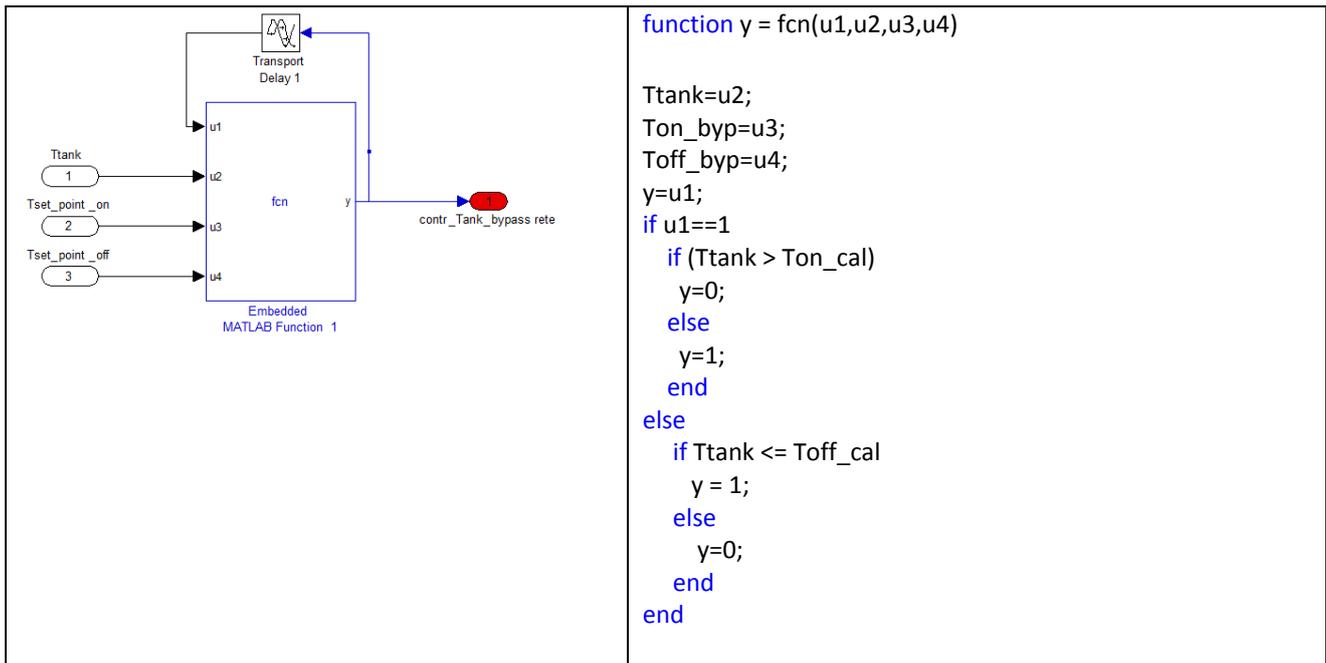
lo scambiatore viene staccato dalla rete nelle ore e nei giorni in cui l'edificio non deve essere riscaldato (non utilizzo dell'edificio). La programmazione delle ore di riscaldamento dell'edificio viene fatta dall'utente in funzione del profilo di utilizzo dell'edificio stesso (residenziale, terziario)



**Figura 14: Esempio schedule orario attivazione sottostazione d'utenza**

b) *Termostato accumulo caldo:*

Nel modello dello scambiatore di calore è implementato un termostato che apre e chiude la valvola del bypass con la rete quando l'accumulo termico della sottostazione arriva alla temperatura di set point. Per evitare frequenti interventi della valvola di bypass è stata imposta una banda morta definendo sia la temperatura di apertura che la temperatura di chiusura della valvola ( $T_{on\_byp}$ ,  $T_{off\_by}$ ). Queste ultime vengono fissate dall'utente in funzione del sistema di distribuzione (alta o bassa temperatura). Si riporta di seguito il modello del termostato implementato in una Embedded Matlab function.



**Figura 15:Modello simulink termostato scambiatore-accumulo caldo**

*c) Sensore temperatura di rete:*

Garantisce che il trasferimento di potenza avvenga sempre della rete all'accumulo caldo della sottostazione. Il sensore comanda la valvola di bypass a chiudersi ( $P_{th}=0$ ) quando la temperatura dell'accumulo è maggiore della temperatura di rete; situazione che si potrebbe presentare in condizioni di eccessivo carico per la rete (sovraccarico per errore progettuale) o nei casi in cui lo schedule di funzionamento della sottostazione di utenza, per errore, comanda l'entrata in servizio dello scambiatore nelle ore o nei giorni in cui i generatori connessi alla rete termica sono spenti.

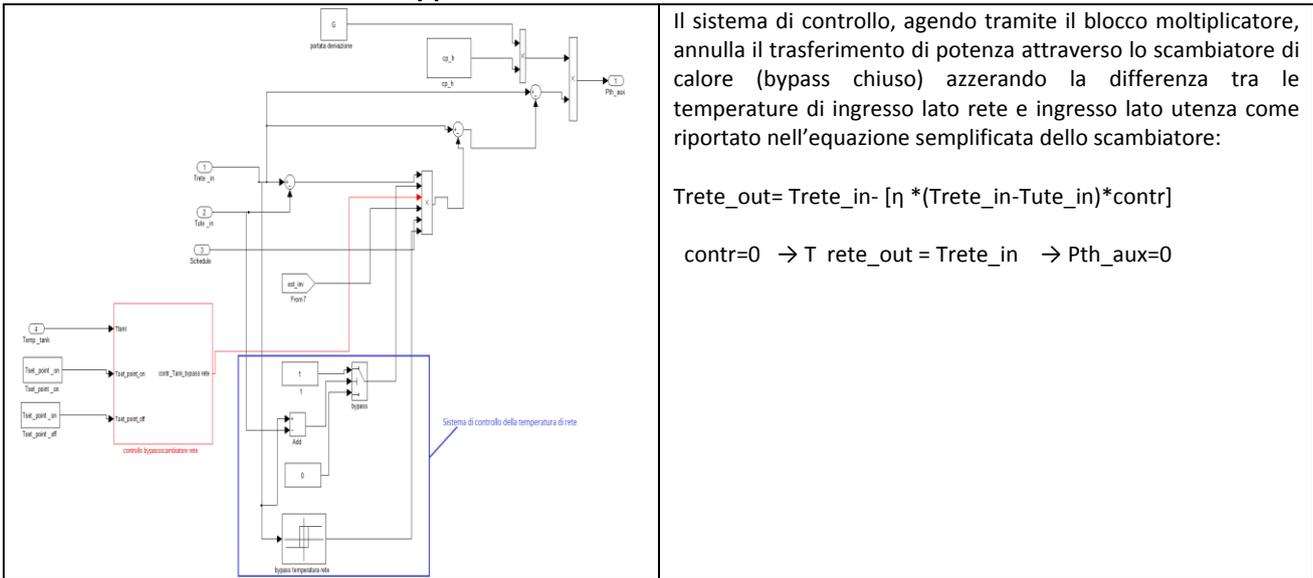
Il sensore, inoltre comanda il bypass dalla rete quando la temperatura di rete scende sotto un valore minimo settato in fase di inizializzazione della rete.

L'entrata in funzione dell'attuatore comandato dal "sensore temperatura rete" fornisce comunque una informazione sulla possibile cattiva progettazione o gestione della rete termica.

*d) Gestione stagione (estate inverno):*

dal modello Monozona di ODESSE è stato importato il contatore dei giorni con il quale viene individuato il periodo della stagione invernale e della stagione estiva in funzione della località climatica. Il segnale generato dal modulo estate inverno (0-1) agisce sul bypass dello scambiatore, chiudendo la sottostazione d'utenza durante la stagione estiva. Il controllo "estate inverno" verrà annullato quando la rete termica verrà esercita anche come teleraffrescamento.

**Tabella 5: Sistema di controllo del by pass della sottostazione d’utenza in Simulink**



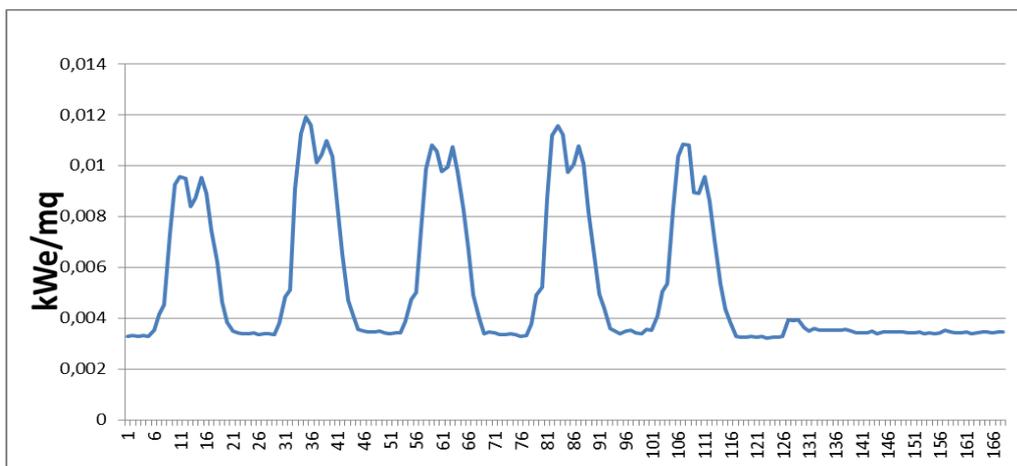
### 2.3.4 Carico elettrico edificio

Per il sistema “multi edificio”, trattandosi di possibili utenze eterogeneo sono state definite due curve di carico elettrico settimanali rispettivamente per edifici uffici e per edifici residenziali, con l’obiettivo futuro di integrare anche le curve di carico per utenze commerciali.

La curva del carico elettrico orario dell’edificio tipo residenziale è stato importato da ODESSE come descritto in Report RSE/2009/188;

Per la stima del carico elettrico di edifici tipo uffici, nel corso dell’ultima annualità sono stati elaborate le misure condotte durante una campagna di acquisizione strumentale di alcuni edifici ENEA in corso dal 2009.

L’analisi delle misure aggiornate a Luglio 2012, descritto nel dettaglio nei successivi paragrafi, ha consentito l’elaborazione di un profilo di carico medio settimanale adimensionalizzato rispetto alla superficie utile dell’edificio.



**Figura 16: carico elettrico adimensionalizzato rispetto alla superficie utile per edifici uffici,**

Per l'edificio tipo uffici, il carico elettrico settimanale medio è stato implementato in due lookup table di Simulink; il primo riproduce il profilo della settimana lavorativa, il secondo riproduce il profilo di consumo tipico del fine settimana coincidente con il "base load" dell'edificio ad affollamento nullo. Il carico elettrico commuta al "base load" quando si azzerano le schedule di occupazione dell'edificio definito dall'utente (ore serali, fine settimana, pausa pranzo, ecc).

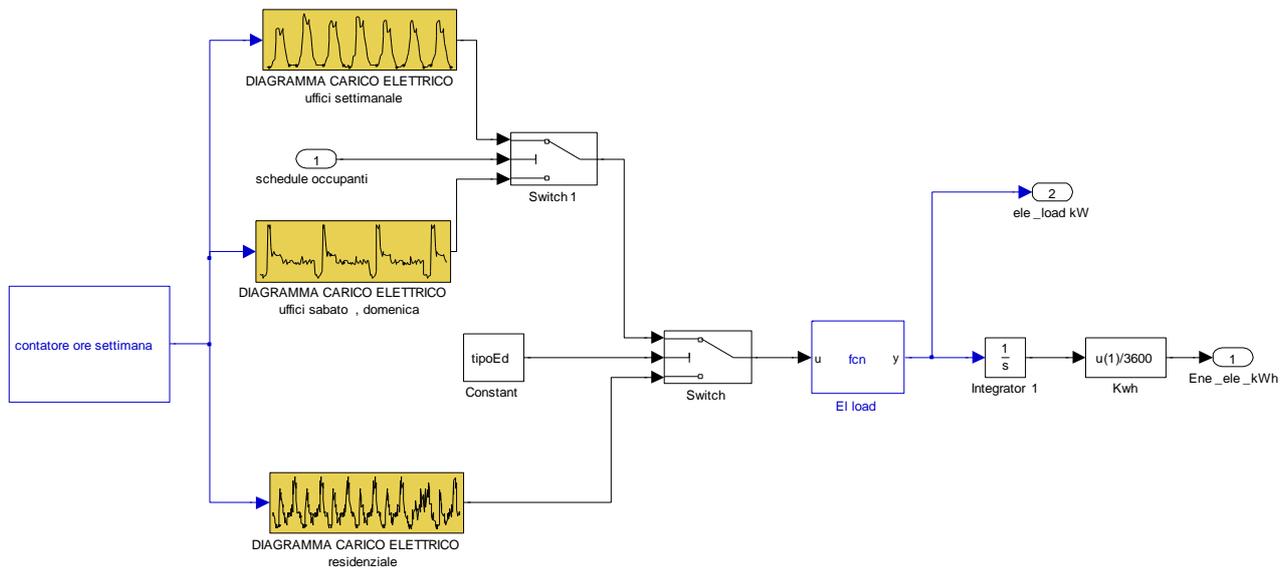
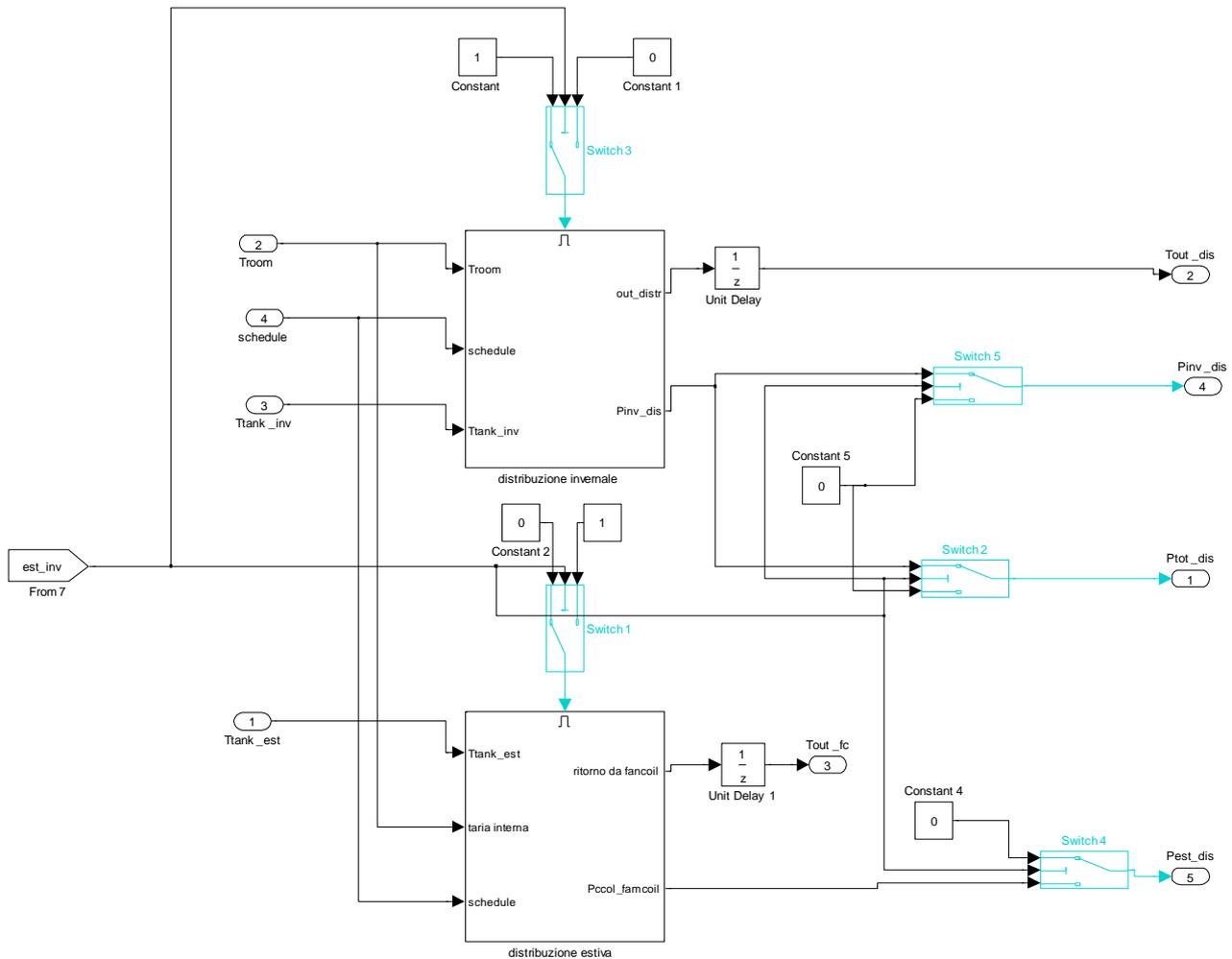


Figura 17: modello simulink per la stima del carico elettrico orario dell'edificio

### 2.3.5 Sistema di distribuzione della potenza termica (fan coil, radiatori) all'interno ciascun edificio

Rispetto al sistema mono edificio "monozona" implementato in ODESSE, dove il modello del sistema di distribuzione della potenza termica (Report RdS/2011/178) è implementato all'interno di ciascun blocco impianto (cogeneratore, solar cooling, pompa di calore, caldaia,..), nel modello multi-edificio il sistema di distribuzione è stato inglobato all'interno di ciascuna utenza e suddiviso in due sotto blocchi azionati separatamente dal segnale "est\_inv" in modo da far funzionare i terminali di impianto solo durante la stagione invernale e la stagione estiva come mostrato nello schema simulink della figura seguente.

Inoltre un segnale di "schedule" orario (input 4 schema seguente) aziona il terminale di impianto secondo la programmazione delle ore di riscaldamento dell'edificio coincidente con le ore di attivazione della sottostazione d'utente.



**Figura 18: Schema simulink terminali impianto termico.**

I modelli utilizzati per implementare il funzionamento dei terminali d'impianto sono stati sviluppati nel corso della precedente annualità come descritto in; in particolare all'interno del blocco "distribuzione invernale" sono stati implementati i modelli dei terminali tipo radiatore e tipo fancoil; con l'inizializzazione del parametro "typeDistr" da parte dell'utente si sceglie quale dei due terminali azionare per la stagione invernale. Il "blocco distribuzione estiva" contiene esclusivamente il modello del terminale tipo fan coil.

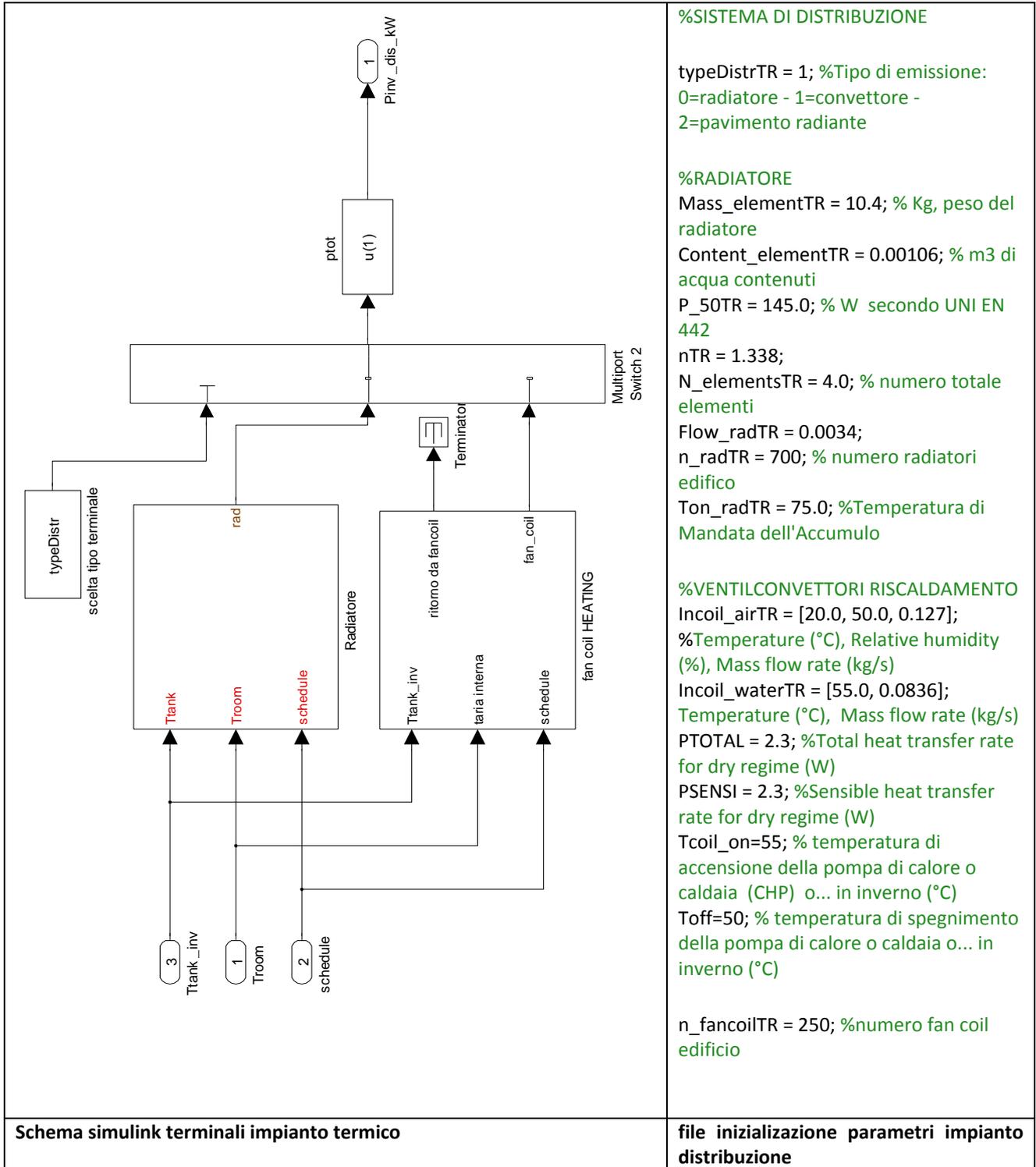


Figura 19: schema simulink terminali radiatori e pompa di calore per distribuzione invernale – file simulink inizializzazione parametri

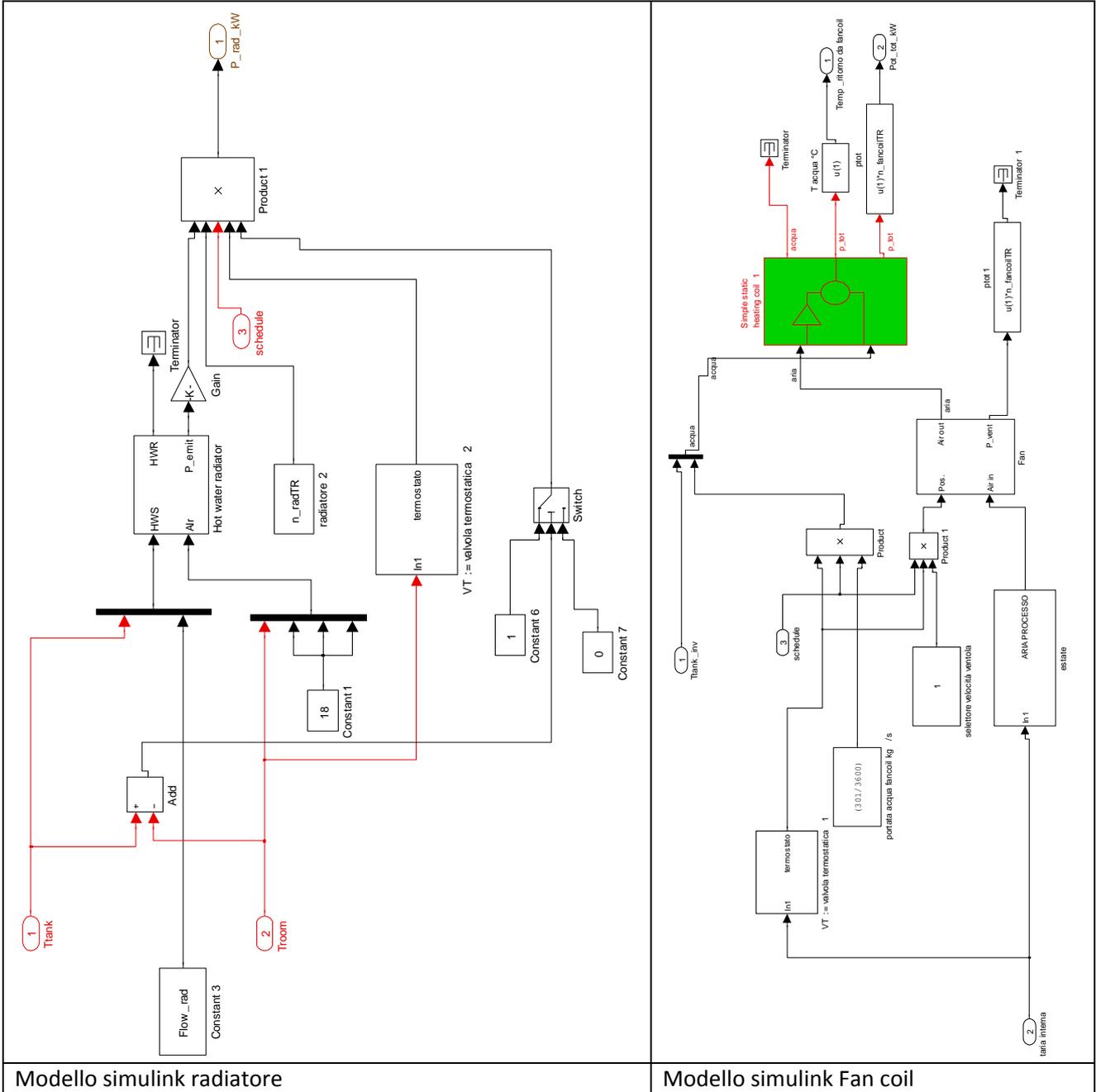


Figura 20: Modello in Simulink dei terminali del sistema di distribuzione

### 3. Software disponibili per la simulazione di sistemi energetici distribuiti

---

Il problema della progettazione e l'ottimizzazione di reti energetiche ha portato con se la difficoltà di avere uno strumento in grado di simulare tali tipologie di reti per permettere una sperimentazione. Negli anni, infatti, sono stati prodotti diversi software di questa tipologia, e, prima di scegliere di implementarne uno ex novo, essi sono stati studiati e valutati.

Sono presenti, infatti, sul mercato diverse tipologie di simulatori, e i due approcci più utilizzati si basano sulle serie temporali o su dati statistici.

In particolare sono stati esaminati alcuni tra i principali software di modellazione per reti termo -elettriche ormai di riferimento nel campo della progettazione e della ricerca come EnergyPlus, TRNSYS, HOMER, Message, Teleris, DIGSILENT di seguito descritti.

#### 3.1 TRNSYS

TRNSYS è un programma di simulazione sistemi con una struttura modulare. Utilizza un linguaggio di descrizione in cui l'utente specifica i componenti che costituiscono il sistema e il modo in cui sono collegati. La libreria fornita da TRNSYS include molti dei componenti che si trovano comunemente nei sistemi di energia termica ed elettrica, nonché dei componenti routine per gestire l'input dei dati meteo o altre funzioni dipendenti dal tempo e dai risultati della simulazione. La natura modulare del programma TRNSYS dà una grande flessibilità; facilita l'aggiunta al programma di modelli matematici non inclusi nella libreria standard TRNSYS.

TRNSYS è adatto a dettagliate analisi di qualsiasi sistema il cui il comportamento dipende dal tempo. Il software è diventato il riferimento per i ricercatori e ingegneri di tutto il mondo. Le principali applicazioni sono: sistemi solari (impianti solari termici e fotovoltaici), edifici a basso consumo energetico e sistemi HVAC, sistemi di energia rinnovabile, cogenerazione, celle a combustibile.

Le simulazioni effettuate con TRNSYS, sono molto dettagliate e onerose dal punto di vista computazionale. L'applicativo per la simulazione dinamica dell'edificio (TRNbuild, Type 56) non dà la possibilità di impostare un sistema multi edificio all'interno dell'ambiente di sviluppo.

#### 3.2 EnergyPlus

EnergyPlus è un software autonomo per la simulazione termoenergetica in regime dinamico del sistema edificio-impianto. E' un motore di calcolo in grado di restituire in output i consumi di energia, le temperature, i flussi termici di un edificio.

EnergyPlus è, inoltre, gratuito, opensource e in lingua inglese. Non essendo molto intuitivo e semplice nell'inserimento dei dati, si appoggia spesso ad interfacce grafiche esterne per risultare maggiormente user-friendly.

La complessità dell'utilizzo lo rende uno strumento non alla portata di utenti comuni.

#### 3.3 HOMER

Il software HOMER è un modello di calcolo per la simulazione e l'ottimizzazione di sistemi di generazione distribuita, realizzato dal "National Renewable Energy Laboratory" del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti.

Il software possiede, grazie ad un proprio data-base, numerosi modelli di componenti che possono essere coinvolti in un sistema di generazione distribuita. E' necessario inserire e collegare tali componenti in modo

appropriato nello schema di simulazione per poi caratterizzarli in funzione dello specifico sistema che si vuole studiare.

A questo punto HOMER simula l'esercizio del sistema analizzato in base ai bilanci di energia calcolati per ciascuna ora dell'anno ed ai parametri caratteristici dei singoli componenti del sistema. In questo modo viene fornita, per ogni ora, la richiesta di energia elettrica e termica dell'utenza, calcolando i relativi flussi di energia caratteristici dei componenti del sistema.

Per quanto riguarda le simulazioni che interessano il progetto, però, HOMER risulta ancora inutilizzabile, in quanto non effettua alcun calcolo sulla rete termica .

### 3.4 MESSAGE

Message (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impact) è un modello di ottimizzazione di sistemi energetici, utilizzato anche per la pianificazione energetica di medio e lungo termine e per l'analisi di scenari. Fondamentalmente si occupa, però, di fornire scenari basati sulla minimizzazione del costo totale del sistema in funzione dei vincoli inseriti dall'utente, non fornendo informazioni dinamiche del modello.

### 3.5 TELERIS

Il programma calcola il regime stazionario di una rete di tele riscaldamento di tipo parallelo (linea di andata e linea di ritorno).

In particolare, definita la rete, vengono calcolate: le pressioni e le temperature in tutti i nodi, le portate in tutti gli elementi, il calore fornito alle utenze, il calore dissipato.

L'utilizzo della metodologia delle matrici sparse consente di calcolare in modo rapido il regime stazionario di reti anche molto estese.

Pur essendo in grado di modellare reti in maniera intuitiva, si occupa solo di reti termiche e non elettriche.

### 3.6 DIGSILENT

DIGSILENT PowerFactory è un software di simulazione che si occupa di rilevamento, calcolo e simulazione di sistemi elettrici energetici, come ad esempio generatori e distributori di energia per l'industria e le reti elettriche civili.

Il programma integra tutte le funzioni di calcolo necessarie e combina in modo affidabile e flessibile gli algoritmi più moderni in un concetto innovativo di database.

È possibile calcolare complesse simulazioni dinamiche in intervalli di tempo variabili e su di modelli di rete completi. Il software è inoltre fornito di un linguaggio script integrato che permette all'utente di interfacciarsi con altre applicazioni.

L'architettura aperta del sistema di DIGSILENT PowerFactory supporta tutti gli standard e le funzioni necessarie per poter interagire con i maggiori linguaggi di programmazione.

Grazie alla sua interfaccia operativa grafica, è inoltre facile costruire il proprio modello di rete energetica. D'altro canto la numerosità degli oggetti forniti dal software e la capillarità delle specifiche richieste in fase di progettazione lo rende uno strumento accessibile solamente ad esperti nel settore, e non ad utenti entry level.

Pur essendo in grado di modellare e simulare nel dettaglio le reti elettriche, non si presta per simulazione energetica degli edifici (temperatura, carico termico) né di reti termiche connesse

Dall'analisi dei diversi software si è osservato che al momento non esistono strumenti che posseggano tutte le caratteristiche da noi ricercate per la simulazione delle reti energetiche locali: interfaccia user friendly, configurazione delle reti in maniera intuitiva, simulazione nel dominio del tempo, risultati fruibili da utenti

non necessariamente esperti, compatibilità con software commerciali, simulazione di sistemi multi edificio e delle reti sia elettriche che termiche locali.

Pertanto si rende necessario impostare e sviluppare un simulatore che possa assolvere a tali compiti e che sia modellabile ed espandibile, in vista di lavori futuri.

## 4. Applicazione del nuovo software di simulazione ad un cluster di edifici reale

Si riporta di seguito un primo esempio applicativo del nuovo tool, dal quale si evincono le potenzialità della piattaforma integrata in sviluppo capace di simulare il comportamento elettrico e termico del sistema di approvvigionamento energetico ad una utenza multi edificio.

L'insieme di edifici a cui si fa riferimento ha una destinazione d'uso e un profilo di occupazione definito. Negli scenari di seguito riportati, variano i diagrammi orari di accensione del sistema termico centralizzato e l'attivazione delle singole caldaie di backup.

In particolare l'applicazione seguente fa riferimento a tre edifici con tipologia di utenza eterogenea riscaldati tramite un'unica microrete termica locale ed allacciate alla rete di elettrica in bt del distributore locale.

La rete termica è servita da un'unità cogenerativa funzionante in parallelo alla rete bt con orari di accensione dipendenti dallo scenario simulato.

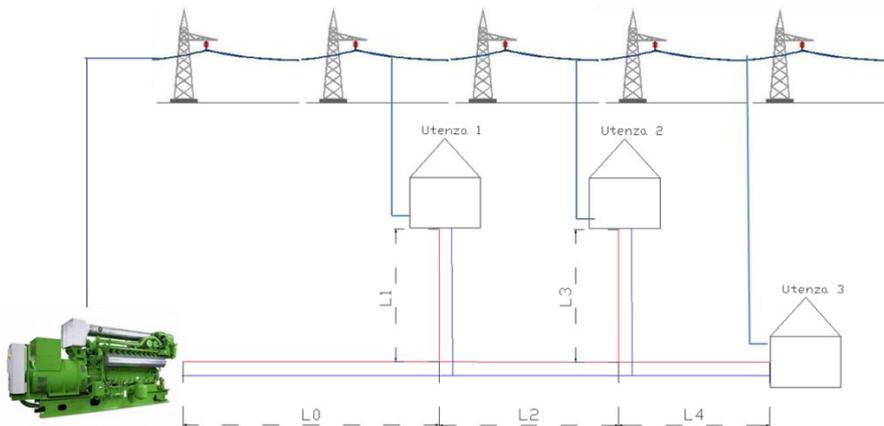


Figura 21: Schema semplificato del sistema multi-edificio integrato al sottosistema elettrico e termico

Per valutare la migliore strategia di gestione della rete termica, in funzione dell'inerzia termica dell'accumulo e dei profili di occupazione degli edifici, vengono definite 5 scenari di funzionamento del cogeneratore.

Si riporta di seguito lo schema a blocchi della di interazione dei sottosistemi:

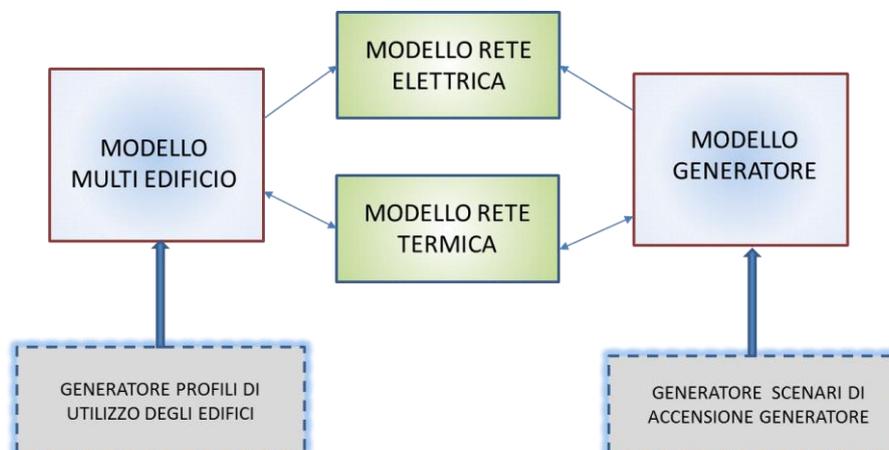


Figura 22: Schema interazione sottosistemi elettrico e termico della nuova piattaforma software

Si riportano di seguito alcune delle principali caratteristiche degli edifici connessi alla micro rete energetica.

## 4.1 Caratteristiche degli edifici simulati nel esempio applicativo

### 4.1.1 Edificio 1

Tipo utenza: Commerciale

Numero massimo di occupanti: 600

Altezza	m	21
Lunghezza	m	60.6
profondità	m	14.2
Totale area riscaldata	m <sup>2</sup>	5901.95
Volume	m <sup>3</sup>	17705.8
fattore di forma		0.28
Piani	n	7
Trasmittanza termica pareti	W/m <sup>2</sup> k	0.326
Trasmittanza termica finestre	W/m <sup>2</sup> k	2,6
Trasmittanza termica solaio terra	W/m <sup>2</sup> k	0.358
Trasmittanza termica solaio intermedio	W/m <sup>2</sup> k	1.545
Trasmittanza termica solaio copertura	W/m <sup>2</sup> k	0.326

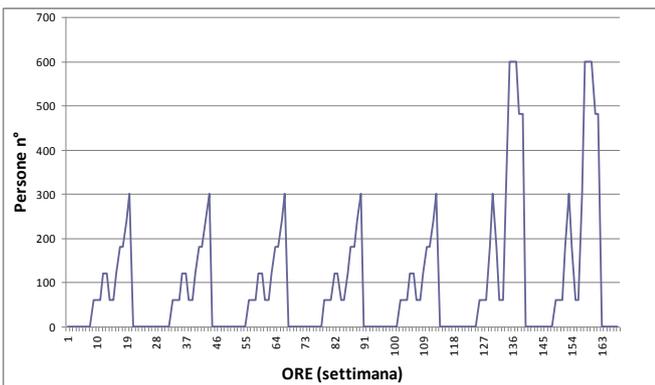


Figura 23: Caratteristiche termo fisiche dell'edificio 1 e profilo occupazione (da Lunedì a Domenica)

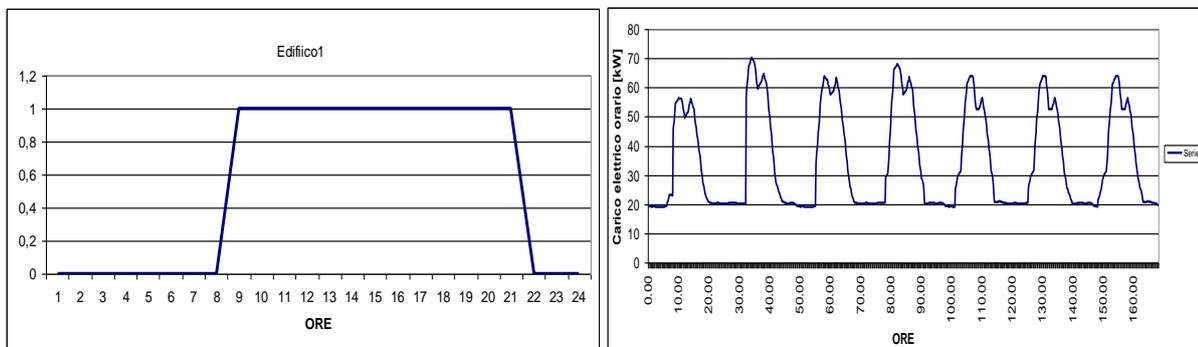


Figura 24: profilo di attivazione sottostazione d'utenza e/o caldaia - profilo diagramma di carico elettrico giornaliero edificio 1

### 4.1.2 Edificio 2

Tipo utenza: uffici

Numero massimo di occupanti: 30

Altezza	m	6
Lunghezza	m	22
profondità	m	19
Totale area riscaldata	m <sup>2</sup>	843
Volume	m <sup>3</sup>	2530
fattore di forma		
Piani	n	2
Trasmittanza termica pareti esterne	W/m <sup>2</sup> k	0,43
Trasmittanza termica finestre	W/m <sup>2</sup> k	2,5
Trasmittanza termica solaio terra	W/m <sup>2</sup> k	0,48
Trasmittanza termica solaio intermedio	W/m <sup>2</sup> k	1,45
Trasmittanza termica solaio copertura	W/m <sup>2</sup> k	0,54

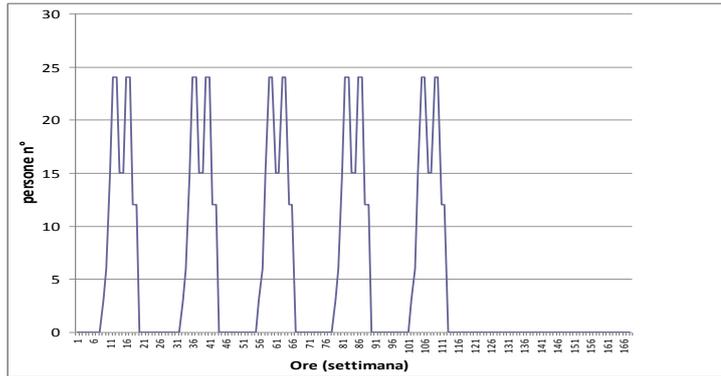


Figura 25: Caratteristiche termo fisiche dell'edificio 2 e profilo occupazione (da Lunedì a Domenica)

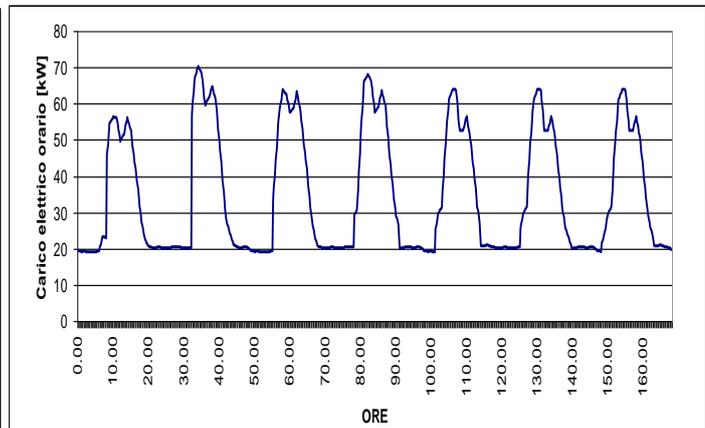
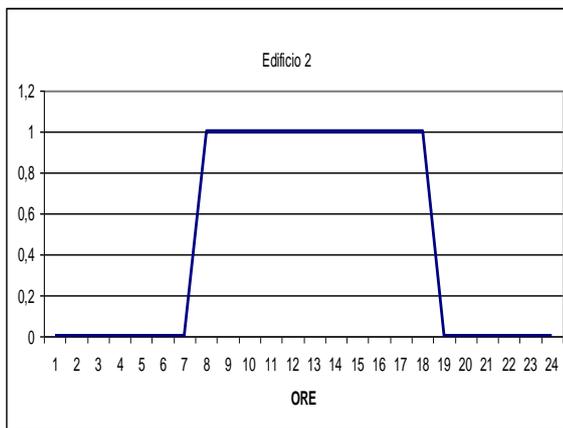


Figura 26: profilo di attivazione sottostazione d'utenza e/o caldaia - profilo diagramma di carico elettrico giornaliero edificio 2

### 4.1.3 Edificio 3

Tipo utenza: residenziale

Numero massimo di occupanti: 30

Altezza	m	10
Lunghezza	m	10
profondità	m	10
Totale area riscaldata	m <sup>2</sup>	300
Volume	m <sup>3</sup>	1000
fattore di forma		
Piani	n	3
Trasmittanza termica pareti esterne	W/m <sup>2</sup> k	0,329
Trasmittanza termica finestre	W/m <sup>2</sup> k	2,29
Trasmittanza termica solaio calpestio	W/m <sup>2</sup> k	0.362
Trasmittanza termica solaio copertura	W/m <sup>2</sup> k	0.322

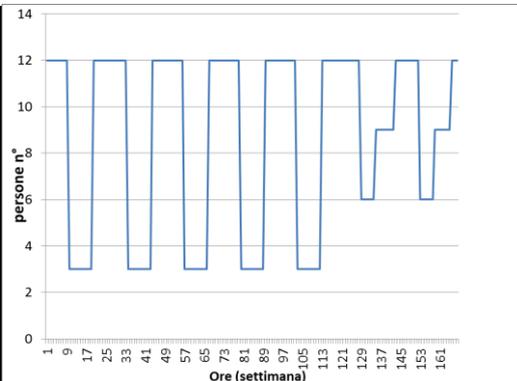


Figura 27: Caratteristiche termo fisiche dell'edificio 2 e profilo occupazione (da Lunedì a Domenica)

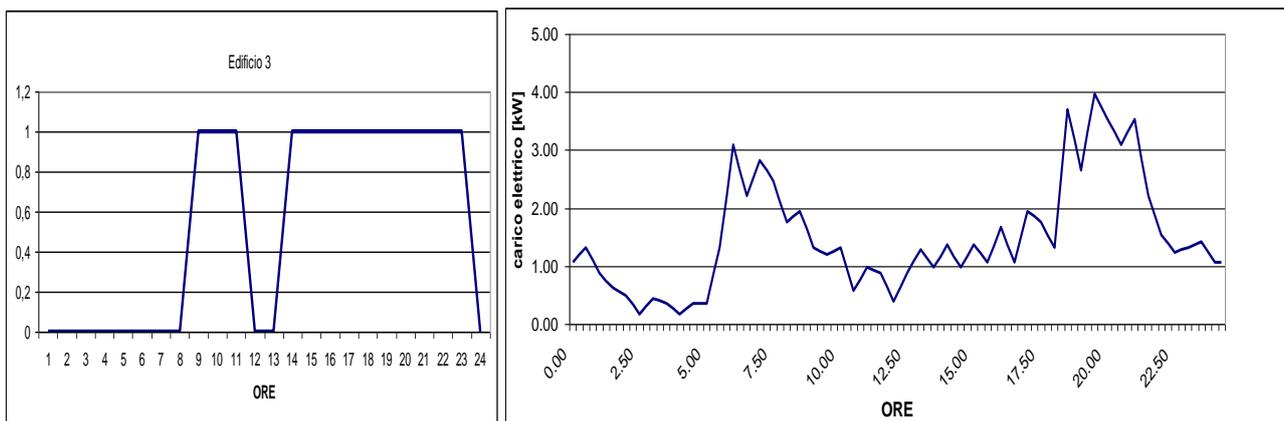


Figura 28: profilo di attivazione sottostazione d'utenza e/o caldaia - profilo diagramma di carico elettrico giornaliero edificio 2

Di seguito si riporta una tabella di sintesi delle caratteristiche dei singoli edifici simulati e dei relativi impianti centralizzati di riscaldamento:

Tipologia edifici	volume mc	Carico termico nominale edificio [kW]	ore equivalenti riscaldamento * [h]	tipo distribuzione	n° elementi n*	potenza singolo elemento [kW]	Potenza totale installata-P_fan [kW]	Portata fluido - G-	
								ingresso soostazione rete- edificio**	Potenza caldaia ausiliaria
								kg/s	[kW]
commerciale	17705	531,15	2016	fancoil	250	2,3	575	9,15	550
uffici	2530	75,9	912	fancoil	40	2,3	92	1,46	90
residenziale	1000	30	1680	fancoil	10	2,3	23	0,36	30

\* Il valore delle ore equivalenti di riscaldamento è dato dal numero di ore di funzionamento dell'impianto di riscaldamento giornaliero (legato al profilo di occupazione dell'edificio) per la durata della stagione di riscaldamento secondo il DPR 412/93.

\*\* La portata d'acqua, G, in ingresso allo scambiatore di calore della sottostazione di utenza per ciascuno dei tre edifici secondo la formula riportata nel paragrafo precedente.

#### 4.1.4 Caratteristiche della rete termica locale

Per la condotta principale e per i singoli rami della rete termica in oggetto sono state calcolate le seguenti portate:

$G_0 = 10,97$	(kg/s) – portata totale del fluido che attraversa il tratto di rete L0
$G_1 = 9,15$	(kg/s) – portata totale del fluido che attraversa il tratto di rete L1
$G_2 = 1,82$	(kg/s) – portata totale del fluido che attraversa il tratto di rete L2
$G_3 = 1,46$	(kg/s) – portata totale del fluido che attraversa il tratto di rete L3
$G_4 = 0,36$	(kg/s) – portata totale del fluido che attraversa il tratto di rete L4

Si riportano di seguito le principali caratteristiche della rete termica, tratte dal file dei parametri in Simulink del sottosistema termico simulato:

$T_t=15$ ;            Temperatura del terreno (gradi C)  
 $Diam=0.1$ ;        Diam=Diametro tubazione(Metri)  
 $s_{tubo}=0.003$ ;   Spessore tubo(Metri)  
 $s_{isolante}=0.072$ ; Spessore isolante della tubazione(Metri)  
 $Krete=0.4$ ;        Trasmittanza termica tubazione (W/m<sup>2</sup>K)

$L_0=50$ ; %Lunghezza tratta rete L0 [m]  
 $L_1=1$ ; %Lunghezza tratta rete L1 [m]  
 $L_2=100$ ; %Lunghezza tratta rete L2 [m]  
 $L_3=50$ ; %Lunghezza tratta rete L3 [m]

ACCUMULO rete (fittizio)  
 $VaccRE\ 9,45$  : Volume accumulo [m<sup>3</sup>]

#### 4.1.5 Caratteristiche rete elettrica

La rete cui si farà riferimento per i test è una rete in bassa tensione (0,4 kV) alimentata da un trasformatore MT/bT da 250 kVA, le cui caratteristiche sono riassunte di seguito:

$A_n = 250$  kVA  
 $V_{cc}\% = 6\%$   
 $V_{1n}=20$  kV  
 $V_{2n}=0,4$  kV  
 $P_{cc} = 3800$  W

Da questi dati possono desumersi i parametri longitudinali del trasformatore:

$R_t = 0,00978\ \Omega$   
 $X_t = (Z_t^2 - R_t^2)^{0,5} = 0,03714\ \Omega$

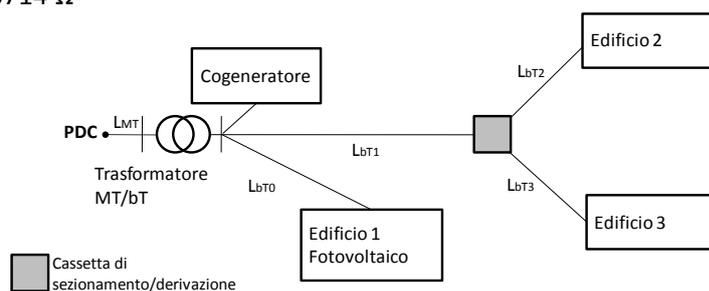


Figura 29 – Modello circuitale semplificato del sistema multi-edificio considerato nelle applicazioni

Come si evince dallo schema elettrico, nello stesso nodo dell'edificio 1 è installato un campo fotovoltaico avente Potenza nominale 20 KWp. La produzione oraria del campo fotovoltaico è stata generata dal corrispondente modello presente nel software ODESSE e descritto nel report Report Rds/2010/251.

Nello studio in oggetto sono stati esaminati con maggior dettaglio i risultati ottenuti dalla simulazione dei diversi scenari di gestione del sottosistema termico. Per una analisi più dettagliata del sottosistema elettrico si rimanda al report DIEETCAM Rds/2012/69

Il trasformatore MT/Bt rappresenta il nodo di saldo per i flussi di potenza che transitano nella rete simulata. Per l'analisi energetica di ciascun scenario è stato considerato rendimento mix elettrico nazionale pari a 0,45.

#### 4.1.6 Caratteristiche stazione di generazione centralizzata

##### Cogeneratore

	Motore a combustione
Tipo	interna
Potenza elettrica nominale	105 kW
Potenza termica nominale	170 kW
rendimento elettrico nominale	0,372
Max temp. ingresso acqua raffreddamento	107 °C
Oneri di manutenzione	2.016 €/h di funz.

##### Caldaia ausiliaria

	Caldaia a gas naturale
Tipo	
Potenza termica nominale:	400 kW
Rendimento termico nominale:	0,85

#### 4.1.7 Descrizione dei singoli scenari

In tutti gli scenari descritti in seguito, è stata effettuata una simulazione annuale su 8760 ore con un intervallo di tempo elementare di 15 minuti.

Il cogeneratore funziona in modalità inseguimento termico, spento durante la stagione estiva; tutta la produzione elettrica è immessa in rete e valorizzata secondo il piano tariffario riportato nel paragrafo seguente. La produzione ad inseguimento termico del cogeneratore varia in relazione allo scenario considerato

Nella tabella seguente si riporta la descrizione sintetica dei 5 scenari ipotizzati, indicando in particolare per ogni scenario

**Tabella 6: Presenza generatori termici per ciascun scenario considerato**

	Generatore Termico Centralizzato (cogeneratore + caldaia integrazione)	Generatore termico Ed1	Generatore termico Ed2	Generatore termico Ed3	Nota
Scenario 0	NON ATTIVO	ON	ON	ON	
Scenario 1	Attivo 24 ore su 24	OFF	OFF	OFF	
Scenario 2	Attivo 24 ore su 24	OFF	ON	ON	
Scenario 3	Attivo dalle 08 alle 20	OFF	OFF	OFF	
Scenario 4	Attivo dalle 08 alle 20	OFF	ON	ON	
Scenario 5	Attivo 24 ore su 24	OFF	OFF	OFF	Temperatura rete 15 °C in meno rispetto scenario 1

**Tabella 7 Potenza termica di ciascun generatore termico associata a ciascun scenario simulato**

	GTC		GED1 [kW]	GED2 [kW]	GED3 [kW]
	COGENERATORE [kWt]	CALDAIA INTEGRAZIONE [kW]			
scenario 0	0	0	550	90	30
scenario 1	170	400	0	0	0
scenario2	170	400	0	90	30
scenario3	170	400	0	0	0
scenario4	170	400	0	90	30
scenario 5	170	400	0	0	0

Nella tabella precedente si indica con GTC il generatore termico centralizzato (cogeneratore con caldaia di integrazione) a servizio della rete di teleriscaldamento, con GED1, GED2, GED3 la caldaie autonome installate presso ciascuno dei tre edifici presenti nel distretto simulato.

#### 4.1.8 Tariffe gas ed energia elettrica di riferimento

Al fine di poter effettuare una analisi economica associata a ciascuno dei 5 scenari simulati sono stati definiti tra i seguenti costi di gestione:

- Gas non defiscalizzato singoli utente: 0.86 [€/Sm<sup>3</sup>]
- Gas non defiscalizzato produttore : 0.70 [€/Sm<sup>3</sup>]
- Gas defiscalizzato: 0.40 [€/Sm<sup>3</sup>] (solo per cogenerazione)
- Energia elettrica ceduta dal cogeneratore in fascia F1 = 0.1034; [€/kWh]
- Energia elettrica ceduta dal cogeneratore in fascia F1 = 0.0872; [€/kWh]
- Energia elettrica ceduta dal cogeneratore in fascia F1 = 0.0762; [€/kWh]

## 4.2 Risultati di simulazione caso applicativo

### 4.2.1 Scenario zero

Nello scenario zero le simulazioni sono eseguite in assenza della rete termica e del cogeneratore; ciascuna utenza viene riscaldata dalla propria caldaia a gas le cui potenze sono riportate in tabella precedente. Si riportano di seguito i principali indici energetici economici relativi alla simulazione dello scenario zero

**Tabella 8: Energia primaria consumata dai generatori termici**

Energia primaria Totale Gen. edificio 1	662223,8 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 2	23618,06 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 3	9133,796 kWh
Energia primaria Generatore rete	0 kWh
<b>Energia primaria totale</b>	<b>694975,6 kWh</b>

**Tabella 9: Flussi energetici in ingresso e uscita dalla rete termica**

Energia utile da rete Edificio 1	0 kWh
Energia utile da rete Edificio 2	0 kWh
Energia utile da rete Edificio 3	0 kWh
Energia ceduta alla rete dal generatore	0 kWh
Energia dispersa dalla rete termica	0 kWh
Rendimento termico rete	-

Poiché lo scenario prevede il funzionamento di ciascun edificio in isola, i flussi energetici sulla rete sono tutti pari a zero. Nella tabella seguente si riportano i consumi di energia primaria specifici per superficie riscaldata di ciascun edificio. I maggiori consumi dell'edificio 1 sono dovuti anche al profilo di utilizzo dello stesso che prevede un maggiore numero di ore di accensione degli impianti termici rispetto agli altri due edifici

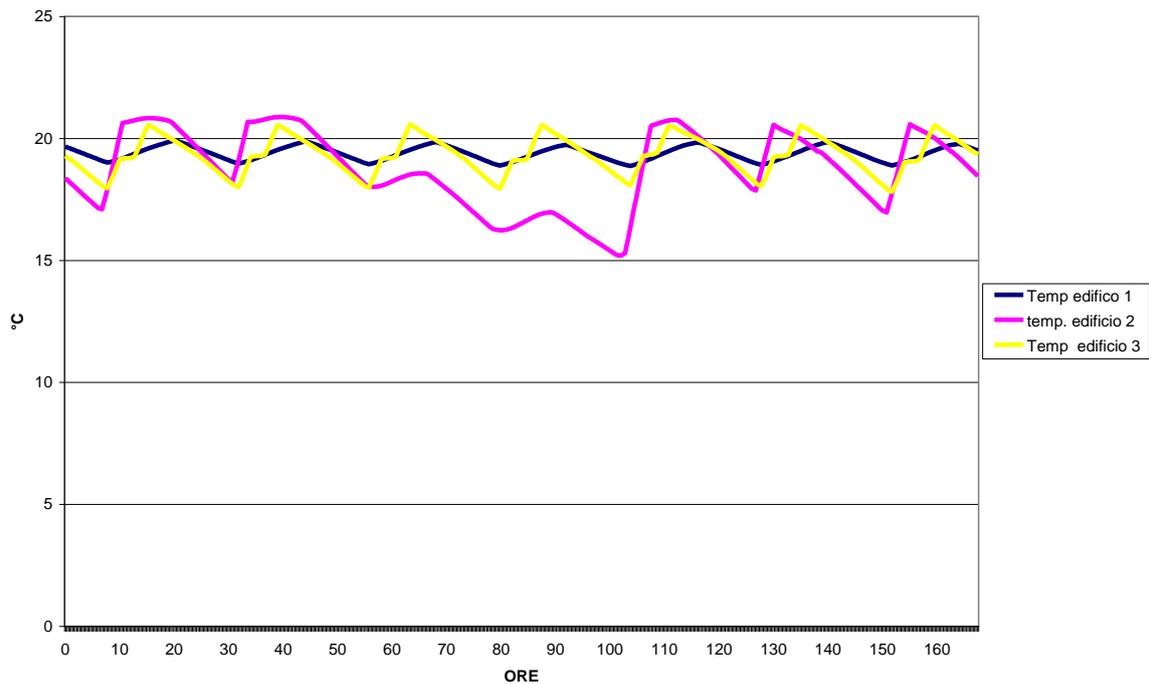
**Tabella 10: Energia primaria specifica consumata da ciascuno dei tre edifici simulati**

Energia primaria totale Edificio 1	112,2042 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 2	28,01667 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 3	30,44599 kWh/mq

**Tabella 11: Sintesi costi – ricavi annui per la gestione dei generatori termici a servizio della rete e dei singoli edifici**

spese caldaia edificio 1	59586,34 €
spese caldaia edificio 2	2125,13 €
spese caldaia edificio 3	821,85 €
costo gas generatore centrale rete	0 €
<b>totale spese annue gestione impianti</b>	<b>62533,33 €</b>

ricavi da vendita energia elettrica prodotta dal cogeneratore ceduta in rete bt	0 €
---	-----



**Figura 30: Temperatura media dei tre edifici durante la seconda settimana di gennaio**

La temperatura media di ciascun edificio si mantiene intorno al valore di 20°C durante la settimana graficata. Per l'edificio uffici la temperatura scende durante il fine settimana fino ad un valore di 15°C a causa dello spegnimento dell'impianto termico previsto dallo schedule settimanale di accensione della relativa caldaia.

#### 4.2.2 Scenario uno

Nello scenario uno, gli edifici sono connessi tramite la propria sottostazione d'utenza alla rete termica e le caldaie autonome non sono abilitate all'accensione. Si riportano di seguito i principali indici energetici economici relativi alla simulazione dello scenario uno.

**Tabella 12: Energia primaria consumata dai generatori termici**

Energia primaria Totale Gen. edificio 1	0 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 2	0 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 3	0 kWh
Energia primaria Generatore rete	1074689 kWh
Energia primaria totale	1074689 kWh

**Tabella 13: Flussi energetici in ingresso e uscita dalla rete termica**

Energia utile da rete Edificio 1	590892.58 kWh
Energia utile da rete Edificio 2	19564.31 kWh
Energia utile da rete Edificio 3	8275.05 kWh
Energia ceduta alla rete dal generatore e caldaia aux.	640140.49 kWh
Perdite rete termica	20552.43 kWh
Rendimento termico rete	0.97

Nella tabella seguente si riportano i consumi di energia primaria specifici per superficie riscaldata di ciascun edificio. I maggiori consumi dell'edificio 1 sono causati dal suo profilo di utilizzo che prevede un maggiore numero di ore di accensione degli impianti termici e di connessione alla rete rispetto agli altri due edifici

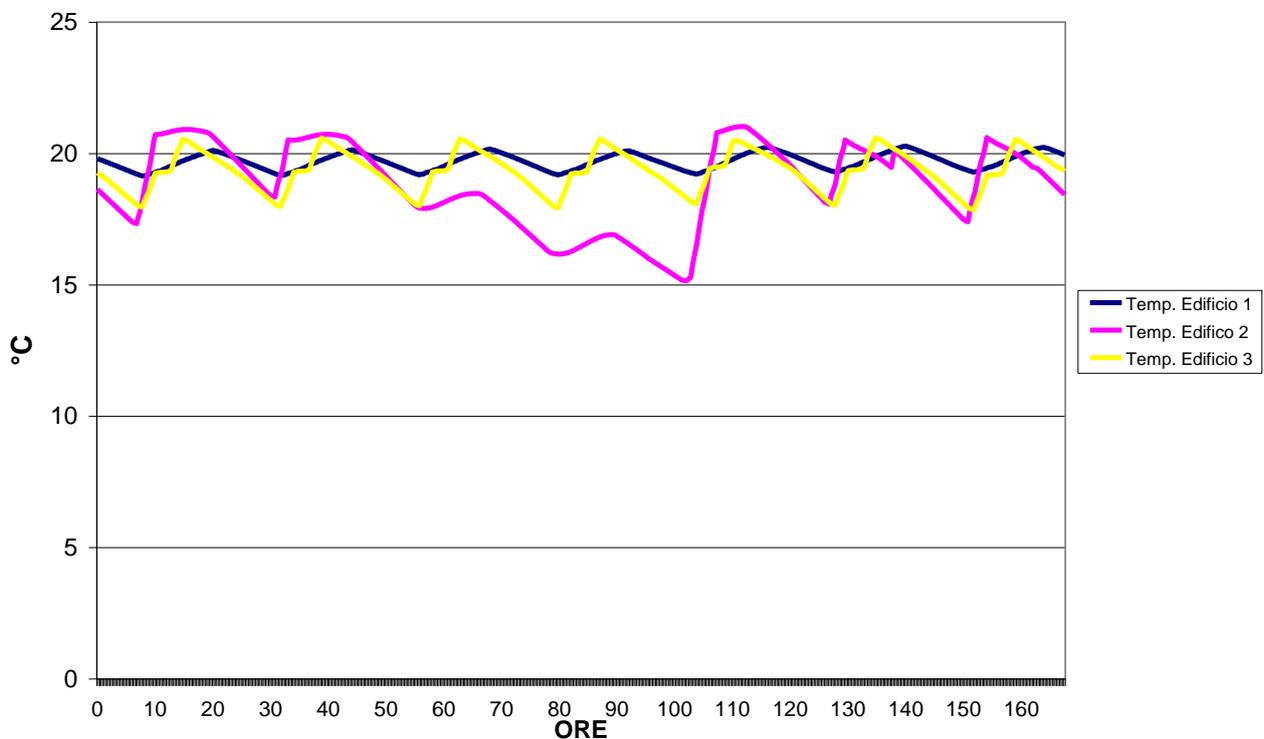
**Tabella 14: Energia primaria specifica consumata da ciascuno dei tre edifici simulati**

Energia primaria totale Edificio 1	64.08761 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 2	14.85587 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 3	17.65674 kWh/mq

**Tabella 15: Sintesi costi – ricavi annui per la gestione dei generatori termici a servizio della rete e dei singoli edifici**

spese caldaia edificio 1	0 €
spese caldaia edificio 2	0 €
spese caldaia edificio 3	0 €
costo gas generatore centrale rete	68188.04 €
<b>totale spese annue gestione impianti</b>	<b>68188.04 €</b>

ricavi da cessione energia elettrica in rete e vendita energia termica alle tre utenze ( da cogeneratore e caldaia aux	86967.88 €
--	------------



**Figura 31: Temperatura media dei tre edifici durante la seconda settimana di gennaio**

La temperatura media di ciascun edificio si mantiene intorno al valore di set point pari a 20°C. Per l'edificio uffici la temperatura scende durante il fine settimana fino ad un valore di 15°C a causa dello spegnimento della sottostazione di scambio con la rete termica previsto dallo schedule settimanale di accensione degli impianti.

Il sistema di controllo riesce a gestire l'accensione del cogeneratore e della caldaia ausiliaria per mantenere la temperatura della rete tra i 90 °C (assenza di carico) e i 65 °C (presenza di carico)

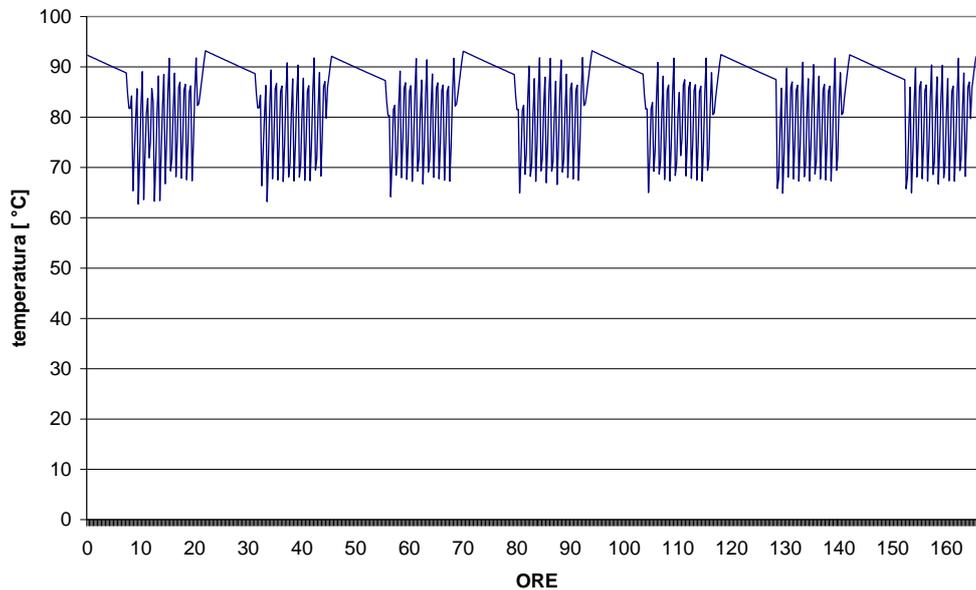


Figura 32: Temperatura media della rete durante la seconda settimana di gennaio

#### 4.2.3 Scenario due

Nello scenario due, la configurazione e del tipo grid connected, tutte le utenze sono connesse alla rete termica locale; solo per gli edifici 2 e 3 è consentita anche l'accensione delle caldaie autonome con schedule orario riportato nel paragrafo precedente. Si riportano di seguito i principali indici energetici economici relativi alla simulazione dello scenario uno.

**Tabella 16: Energia primaria consumata dai generatori termici**

Energia primaria Totale Gen. edificio 1	0 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 2	6876 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 3	2059 kWh
Energia primaria Generatore rete	1063277 kWh
<b>Energia primaria totale</b>	<b>1072212 kWh</b>

**Tabella 17: Flussi energetici in ingresso e uscita dalla rete termica**

Energia utile da rete Edificio 1	590745 kWh
Energia utile da rete Edificio 2	13380 kWh
Energia utile da rete Edificio 3	6446 kWh
Energia ceduta alla rete dal generatore	632002 kWh
<b>Energia perdite rete termica</b>	<b>20570 kWh</b>
<b>Rendimento termico rete</b>	<b>0.97</b>

Nella tabella seguente si riportano i consumi di energia primaria specifici per superficie riscaldata di ciascun edificio. I maggiori consumi dell'edificio 1 sono dovuti anche al profilo di utilizzo dello stesso che prevede un maggiore numero di ore di accensione degli impianti termici rispetto agli altri due edifici

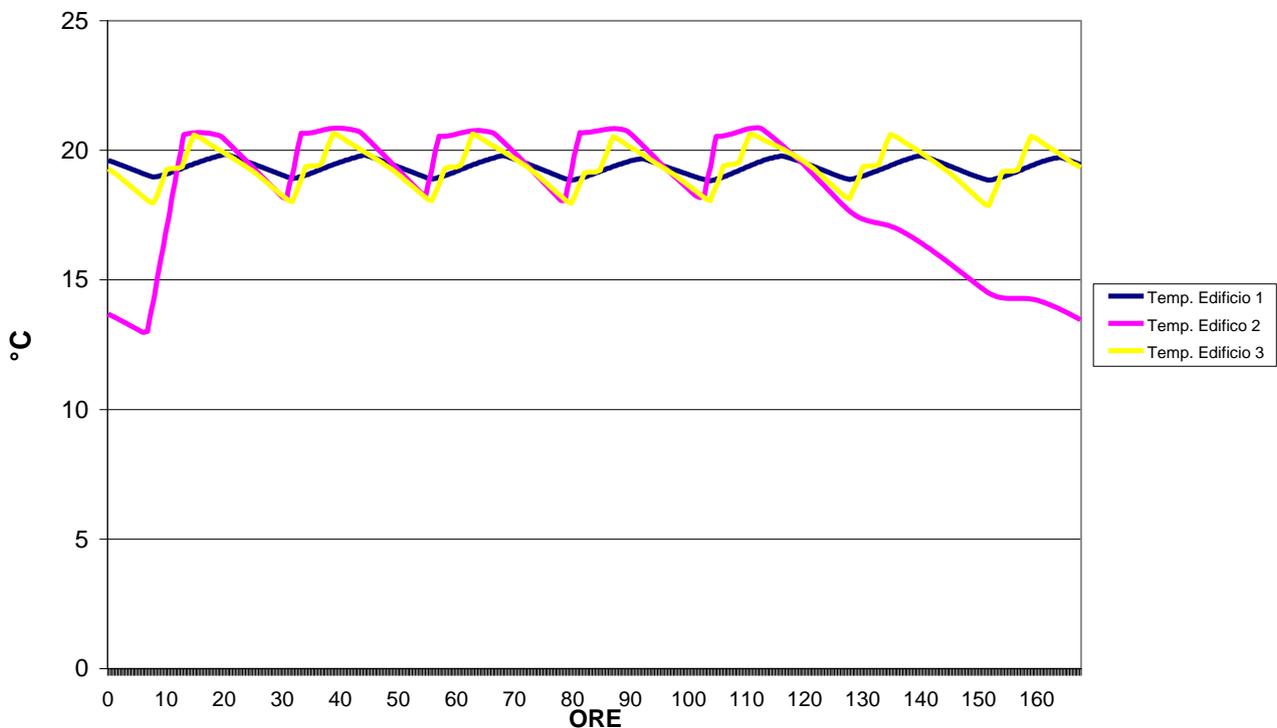
**Tabella 18: Energia primaria specifica consumata da ciascuno dei tre edifici simulati**

Energia primaria totale Edificio 1	64 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 2	18 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 3	16 kWh/mq

**Tabella 19: Sintesi costi – ricavi annui per la gestione dei generatori termici a servizio della rete e dei singoli edifici**

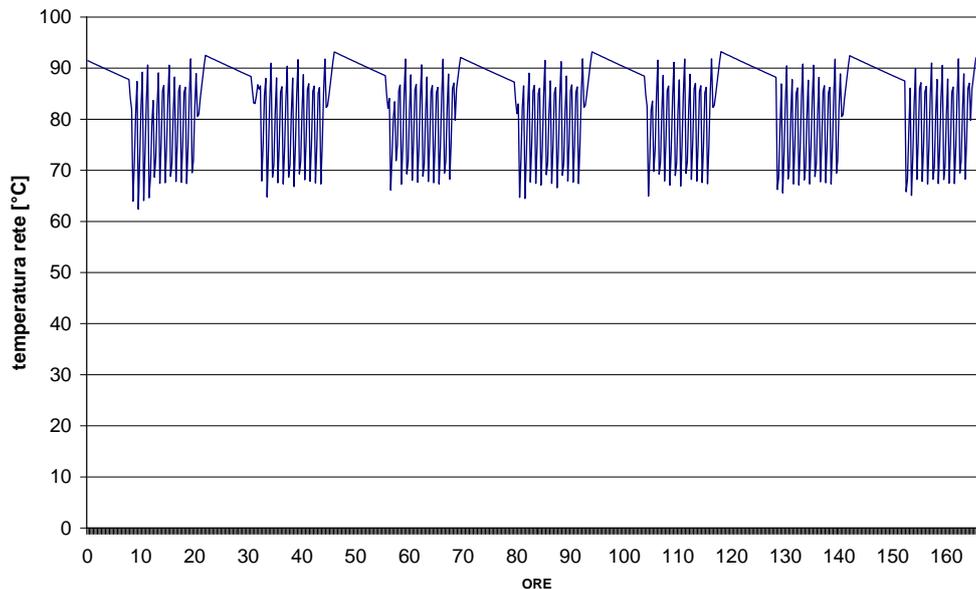
spese caldaia edificio 1	0 €
spese caldaia edificio 2	619 €
spese caldaia edificio 3	185 €
costo gas generatore centrale rete	67450 €
<b>totale spese annue gestione impianti</b>	<b>68254 €</b>

ricavi da cessione energia elettrica in rete e vendita energia termica alle tre utenze ( da cogeneratore e caldaia aux)	85930 €
---	---------



**Figura 33: Temperatura media dei tre edifici durante la seconda settimana di gennaio**

La temperatura media di ciascun edificio si mantiene intorno al valore di set point pari a 20°C. Per l'edificio uffici la temperatura scende durante il fine settimana fino ad un valore di 15°C a causa dello spegnimento della sottostazione di scambio con la rete termica e della caldaia ausiliaria come previsto dallo schedule settimanale di accensione degli impianti.



**Figura 34: Temperatura media della rete (scenario 2) durante la seconda settimana di gennaio**

Come per lo scenario 1, la temperatura della rete tende a mantenersi nei limiti di funzionamento previsti dal sistema di controllo.

#### 4.2.4 Scenario tre

Nello scenario tre viene analizzata la capacità che ha la rete a mantenersi in temperatura durante lo spegnimento dell'impianto termico centralizzato. Lo scenario prevede l'abilitazione all'accensione del cogeneratore e della caldaia ausiliaria solo dalle ore 8 alle ore 20. Le caldaie ausiliare di tutti gli edifici non sono abilitate al funzionamento. Si riportano di seguito i principali indici energetici economici relativi alla simulazione dello scenario tre.

**Tabella 20: Energia primaria consumata dai generatori termici**

Energia primaria Totale Gen. edificio 1	0 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 2	0 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 3	0 kWh
Energia primaria Generatore rete	930730.6 kWh
<b>Energia primaria totale</b>	<b>930730.6 kWh</b>

**Tabella 21: Flussi energetici in ingresso e uscita dalla rete termica**

Energia utile da rete Edificio 1	516292.1 kWh
Energia utile da rete Edificio 2	19298.19 kWh
Energia utile da rete Edificio 3	8276.204 kWh
Energia ceduta alla rete dal generatore	561431.3 kWh
Perdite rete termica	17304.35 kWh
<b>Rendimento termico rete</b>	<b>0.968714</b>

Nella tabella seguente si riportano i consumi di energia primaria specifici per superficie riscaldata di ciascun edificio.

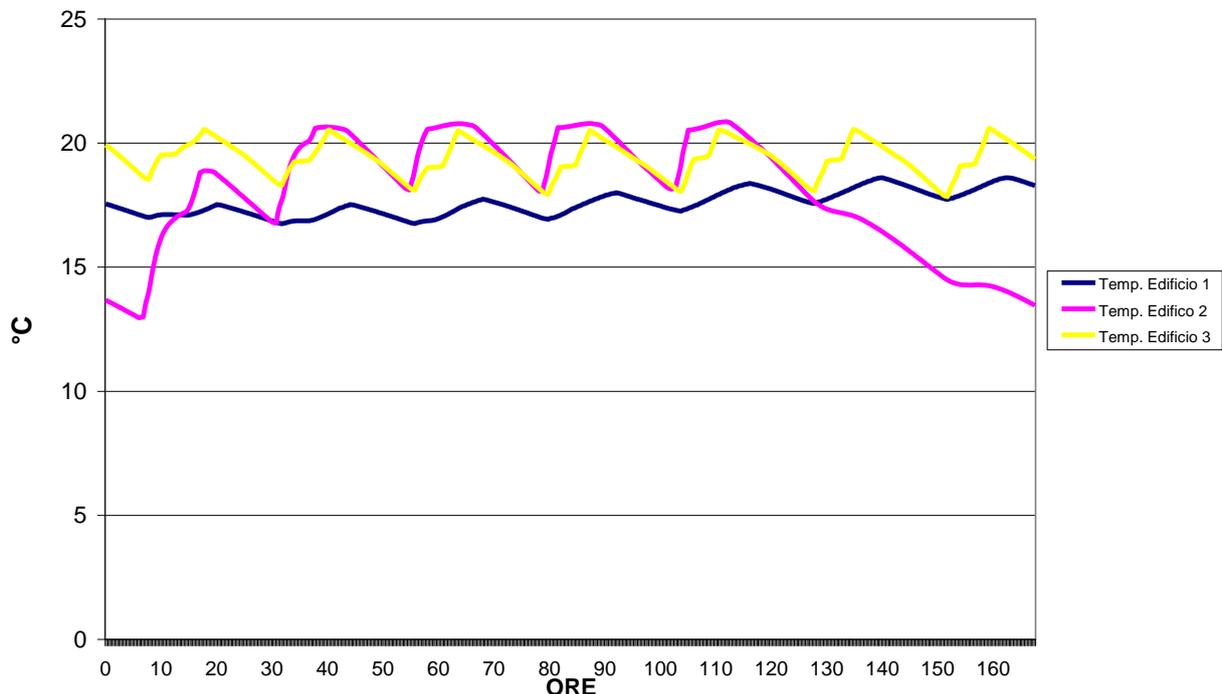
**Tabella 22: Energia primaria specifica consumata da ciascuno dei tre edifici simulati**

Energia primaria totale Edificio 1	55.65 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 2	14.56 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 3	17.55 kWh/mq

**Tabella 23: Sintesi costi – ricavi annui per la gestione dei generatori termici a servizio della rete e dei singoli edifici**

spese caldaia edificio 1	0 €
spese caldaia edificio 2	0 €
spese caldaia edificio 3	0 €
costo gas generatore centrale rete	60048 €
<b>totale spese annue gestione impianti</b>	<b>60048 €</b>

ricavi da cessione energia elettrica in rete e vendita energia termica alle tre utenze ( da cogeneratore e caldaia aux)	74235 €
---	---------



**Figura 35: Temperatura media dei tre edifici durante la seconda settimana di gennaio**

Dall’andamento delle temperature per ciascuno dei tre edifici si evince come lo scenario ipotizzato per la gestione della rete termica non sia idoneo a mantenere in comfort termico l’edificio 1 (avente il maggiore carico termico dei tre) e l’edificio 2 a inizio settimana.

Lo spegnimento del cogeneratore e della caldaia dalle 8:00 alle 20:00 determina un brusco calo della temperatura della rete durante le ore serali (fino a 35°C) con la conseguente difficoltà di fornire la necessaria potenza termica alle utenze (in particolare all’edificio 3) durante la giornata seguente.

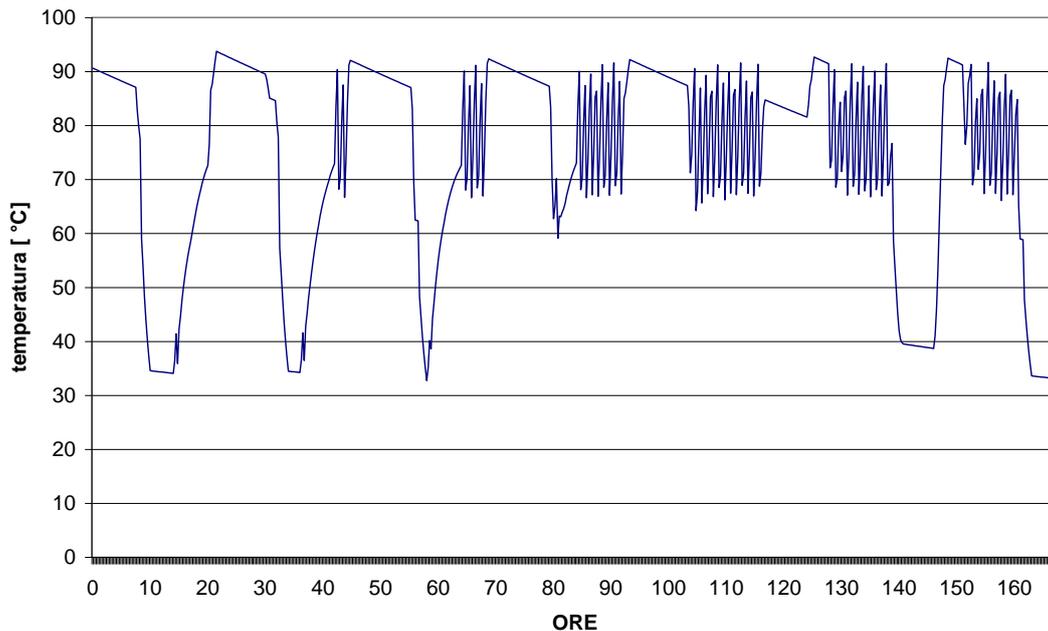


Figura 36: Temperatura media della rete (scenario 3) durante la seconda settimana di gennaio

#### 4.2.5 Scenario quattro

Come per lo scenario precedente, lo scenario quattro prevede un funzionamento discontinuo della stazione centrale accendendo il cogeneratore solo dalle 8 alle 20. Diversamente dallo scenario tre agli edifici 2 e 3 è consentita anche l'accensione delle caldaie autonome con schedule orario riportato nel paragrafo precedente. Si riportano di seguito i principali indici energetici economici relativi alla simulazione dello scenario quattro.

**Tabella 24: Energia primaria consumata dai generatori termici**

Energia primaria Totale Gen. edificio 1	0.00 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 2	9478.47 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 3	3706.71 kWh
Energia primaria Gen Principale	917002.15 kWh
<b>Energia primaria totale</b>	<b>930187.33 kWh</b>

**Tabella 25: Flussi energetici in ingresso e uscita dalla rete termica**

Energia utile da rete Edificio 1	516933.24 kWh
Energia utile da rete Edificio 2	11033.73 kWh
Energia utile da rete Edificio 3	4935.51 kWh
Energia ceduta alla rete dal generatore	550442.84 kWh
<b>Energia perdite rete termica</b>	<b>17276.86 kWh</b>
<b>Rendimento termico rete</b>	<b>0.97</b>

Nella tabella seguente si riportano i consumi di energia primaria specifici per superficie riscaldata di ciascun edificio.

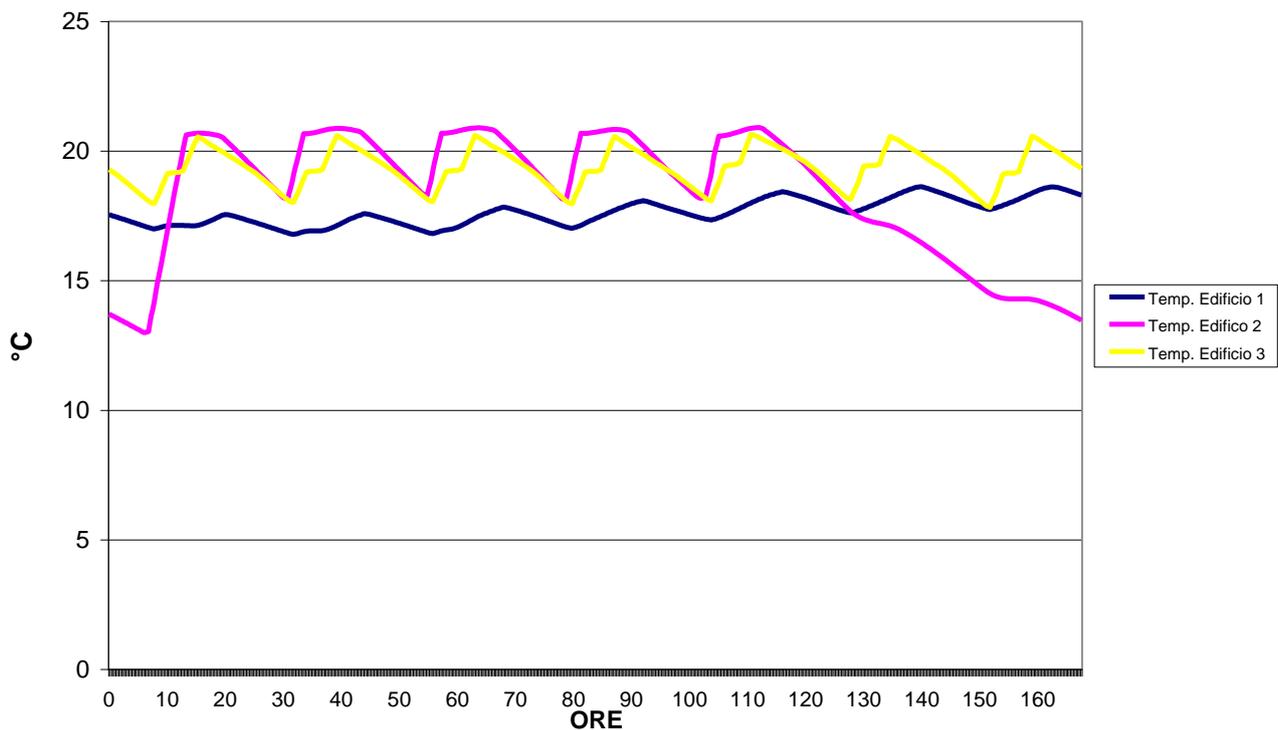
**Tabella 26: Energia primaria specifica consumata da ciascuno dei tre edifici simulati**

Energia primaria totale Edificio 1	55.84 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 2	19.59 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 3	14.89 kWh/mq

**Tabella 27: Sintesi costi – ricavi annui per la gestione dei generatori termici a servizio della rete e dei singoli edifici**

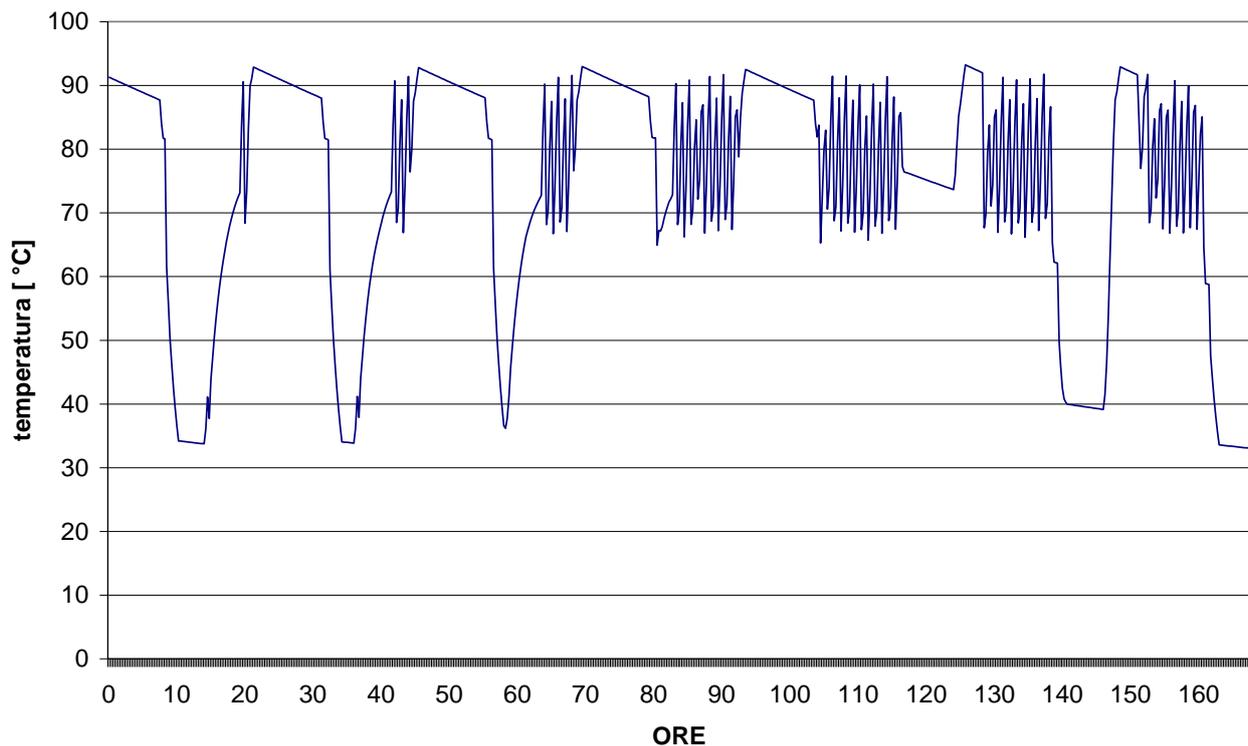
spese caldaia edificio 1	0 €
spese caldaia edificio 2	852.87 €
spese caldaia edificio 3	333.53 €
costo gas generatore centrale rete	59139 €
totale spese annue gestione impianti	60325 €

ricavi da cessione energia elettrica in rete e vendita energia termica alle tre utenze ( da cogeneratore e caldaia aux)	72902 €
---	---------



**Figura 37: Temperatura media dei tre edifici durante la seconda settimana di gennaio**

Rispetto allo scenario precedente, la presenza delle due caldaie singole riesce a portare in temperatura l'edificio 3 fin dall'inizio della settimana anche se rimane ancora in deficit termico l'edificio uffici.



**Figura 38: Temperatura media della rete (scenario 4) durante la seconda settimana di gennaio**

#### 4.2.6 Scenario cinque

Lo scenario 5 prevede la stessa gestione degli impianti dello scenario ma con una temperatura di set point della rete inferiore di 15°C. La simulazione consente di valutare sia il risparmio economico ed energetico generato dalla gestione della rete a temperatura più bassa sia se la stessa rete riesce comunque a fornire la potenza termica necessaria ai tre edifici per mantenerli alla temperatura di comfort.

**Tabella 28: Energia primaria consumata dai generatori termici**

Energia primaria Totale Gen. edificio 1	0.00 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 2	0.00 kWh
Energia primaria Totale Gen. edificio 3	0.00 kWh
Energia primaria Gen Principale	1014323.04 kWh
<b>Energia primaria totale</b>	<b>1014323.04 kWh</b>

**Tabella 29: Flussi energetici in ingresso e uscita dalla rete termica**

Energia utile da rete Edificio 1	606372.95 kWh
Energia utile da rete Edificio 2	19485.52 kWh
Energia utile da rete Edificio 3	8232.98 kWh
Energia ceduta alla rete dal generatore	651389.06 kWh
<b>Perdite rete termica</b>	<b>16621.33 kWh</b>
<b>Rendimento termico rete</b>	<b>0.97</b>

Nella tabella seguente si riportano i consumi di energia primaria specifici per superficie riscaldata di ciascun edificio.

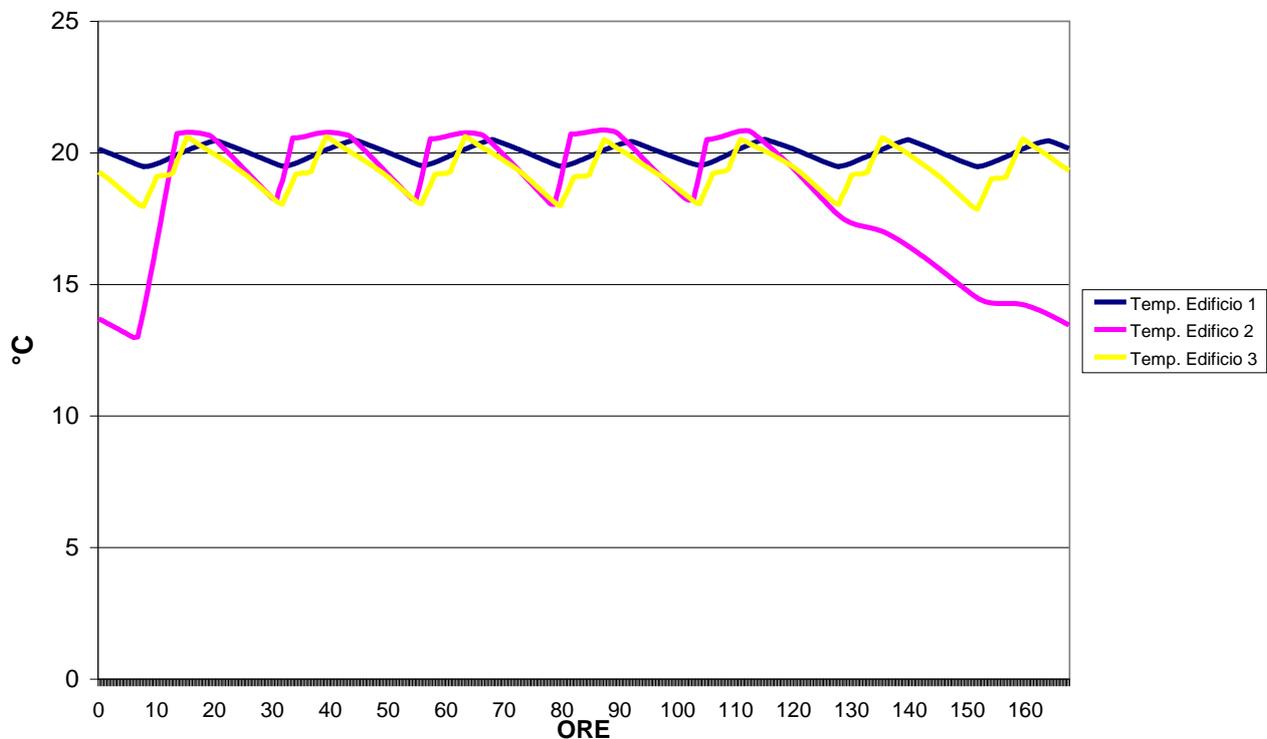
**Tabella 30: Energia primaria specifica consumata da ciascuno dei tre edifici simulati**

Energia primaria totale Edificio 1	63.59 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 2	14.31 kWh/mq
Energia primaria totale Edificio 3	16.99 kWh/mq

**Tabella 31: Sintesi costi – ricavi annui per la gestione dei generatori termici a servizio della rete e dei singoli edifici**

spese caldaia edificio 1	0.00 €
spese caldaia edificio 2	0.00 €
spese caldaia edificio 3	0.00 €
costo gas generatore centrale rete	64403.71 €
<b>totale spese annue gestione impianti</b>	<b>64403.71 €</b>

ricavi da cessione energia elettrica in rete e vendita energia termica alle tre utenze (da cogeneratore e caldaia aux)	86983.54 €
--	------------



**Figura 39: Temperatura media dei tre edifici durante la seconda settimana di gennaio**

Come si evince dalla figura precedente, le temperature dei tre edifici si mantengono intorno al valore di set point pari a 20°C. Per cui la gestione a bassa temperatura della rete non pregiudica il comfort termico, pur mantenendo spente le caldaie ausiliarie di ciascun edificio .

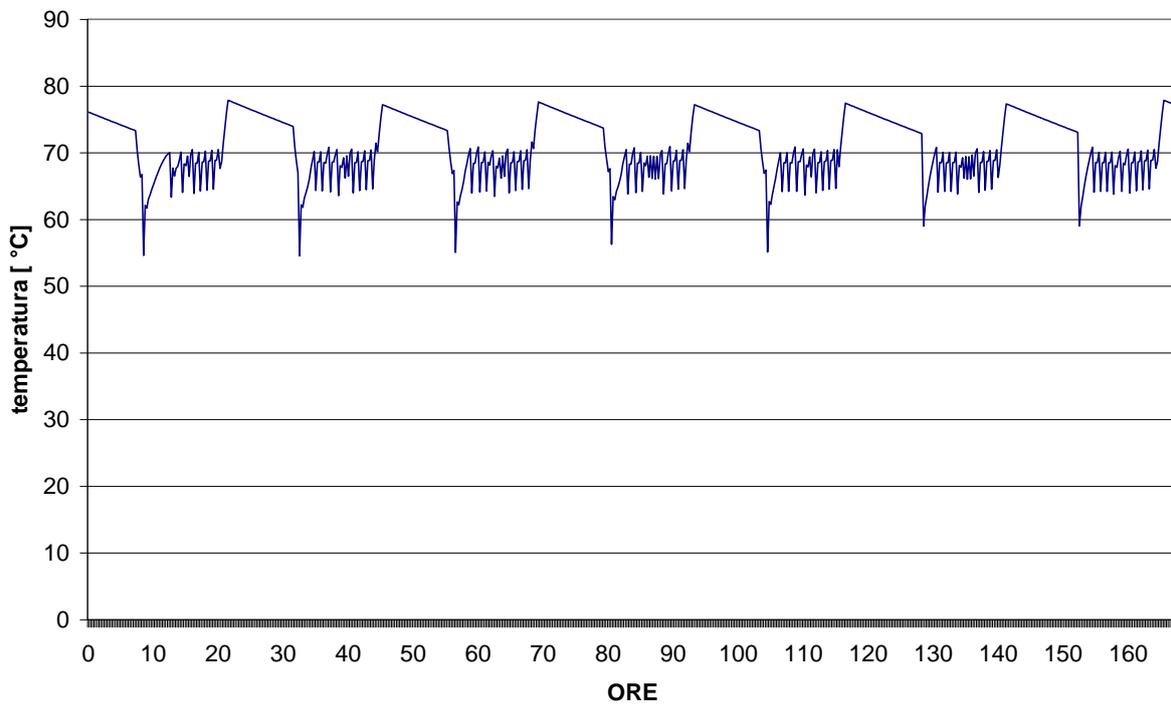


Figura 40: Temperatura media della rete (scenario 5) durante la seconda settimana di gennaio

#### 4.2.7 Sintesi degli scenari applicativi

Le simulazioni dei diversi scenari relativi alla gestione della rete termica ed elettrica locale descritta nel paragrafo precedente, fanno comprendere le potenzialità della nuova piattaforma software integrata in termini di pianificazione di sistemi energetici complessi.

Dal confronto dei singoli scenari.

Nella tabella seguente si riporta la sintesi dei risultati ottenuti dalla simulazione di ciascuno dei precedenti scenari:

	Energia primaria totale [kWh]	consumo gas totale [mc]	costo annuo energia [€]	ricavi da vendita energia elettrica [€]	Differenza costi annui rispetto scenario zero [€]	Riapsrmio economico effettivo annuo [€]
scenario 0	694975,62	72393,29	62533,33	0,00		
scenario 1	1583566,35	164954,83	89092,60	67420,98	26559,27	40861,70
scenario 2	1579604,57	164542,14	108345,55	67201,27	45812,22	21389,05
scenario 3	1363204,86	142000,51	101934,01	40488,07	39400,69	1087,38
scenario 4	1364846,82	142171,54	102081,76	40483,84	39548,43	935,41
scenario 5	1505621,41	156835,56	102789,33	65239,02	40256,00	24983,01

Dall'analisi dei risultati riportati nel grafico e nella tabella precedente, si evince come il passaggio da sistema autonomo (scenario 0 singole caldaie per ciascuna utenza) alla rete termica locale apporta un beneficio in termini ambientali, in quanto sia ha una riduzione dell'energia primaria complessivamente consumata per il fabbisogno elettrico e termico.

L'unico scenario che comporta un incremento dei consumi di energia primaria e lo scenario 3, dovuto ad un utilizzo limitato del cogeneratore (accensione solo dalle 08:00 alle 20:00) e quindi ad una limitata

produzione di energia elettrica per compensare i flussi energetici sulla rete MT generati dai carichi dei singoli edifici.

I benefici economici per il gestore della rete sono dati dalla vendita dell'energia termica prodotta dal cogeneratore e dalla caldaia ausiliaria alle singole utenze (*servizio energia locale*) con le tariffe precedentemente indicate, e dai ricavi della cessione dell'energia elettrica alla rete attraverso il nodo di scambio, rappresentato dal trasformatore MT/bt.

Dall'analisi degli istogrammi si nota come lo scenario che apporta il migliore beneficio ambientale (scenario 4) non coincide con lo scenario che apporta i maggiori ricavi al gestore della rete (scenario 5).

Infatti lo scenario 5, pur essendo per definizione il più "green" in quanto prevede il funzionamento a bassa temperatura della rete, comporta un maggiore consumo di gas rispetto agli scenari 3 e 4 dovuto al funzionamento 24/24 h della centrale termica. Allo stesso tempo il funzionamento a bassa temperatura riduce comunque le ore di funzionamento del cogeneratore rispetto allo scenario 1 e quindi la produzione di energia elettrica necessaria a ridurre i flussi dalla rete MT e quindi dal mix termoelettrico nazionale.

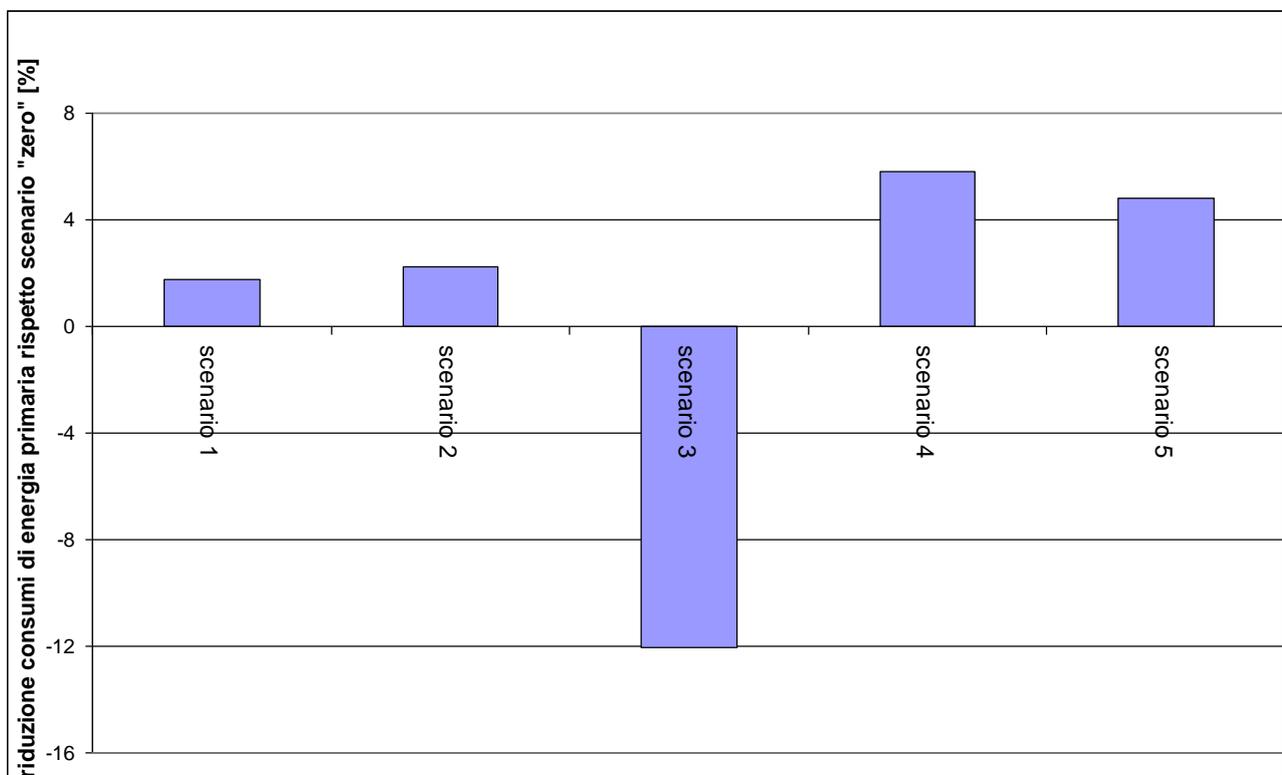


Figura 41: Risparmio annuo energia primaria ottenuto da ciascun scenario di gestione della rete rispetto allo scenario zero (nessuna rete)

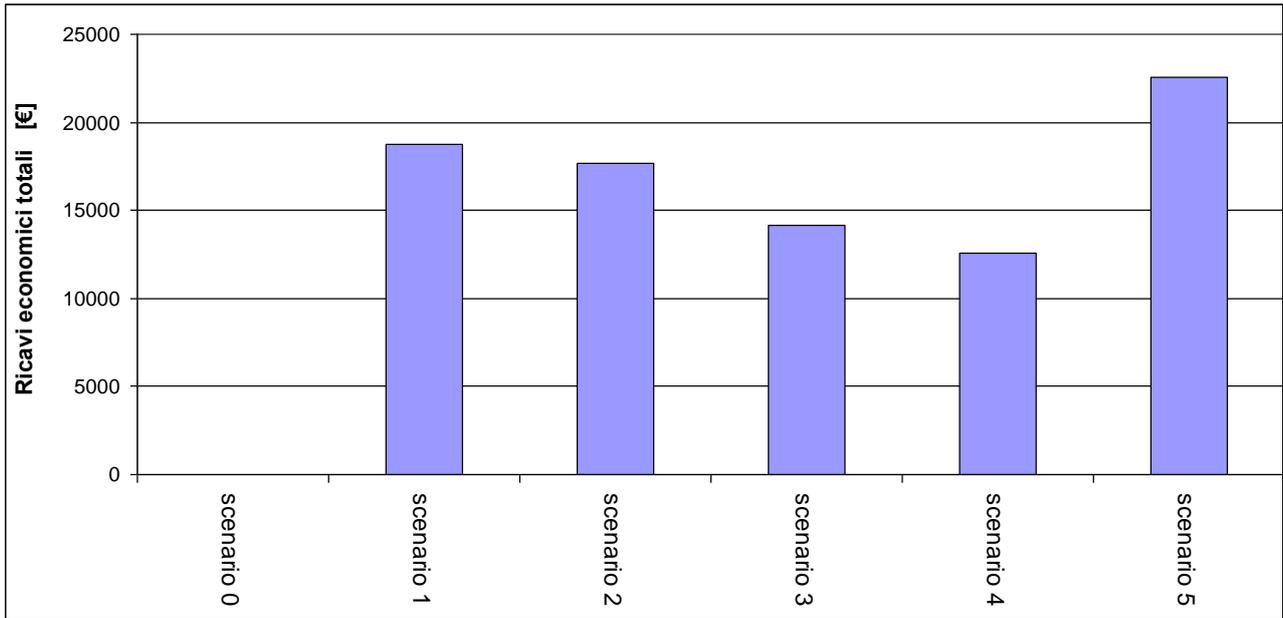


Figura 42: Risparmio economico annuo ottenuto da ciascun scenario di gestione della rete

## 5. Il sistema multizona (introduzione)

---

Lo sviluppo del modello di edificio multizona nasce dalla necessità di valutare i consumi energetici di edifici che presentano delle zone in cui i carichi termici sono notevolmente differenti fra loro; ad esempio si può citare il caso di un edificio in cui alcune zone sono adibite ad uffici e altre a residenza: in questo caso i profili di utilizzo e gli andamenti dei carichi termici di tali zone sono così diversi fra loro che una simulazione dell'intero edificio ipotizzato come monozona non consentirebbe una analisi attendibile del comportamento termico; un altro esempio che chiarisce i limiti della simulazione monozona è quello di un edificio (possibilmente uso uffici) a pianta longitudinale, posizionato nel sud Italia e con orientamento Nord-Sud in cui, specialmente nella stagione invernale, potrebbe essere necessario riscaldare la zona nord e contemporaneamente raffrescare quella sud.

Lo sviluppo del modello multizona è avvenuto sulla base delle caratteristiche della piattaforma ODESSE, ovvero coniugare la facilità di utilizzo con una semplificazione dei modelli matematici, mantenendo una buona approssimazione dei risultati.

Per tali motivi in questa annualità è stato sviluppato il modello multizona del solo edificio senza impianti ed è stata effettuata una serie di valutazioni comparate con uno dei software maggiormente usati in campo di simulazioni dinamiche di edifici: Trnsys.

Come sarà spiegato meglio nei paragrafi seguenti l'ipotesi semplificativa adottata per il modello multizona è quella di dividere l'edificio in un certo numero di zone (impostabili dall'utente) che non interagiscono termicamente fra loro e per le quali è possibile definire i profili di carico (occupanti, luci, apparecchiature elettriche, ventilazione-infiltrazione) e prevede, negli sviluppi futuri, la possibilità di impostare i profili di funzionamento degli impianti.

### 5.1. Implementazione in simulink del nuovo modello di edificio

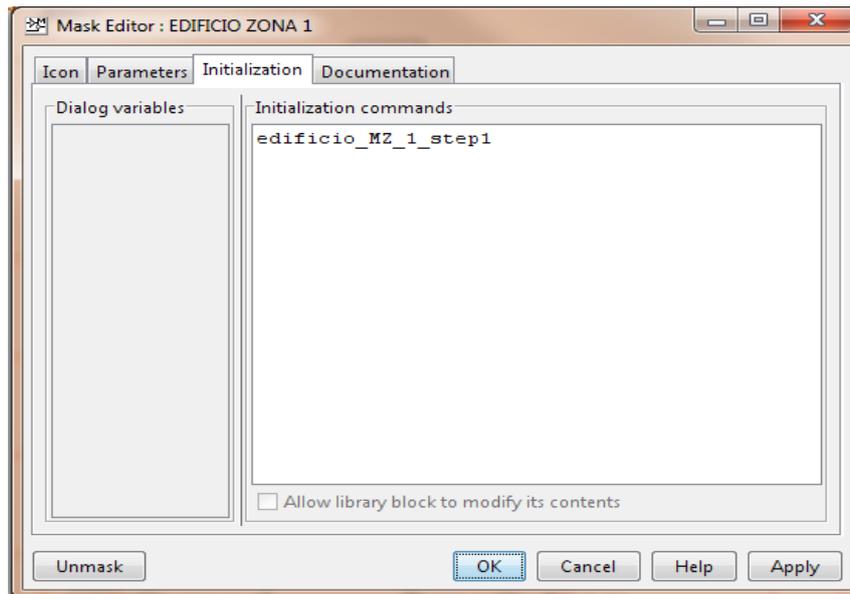
Il modello edificio multizona costituisce uno sviluppo del modello edificio monozona descritto dettagliatamente nel corso dei report delle annualità precedenti.

In questa fase è stato implementato solo il modello dell'edificio senza impianti ma con il modello del sistema di distribuzione per ogni zona, in modo da poter valutare l'errore introdotto dalle ipotesi su cui si basa tale modello.

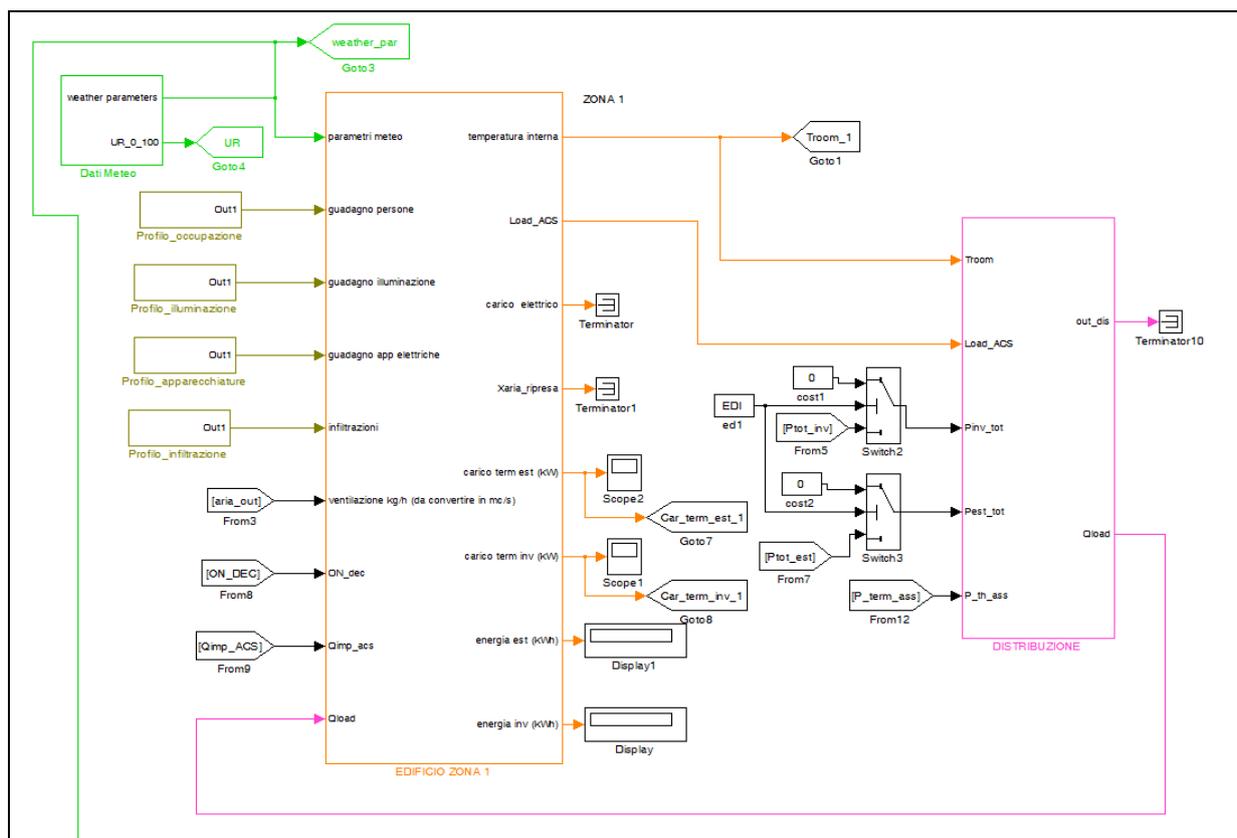
Come anticipato nel paragrafo introduttivo, l'ipotesi fondamentale su cui si basa il modello è che le zone in cui è suddiviso l'edificio non interagiscono fra loro. Certamente tale ipotesi introduce una semplificazione dei fenomeni di scambio termico nell'edificio, ma, nell'ottica di analizzare macroscopicamente il comportamento di un edificio inserito in una rete termica, appare accettabile, come sarà evidenziato nei paragrafi seguenti.

Il modello prevede un massimo di 6 zone ed è costituito da 6 modelli identici, ciascuno inizializzato con un m-file (tipo di file usato in matlab per passare al modello i parametri necessari) attraverso un'apposita funzione di simulink che risolve il problema di avere per ciascun blocco lo stesso nome delle variabili. Questa funzione permette, quindi, di estendere facilmente il numero massimo di zone.

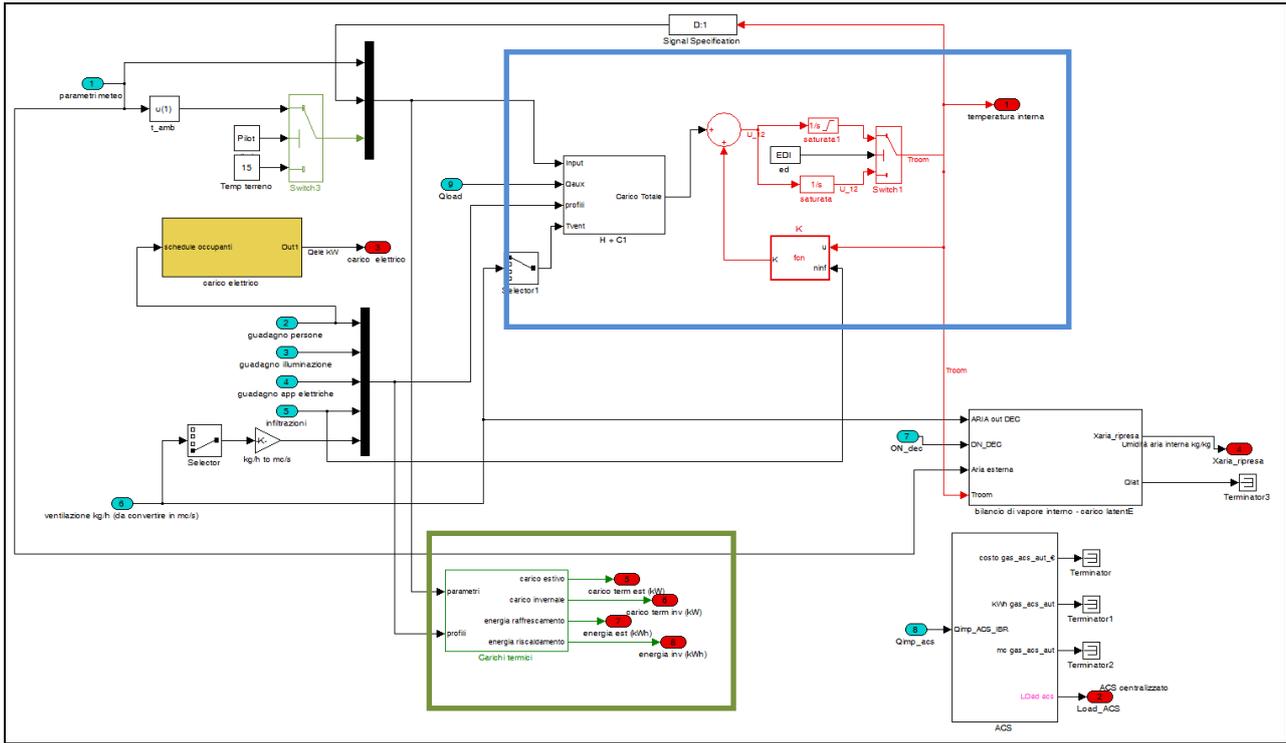
La funzione "inicialization" si trova all'interno del menu rapido "mask editor" come si nota dalla figura di seguito riportata.



L'immagine che segue mostra come il modello di ogni zona è composto da due blocchi fondamentali, il blocco edificio e il blocco distribuzione (in questa fase non viene utilizzato in quanto non sono presenti gli impianti).



Il blocco edificio, come si evince dalla figura seguente è composto a sua volta da due blocchi principali, uno per il calcolo della temperatura interna (---) e uno per il calcolo del fabbisogno termico teorico (---) mediante il metodo RTS dell'Ashrae, descritto dettagliatamente nel Report RdS/2010/251 "ODESSE: simulazione dinamica del sistema edificio-impianti per la climatizzazione estiva".



La temperatura interna è calcolata, come per le altre versioni, con l'equazione differenziale

$$\frac{dT}{dt} = -K T + H$$

T: temperatura interna;

t : tempo;

K : guadagno, funzione delle dispersioni delle pareti opache e trasparenti, della ventilazione-infiltrazione e della capacità termica dell'involucro;

H: termine noto funzione dei guadagni, dell'irraggiamento e della temperatura ambiente.

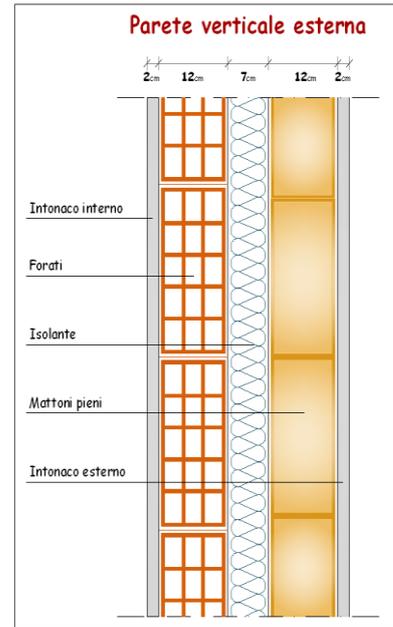
Rispetto alla versione precedente, il parametro K non è più costante in quanto dipende dal numero di ricambi d'aria per infiltrazione e/o ventilazione che hanno un andamento variabile ad ogni passo; il calcolo di K è eseguito quindi, non più dal preprocessore in fase di inserimento dati da interfaccia ma da una *embedded function* implementata nel modello che consente di avere in input il profilo di infiltrazione e/o ventilazione impostato. Di seguito si riporta il codice implementato:

```

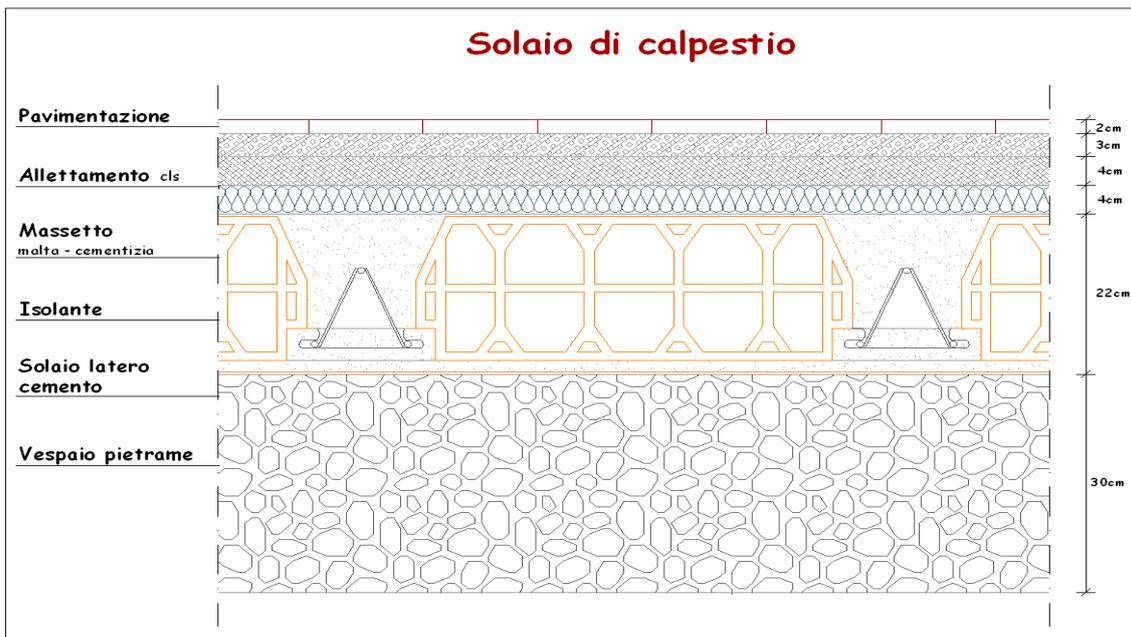
Embedded MATLAB Editor - Block: ODESSE_MZ_v03/EDIFICIO ZONA 1/K
File Edit Text Debug Tools Window Help
1 function K = fcn(u, ninf, dispers_tot, disp_ter, ThermCap_tot)
2 % This block supports the Embedded MATLAB subset.
3 % See the help menu for details.
4
5 - K = -(((ninf*1.2*1)+dispers_tot+disp_ter)/ThermCap_tot)*u;
    
```



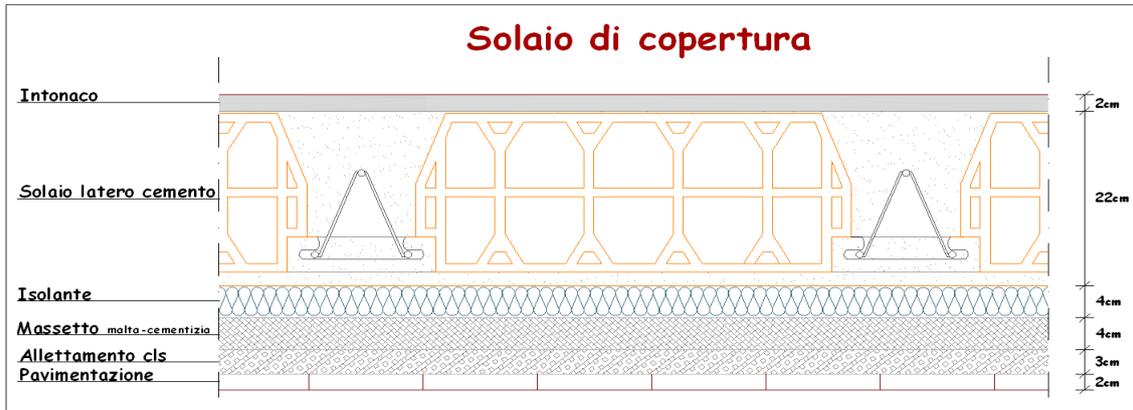
Le superfici esterne verticali ed orizzontali dell'edificio, che definiscono l'involucro, e il solaio intermedio sono costituite da elementi le cui caratteristiche termofisiche sono riportate nelle figure e tabelle che seguono. In particolare il solaio intermedio è computato esclusivamente nel calcolo della capacità termica dell'intero edificio.



Caratteristiche strutturali parete esterna												
strato	Materiale (codice ODESSE)	s (m)	$\lambda$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	cs (KJ/kgK)	resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	hi (W/m <sup>2</sup> K)	he (W/m <sup>2</sup> K)	trasmissione (W/m <sup>2</sup> K)	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m <sup>2</sup> K) - 24h		
										tot	esterna	interna
<b>I</b>							<b>7.70</b>					
1	Intonaco interno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
2	Forato (107)	0.12	0.590	1600	0.84	0.203						
3	Isolante (159)	0.07	0.040	30	1.34	1.750						
4	Mattoni (109)	0.12	0.900	2000	0.84	0.133						
5	Intonaco esterno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
<b>E</b>								<b>25</b>				
<b>Totale</b>		<b>0.35</b>				<b>2.31</b>			<b>0.432</b>	<b>179.83</b>	115.69	64.14

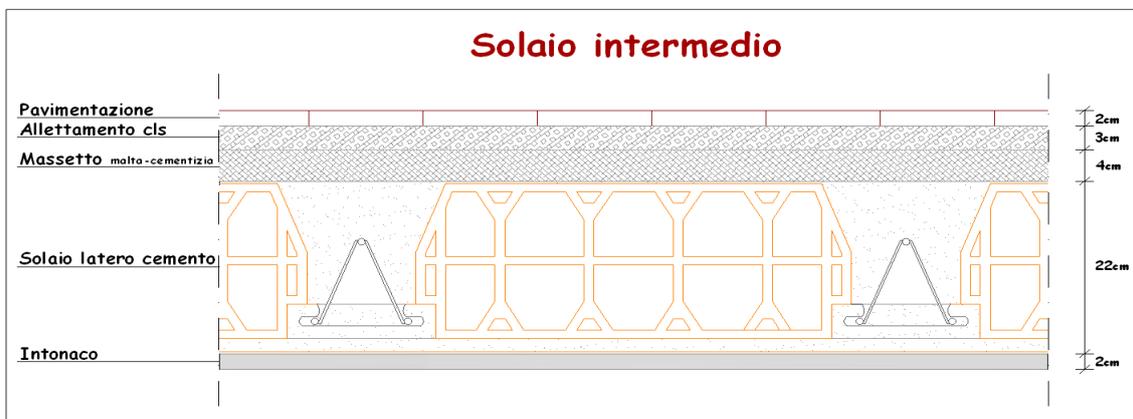


Caratteristiche strutturali solaio calpestio (no pilotis)												
strato	Materiale (codice ODESSE)	s (m)	$\lambda$ (W/mk)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	cs (KJ/kgK)	resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	hi (W/m <sup>2</sup> K)	he (W/m <sup>2</sup> K)	trasmissione (W/m <sup>2</sup> K)	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m <sup>2</sup> K) - 24h		
										tot	esterna	interna
<b>I</b>							<b>5.88</b>					
1	Piastrella porcellana (237)	0.02	1.000	2300	0.80	0.020						
2	Allettamento cls (57)	0.03	0.580	1400	0.88	0.052						
3	Malta di sottofondo (99)	0.04	1.400	2000	0.67	0.029						
4	Isolante (175)	0.04	0.032	50	1.60	1.250						
5	Solaio laterocemento (156)	0.22	0.688	1800	1.00	0.320						
6	Vespaio (147)	0.15	0.700	1400	1.09	0.214						
<b>E</b>								<b>0</b>				
<b>Totale</b>		<b>0.50</b>				<b>2.05</b>			<b>0.487</b>	<b>177.66</b>	120.30	57.36



#### Caratteristiche strutturali solaio copertura

strato	Materiale (codice ODESSE)	s (m)	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cs (KJ/kgK)	resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	hi (W/m <sup>2</sup> K)	he (W/m <sup>2</sup> K)	trasmissione (W/m <sup>2</sup> K)	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m <sup>2</sup> K) - 24h		
										tot	esterna	interna
<b>I</b>							<b>10.00</b>					
1	Intonaco (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
2	Solaio laterocemento (156)	0.22	0.688	1800	1.00	0.320						
3	Isolante (175)	0.04	0.032	50	1.60	1.250						
4	Malta di sottofondo (99)	0.04	1.400	2000	0.67	0.029						
5	Allettamento cls (57)	0.03	0.580	1400	0.88	0.052						
6	Pavimento cls (21)	0.02	1.480	2200	0.88	0.014						
<b>E</b>								<b>25</b>				
	<b>Totale</b>	<b>0.37</b>				<b>1.83</b>			<b>0.546</b>	<b>175.12</b>	103.32	71.80



#### Caratteristiche strutturali solaio intermedio

strato	Materiale (codice ODESSE)	s (m)	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cs (KJ/kgK)	resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	hi (W/m <sup>2</sup> K)	he (W/m <sup>2</sup> K)	trasmissione (W/m <sup>2</sup> K)	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m <sup>2</sup> K) - 24h		
										tot	esterna	interna
<b>I</b>							<b>10.00</b>					
1	Piastrella porcellana (237)	0.02	1.000	2300	0.80	0.020						
2	Allettamento cls (57)	0.02	0.580	1400	0.88	0.034						
3	Malta di sottofondo (99)	0.02	1.400	2000	0.67	0.014						
4	Solaio laterocemento (156)	0.22	0.688	1800	1.00	0.320						
5	Intonaco (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
<b>E</b>								<b>5.88</b>				
	<b>Totale</b>	<b>0.30</b>				<b>0.69</b>			<b>1.455</b>	<b>132.80</b>	74.83	57.97

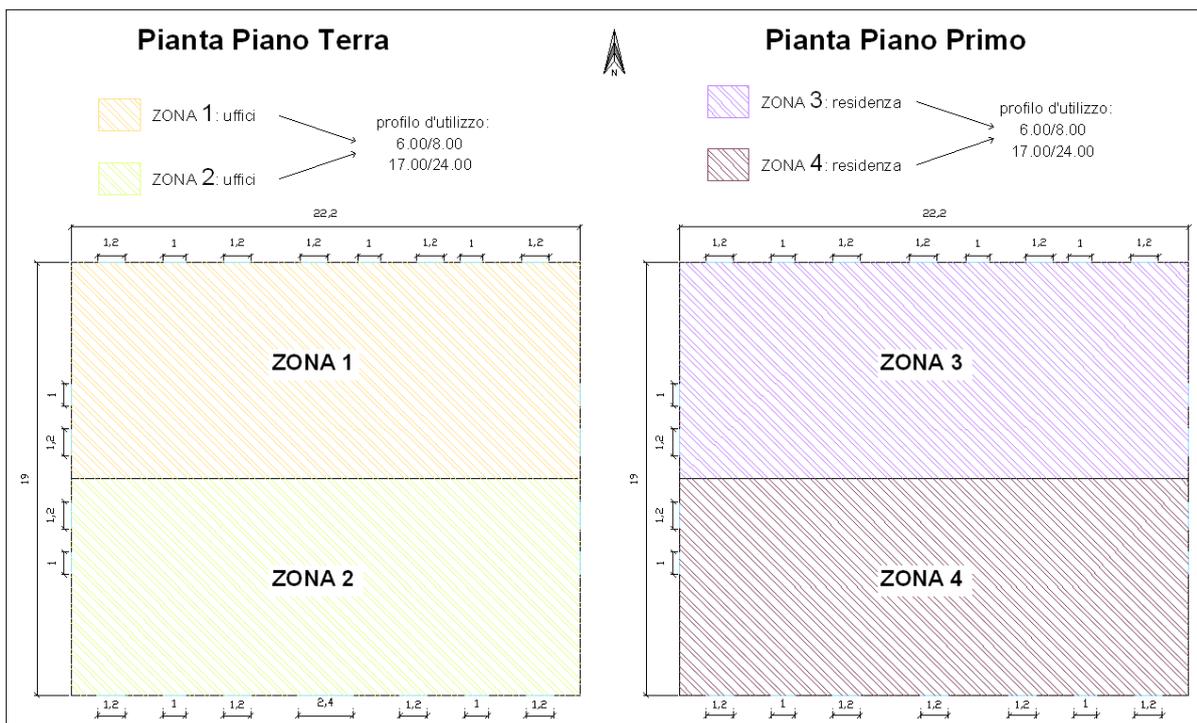
TIPOLOGIE INFISSI (alluminio-doppio vetro)						
	(W/m <sup>2</sup> K)	lunghezza	altezza	superficie	perimetro telaio/vetro	%telaio
<b>INFISSO tipo 1</b>		1,2	1,4	1,68		
<b>Ut<sub>tot</sub></b>	<b>2,54</b>					
<b>VETRO 1</b>		0,5	1,2	1,2		
<b>U<sub>g</sub></b>	<b>2,450</b>					
<b>TELAIO 1</b>				0,48		0,29
<b>U<sub>f</sub></b>	<b>1,9</b>					
<b>l 1</b>		0,5	1,2		6,8	
<b>ψ<sub>l</sub></b>	<b>0,06</b>					
<b>INFISSO tipo 2</b>		1	1,4	1,4		
<b>Ut<sub>tot</sub></b>	<b>2,55</b>					
<b>VETRO 2</b>		0,4	1,2	0,96		
<b>U<sub>g</sub></b>	<b>2,450</b>					
<b>TELAIO 2</b>				0,44		0,31
<b>U<sub>f</sub></b>	<b>1,9</b>					
<b>l 2</b>		0,4	1,2		6,4	
<b>ψ<sub>l</sub></b>	<b>0,06</b>					
<b>INFISSO tipo 3</b>		2,4	2,2	5,28		
<b>Ut<sub>tot</sub></b>	<b>2,49</b>					
<b>VETRO 3</b>		0,65	2	3,9		
<b>U<sub>g</sub></b>	<b>2,450</b>					
<b>TELAIO 3</b>				1,38		0,26
<b>U<sub>f</sub></b>	<b>1,9</b>					
<b>l 3</b>		0,65	2		15,9	
<b>ψ<sub>l</sub></b>	<b>0,06</b>					

Per quanto riguarda le superfici trasparenti sono state considerate tre tipologie di infissi, uguali tra di loro per caratteristiche termo fisiche, i cui valori di trasmittanza termica di vetro (U<sub>g</sub>), di telaio (U<sub>f</sub>), e del coefficiente lineico di accoppiamento tra telaio e vetro (ψ<sub>l</sub>) sono riportati nella Tabella che segue, ma differiscono per dimensioni.

	ZONA Unica			
	Nord	Sud	Est	Ovest
n. tipo 1	10	9	4	4
n. tipo 2	6	4	4	4
n. tipo 3	0	1	0	0
sup_tot	133,2	133,2	114	114
sup_opaca	108	107,2	101,68	101,68
sup_vetro	17,76	18,54	8,64	8,64
sup_telaio	7,44	7,46	3,68	3,68
sup_infisso	25,2	26	12,32	12,32
perimetro telaio/vetro	106,4	102,7	52,8	52,8
<b>TRASMITTANZA U<sub>w</sub></b>	<b>2,541</b>	<b>2,529</b>	<b>2,543</b>	<b>2,543</b>

Inoltre nelle simulazioni sono stati considerati dei profili di utilizzo relativi alla presenza di persone per m<sup>2</sup>, alla potenza di illuminazione installata per m<sup>2</sup> e al valore di infiltrazioni rispetto al volume.

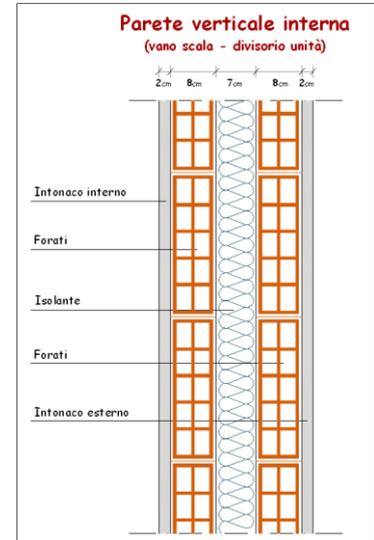
In una seconda fase è stato considerato lo stesso edificio, ma diviso in quattro zone, due per piano, con una linea di sezione est-ovest, in modo da ottenere le zone caratterizzate da un maggiore orientamento sui lati nord e sud. Le zone al piano terra sono denominate ZONA 1 e ZONA 2, quelle al primo piano ZONA 3 e ZONA 4.



Ognuna delle 4 zone è delimitata verticalmente da tre lati esterni ed uno interno. Le caratteristiche termofisiche delle pareti verticali esterne sono le stesse dell'edificio studiato come "monozona"; la partizione interna, quella cioè lungo la linea di sezione est-ovest, è invece definita come riportato di seguito.

Le superfici orizzontali sono considerate con le medesime caratteristiche termofisiche dell'edificio analizzato come "monozona".

Caratteristiche strutturali parete interna (vano scala divisorio tra appartamenti)												
strato	Materiale (codice ODESSE)	s (m)	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cs (KJ/kgK)	resistenza (m <sup>2</sup> K/W)	hi (W/m <sup>2</sup> K)	he (W/m <sup>2</sup> K)	trasmissione (W/m <sup>2</sup> K)	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m <sup>2</sup> K) - 24h		
										tot	esterna	interna
I							7.70					
1	Intonaco interno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
2	Forato (107)	0.08	0.590	1600	0.84	0.136						
3	Isolante (159)	0.07	0.040	30	1.34	1.750						
4	Forato (107)	0.08	0.590	1600	0.84	0.136						
5	Intonaco esterno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
E								7.70				
<b>Totale</b>		<b>0.27</b>				<b>2.34</b>		<b>0.428</b>	<b>132.26</b>	66.13	66.13	



La differenza risiede nell'attribuzione del tipo di solaio al ruolo che svolge: il solaio di calpestio del monozona diventa solaio di calpestio delle sole zone 1 e 2; il solaio intermedio invece sarà solaio di copertura delle zone 1 e 2, mentre verrà considerato come solaio di calpestio delle zone 3 e 4; il solaio di copertura verrà considerato come tale nelle sole zone 3 e 4.

Coerentemente con quanto detto, anche le superfici trasparenti verranno considerate secondo la distinzione per zone precedentemente descritta.

Nella tabella seguente sono riportati i dati riguardanti le tipologie, le superfici e i valori di trasmissione termica che caratterizzano i differenti orientamenti di ognuna delle 4 zone.

	ZONA 1				ZONA 2				ZONA 3				ZONA 4			
	Nord	Sud	Est	Ovest	Nord	Sud	Est	Ovest	Nord	Sud	Est	Ovest	Nord	Sud	Est	Ovest
n. tipo 1	5	0	1	1	0	4	1	1	5	0	1	1	0	5	1	1
n. tipo 2	3	0	1	1	0	2	1	1	3	0	1	1	0	2	1	1
n. tipo 3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sup_tot	66.6	0	28.5	28.5	0	66.6	28.5	28.5	66.6	0	28.5	28.5	0	66.6	28.5	28.5
sup_opaca	54	0	25.42	25.42	0	51.8	25.42	25.42	54	0	25.42	25.42	0	55.4	25.42	25.42
sup_vetro	8.88	0	2.16	2.16	0	10.62	2.16	2.16	8.88	0	2.16	2.16	0	7.92	2.16	2.16
sup_telaio	3.72	0	0.92	0.92	0	4.18	0.92	0.92	3.72	0	0.92	0.92	0	3.28	0.92	0.92
sup_infisso	12.6	0	3.08	3.08	0	14.8	3.08	3.08	12.6	0	3.08	3.08	0	11.2	3.08	3.08
<b>TRASMITTANZA Uw</b>	<b>2,541</b>		<b>2,543</b>	<b>2,543</b>		<b>2,521</b>	<b>2,543</b>	<b>2,543</b>	<b>2,541</b>		<b>2,543</b>	<b>2,543</b>		<b>2,540</b>	<b>2,543</b>	<b>2,543</b>

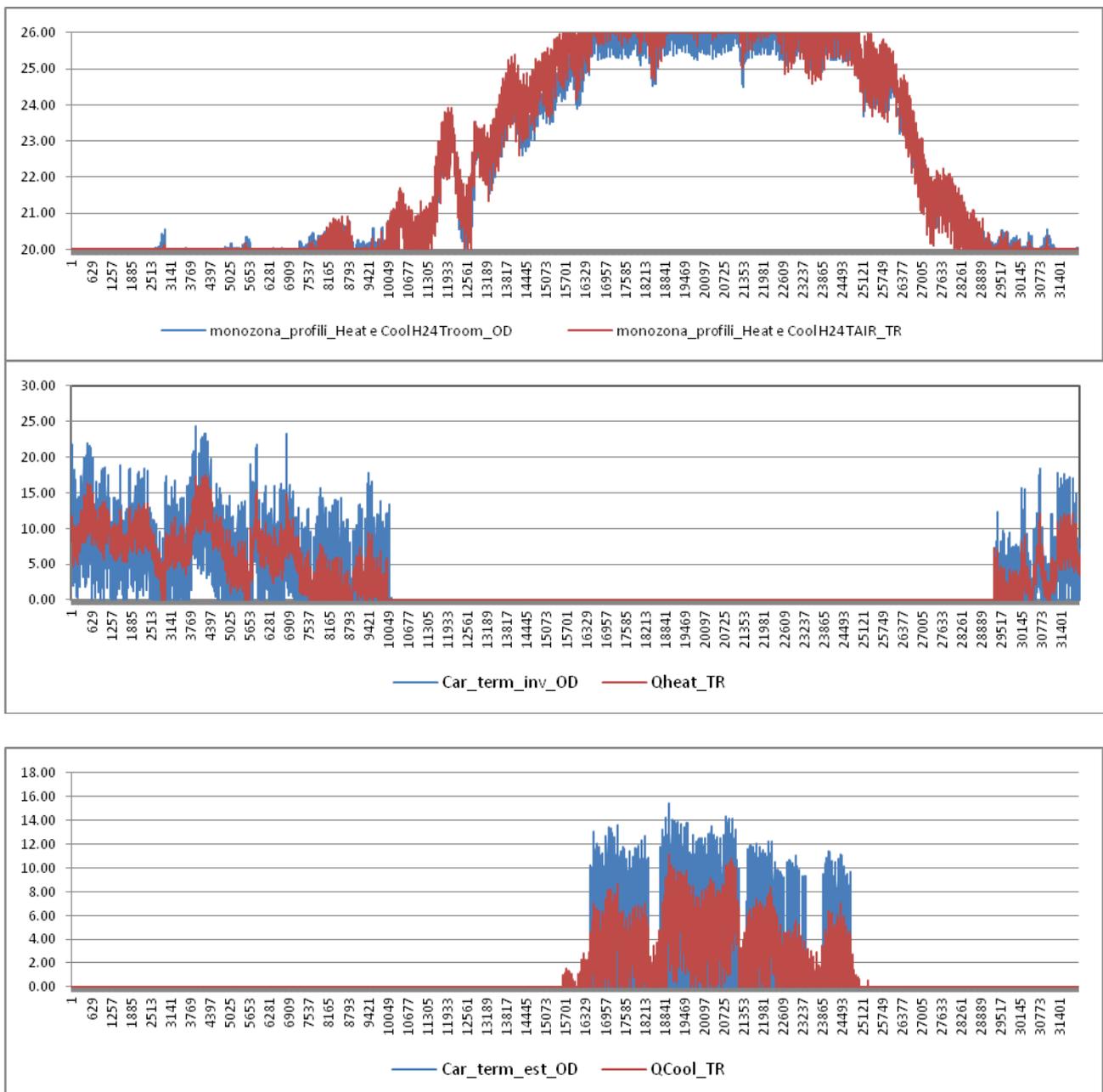
### 5.3. Confronto edificio monozona – multizona

Di seguito si riportano i risultati del confronto fra il modello monozona simulato con ODESSE e con TRNSYS.

La tabella seguente riporta i fabbisogni energetici invernale ed estivo (in kWh) nelle ipotesi previste dalle norme UNI TS 11300, ovvero considerando una richiesta termica giornaliera continua per temperature di riferimento pari a 20°C in inverno e 26°C in estate.

	Fabbisogno termico invernale	Fabbisogno termico estivo
<b>ODESSE</b>	22990	7879
<b>TRNSYS</b>	24520	7392
<b>ERRORE</b>	6,7%	6,2%

L'errore del 6% circa sia in fase di riscaldamento sia raffreddamento evidenzia una ottima concordanza fra i due software, rivelata anche dai confronti degli andamenti di temperatura e dei fabbisogni.



Per poter valutare l'approssimazione introdotta dall'ipotesi di assenza di interazione fra le varie zone, l'edificio multizona descritto nel paragrafo precedente è stato simulato anche con il software Trnsys che consente, invece, di modellare un edificio multizona con le zone termicamente interagenti fra loro. In particolare per valutare più in dettaglio i risultati ottenuti con Odesse Multizona il confronto è stato eseguito con l'edificio di Trnsys simulato sia con interazione fra le zone sia senza e con lo stesso file meteo *Roma-Ciampino.epw*.

La tabella seguente mostra i fabbisogni energetici annuali (in kWh) di ciascuna zona, invernali ed estivi, e l'errore relativo:

	Fab_inv_Z1	Fab_inv_Z2	Fab_inv_Z3	Fab_inv_Z4	Fab inv_tot
<b>ODESSE</b>	6466	6580	7750	7237	28033
<b>TRNSYS</b>	5277	4710	8304	7161	25452
<b>TRNSYS_NI (NO INTERAZIONE)</b>	5780	4986	7717	6711	25194
<b>errore OD -TR</b>	18,4%	28,4%	7,1%	1,1%	9,2%
<b>errore OD -TR_NI</b>	10,6%	24,2%	0,4%	7,3%	10,1%

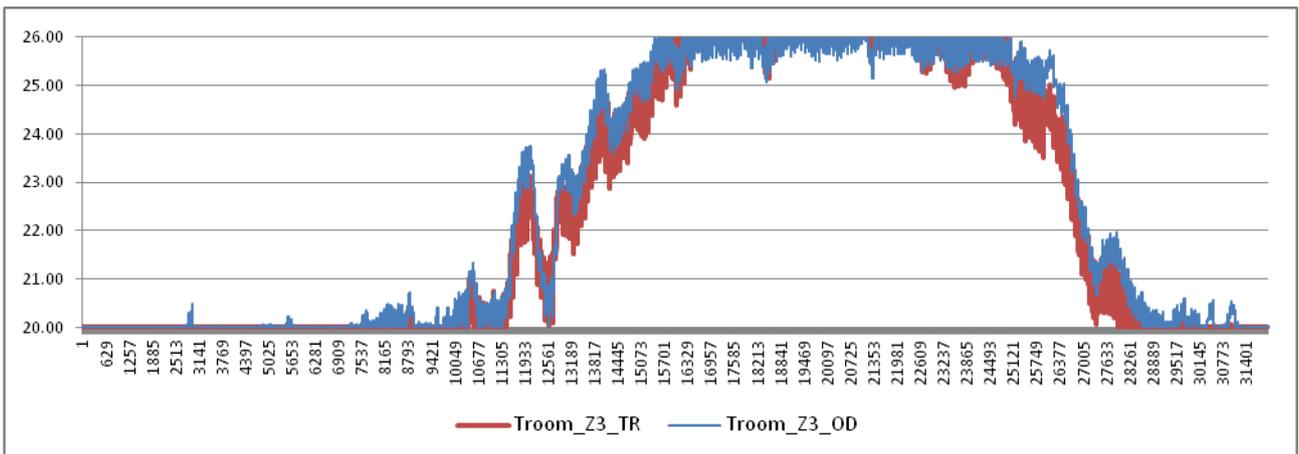
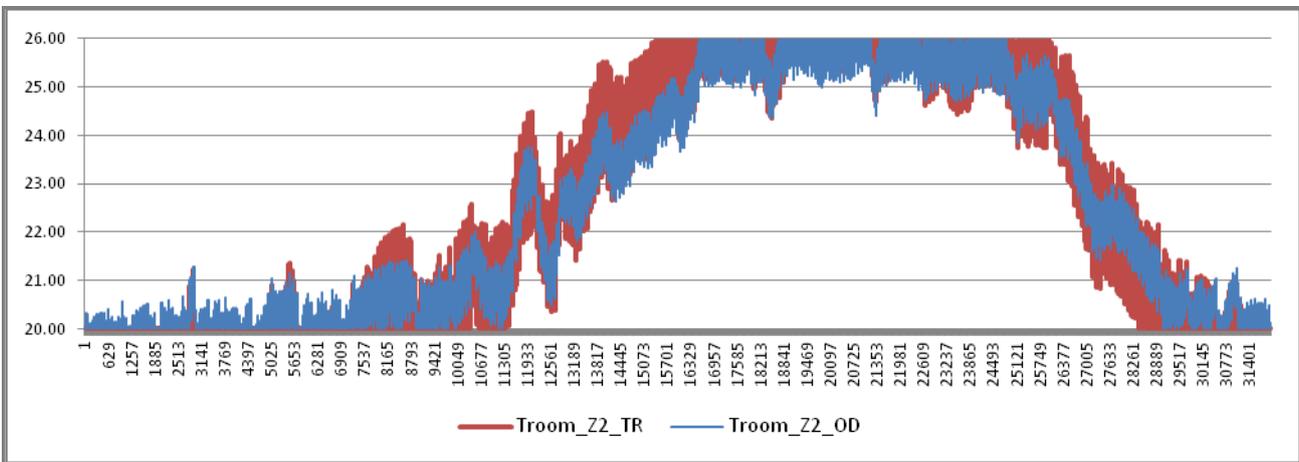
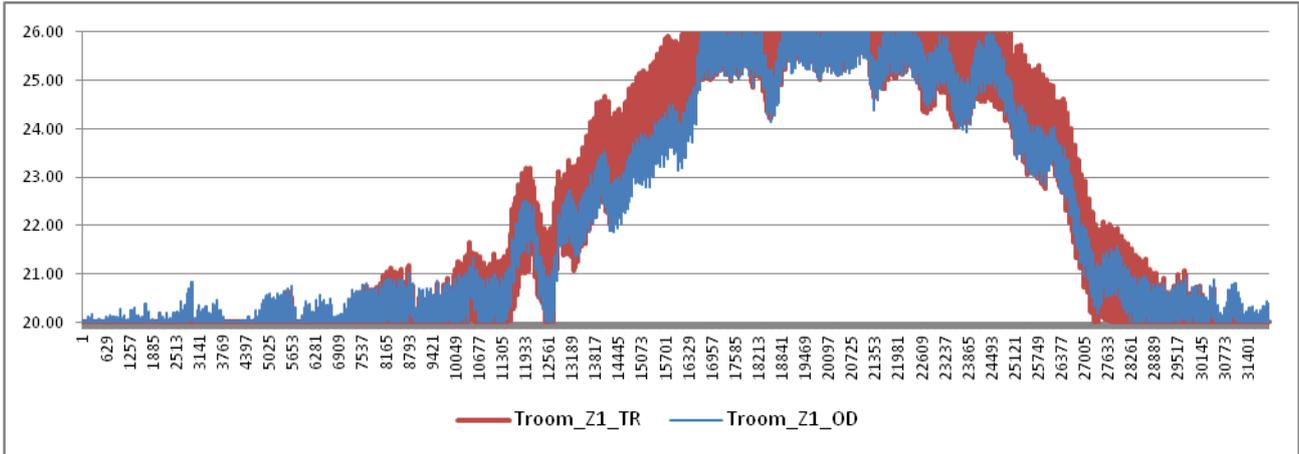
	Fab_est_Z1	Fab_est_Z2	Fab_est_Z3	Fab_est_Z4	Fab est_tot
<b>ODESSE</b>	654	1480	3244	3876	9254
<b>TRNSYS</b>	631,3	1011	2686	3538	7866,3
<b>TRNSYS_NI (NO INTERAZIONE)</b>	375,2	866,1	3329	4091	8661,3
<b>errore OD -TR</b>	3,5%	31,7%	17,2%	8,7%	15,0%
<b>errore OD -TR_NI</b>	42,6%	41,5%	2,6%	5,5%	6,4%

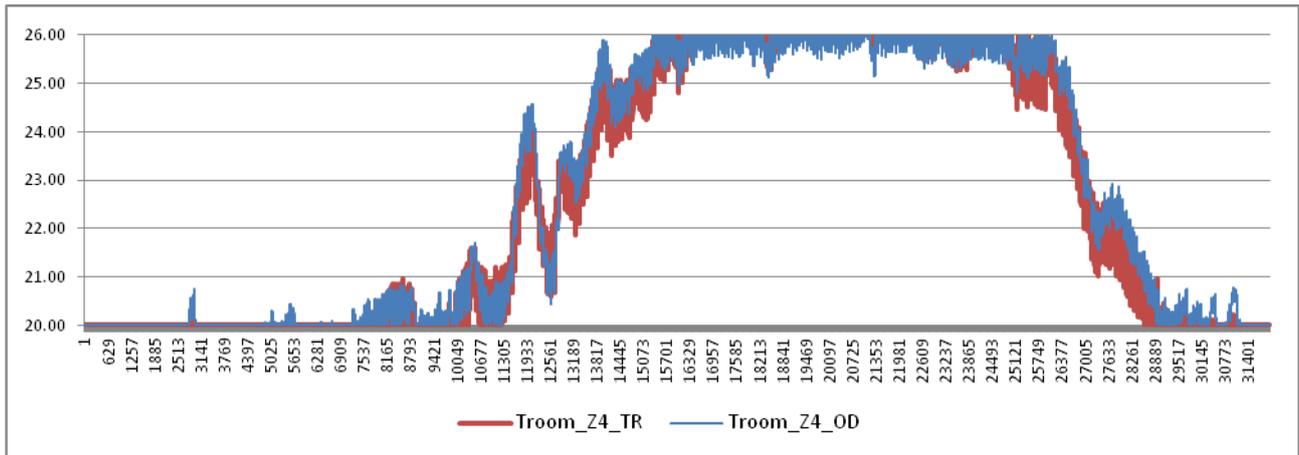
Si può osservare mediamente un errore contenuto al di sotto del 20%, tranne la zona 2 che presenta un'anomalia dovuta ad un problema di lettura del dato meteo non corretto. Ciò è evidenziato anche dai confronti fra i consumi totali invernali ed estivi che evidenziano uno scostamento del 10% in inverno e del 6,5% in estate.

Di seguito sono riportati i grafici relativi alle temperature interne, il cui andamento è di fondamentale importanza per lo sviluppo futuro di tale modello con l'integrazione degli impianti. Tali andamenti evidenziano la buona congruenza fra Trnsys e Odesse.

In particolare le differenze maggiori evidenziate dalla diversa ampiezza di oscillazione del segnale si riscontrano nei mesi di transizione fra la stagione di riscaldamento e quella di raffrescamento, e possono essere trascurate in quanto non hanno nessuna influenza nel calcolo dei fabbisogni termici.

Il motivo di tale diversità risiede nella diversa formulazione dell'equazione differenziale della temperatura e nel diverso approccio al calcolo della capacità termica della zona (vedi Report RdS/2011/178 "Integrazione di layout impiantistici nella piattaforma di simulazione ODESSE (Optimal DESignfor Smart Energy)").





Tenendo conto dell'analisi effettuata e dei risultati ottenuti si può affermare che l'ipotesi di considerare un modello di edificio multizona dove le diverse zone in cui è suddiviso l'edificio non interagiscono termicamente fra di loro può essere ritenuta accettabile, in quanto introduce un'approssimazione che rientra nella classe di errore che in genere commettono i software di simulazione dinamica.

## 6. L'interfaccia Grafica del software Odesse

Durante questo anno, lo sviluppo del software ODESSE è continuato, ed in particolare si è pensato ad una ottimizzazione del codice in esso contenuto.

L'interfaccia, sviluppata in linguaggio Java, è stata ulteriormente testata al fine di trovare eventuali bug o incorrettezze di calcolo.

In una ottica di ottimizzazione e restyling della stessa, inoltre, è stata iniziata una riprogettazione del lato interfaccia utente del software ODESSE, utilizzando linguaggio Java supportato da NetBeas, questo per garantire una maggiore compatibilità con i nuovi sistemi operativi ed uno snellimento degli elementi grafici presenti nelle pagine visualizzate dall'utente, fornendo, in questo modo, uno strumento semplificato ma completo.

Anche nell'ottica del passaggio ad un software di simulazione multizona, la nuova interfaccia grafica, in fase di progettazione, renderà più agevole il passaggio a simulazioni più complesse.

### 6.1. Razionalizzazione ed ottimizzazione del codice.

All'interno del codice di programmazione Java, con cui è costruita l'interfaccia che si occupa dei processi di interazione tra il modello sviluppato e l'utente, si è reso necessario ottimizzare alcuni processi.

Successivamente alla prima versione, rilasciata ad uso pubblico sul sito ENEA, lo sforzo di programmazione si è concentrato su una razionalizzazione del codice, non emersa durante la fase che ha portato alla pubblicazione della prima versione del software.

L'aggiornamento del codice è consistito principalmente in una revisione degli algoritmi di computazione che si occupano di calcolare tutti i valori di interazione termica tra edificio ed ambiente: trasmittanza pareti verticali ed orizzontali, trasmittanza infissi, capacità termica areica delle partizioni interne ed esterne sia verticali, sia orizzontali, etc.

In una prima fase, tali calcoli erano effettuati indipendentemente, ed alcune variabili venivano ricalcolate più volte per una stessa giacitura. Una razionalizzazione del codice ha permesso di ottimizzare tali calcoli, snellendo la procedura di computazione e verifica di tali grandezze. Durante questa fase di ottimizzazione è stata effettuata una ulteriore validazione del codice di calcolo e sono stati eliminati alcuni errori (di ordini di grandezza ininfluenti al fine della simulazione).

E' stata inoltre introdotta una modifica nell'output delle simulazioni: oltre ad un andamento grafico delle temperature, viene fornito un file Excel con vari parametri di simulazione, come indicato nella figura seguente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Temp_edificio_°C	Temp_esterna_°C	PTOTDIS	TOUTDIS_INV	TOUTDIS_E	PDIS_INV	PDIS_EST	TTANK_INV	TTANK_EST	COSTO_GA	PGAS_ACS	MCGAS_ACS	TROOM	UMIDITA' A QLOAD	P_ELE	P_LAT		
2	19,956246	7,199651	0,000000	75,000000	70,000000	7,265612	0,000000	0,000000	0,000000	7,265612	0,195313	1,875000	0,019531	19,956246	0,003038	0,000000	3,256296	
3	19,897854	7,113479	0,000000	75,000000	70,000000	7,265605	0,000000	0,000000	0,000000	7,265605	0,455729	4,375000	0,045573	19,897854	0,003006	0,000000	3,627480	
4	19,839399	7,029592	0,000000	75,000000	70,000000	7,265593	0,000000	0,000000	0,000000	7,265593	0,716146	6,875000	0,071615	19,839399	0,002988	0,000000	3,255241	
5	19,780891	6,948195	0,000000	75,000000	70,000000	7,265575	0,000000	0,000000	0,000000	7,265575	0,976563	9,375000	0,097656	19,780891	0,002972	0,000000	2,635196	
6	19,722341	6,869380	0,000000	75,000000	70,000000	7,265552	0,000000	0,000000	0,000000	7,265552	1,236979	11,875000	0,123698	19,722341	0,002955	0,000000	2,201796	
7	19,663760	6,793104	0,000000	75,000000	70,000000	7,265524	0,000000	0,000000	0,000000	7,265524	1,497396	14,375000	0,149740	19,663760	0,003422	0,000000	1,830612	
8	19,605159	6,719186	0,000000	75,000000	70,000000	7,265491	0,000000	0,000000	0,000000	7,265491	1,757813	16,875000	0,175781	19,605159	0,003678	0,000000	1,598622	
9	19,546548	6,647320	0,000000	75,000000	70,000000	7,265454	0,000000	0,000000	0,000000	7,265454	2,018229	19,375000	0,201823	19,546548	0,003932	0,000000	1,413030	
10	19,487933	6,577106	0,000000	75,000000	70,000000	7,265412	0,000000	0,000000	0,000000	7,265412	2,278646	21,875000	0,227865	19,487933	0,004185	0,000000	1,040792	
11	19,429322	6,508102	0,000000	75,000000	70,000000	7,265365	0,000000	0,000000	0,000000	7,265365	2,539063	24,375000	0,253906	19,429322	0,003897	0,000000	0,606337	
12	19,370717	6,439889	0,000000	75,000000	70,000000	7,265314	0,000000	0,000000	0,000000	7,265314	2,799479	26,875000	0,279948	19,370717	0,003843	0,000000	0,776112	
13	19,312123	6,372134	0,000000	75,000000	70,000000	7,265258	0,000000	0,000000	0,000000	7,265258	3,059896	29,375000	0,305990	19,312123	0,003790	0,000000	1,147296	
14	19,253540	6,304673	0,000000	75,000000	70,000000	7,265199	0,000000	0,000000	0,000000	7,265199	3,320313	31,875000	0,332031	19,253540	0,003736	0,000000	1,148351	
15	19,194970	6,237579	0,000000	75,000000	70,000000	7,265135	0,000000	0,000000	0,000000	7,265135	3,580729	34,375000	0,358073	19,194970	0,003747	0,000000	1,026029	
16	19,136415	6,171224	0,000000	75,000000	70,000000	7,265066	0,000000	0,000000	0,000000	7,265066	3,841146	36,875000	0,384115	19,136415	0,003731	0,000000	0,808802	
17	19,077879	6,106329	0,000000	75,000000	70,000000	7,264993	0,000000	0,000000	0,000000	7,264993	4,101563	39,375000	0,410156	19,077879	0,003715	0,000000	0,559940	
18	19,019372	6,043991	0,000000	75,000000	70,000000	7,264917	0,000000	0,000000	0,000000	7,264917	4,361979	41,875000	0,436198	19,019372	0,003699	0,000000	0,684370	

Esempio di output di ODESSE con simulazione del solo edificio.

L'output, quindi, sarà variabile, in base al tipo di impianto scelto dall'utente: nella parte iniziale, infatti, comprenderà sempre le grandezze relative all'edificio, con misura di temperature, interna ed esterna, ed il fabbisogno termico. In caso di attivazione di un impianto verranno scritte, a seguire, le variabili relative a tale impianto, ad eventuali costi e ad energia utilizzata.

## 6.2. Revisione Distribuzione Impianti

In una prima fase di progettazione del simulatore ODESSE, l'ambiente da simulare (sistema edificio-impianto) era orientato su edifici unicamente *monozona*, come descritto nei rapporti tecnici precedenti.

Alla luce dello sviluppo del modello di edificio multizona e nell'ambito degli aggiornamenti effettuati per l'ottimizzazione dell'interfaccia del software ODESSE per l'edificio monozona, si è pensato di predisporre la stessa interfaccia ad un suo futuro utilizzo a supporto del modello di edificio multizona.

Per questo motivo si è passati da un sistema di distribuzione del condizionamento termico distinta per ogni tipologia di impianto ad un sistema di distribuzione unica. In questo modo sarà possibile implementare più impianti termici per ogni edificio, distinguendo le varie tipologie di impianto ma utilizzando una unica rete di distribuzione.

Per raggiungere questo obiettivo sono state apportate delle modifiche al modello implementato in SIMULINK e all'interfaccia JAVA. Si è cercato, inoltre, di mantenere la compatibilità con i vecchi progetti già implementati e salvati con la prima versione del simulatore, in modo da poter continuare ad utilizzare i dati di progetti già esistenti.

## 7. Acquisizione dei profili di consumo elettrico orario di utenze civili a uso ufficio

Allo scopo di definire una curva di carico elettrico rappresentativa dei consumi di utenze tipo uffici, (*escluso consumi elettrici per condizionamento ambientale*) è in corso da alcune annualità la misura strumentale di edifici presenti all'interno del C.r ENEA di Casaccia, descritti nella seguente tabella e della sede legale. Gli strumenti da Luglio 2009 acquisiscono con un passo temporale di 15 minuti circa 300.000 dati/anno per edificio

Durante questa annualità oltre ad aggiornare le elaborazioni delle misure già riportate nell' annualità precedenti, è stata avviata l'acquisizione di consumi elettrici di un ulteriore edificio uffici presente nel Centro Ricerche ENEA di Casaccia (da Febbraio 2012) al fine di ampliare ulteriormente la casistica e migliorare il dettaglio dei profili tipo.

**Tabella 32: caratteristiche edifici uffici in corso di monitoraggio elettrico strumentale**

	Potenza massima [kW]	superficie utile [mq]	n° persone	periodo di acquisizione
<b>Edificio 1 Cr. Casaccia</b>	82	3250	79	da Luglio 2009
<b>Edificio 2 Cr. Casaccia</b>	103	3650	62	da Luglio 2009
<b>Edificio 3 Cr. Casaccia</b>	31	1176	50	da Febbraio 2012
<b>Sede legale Roma</b>	245	3360	300	da Luglio 2009

### 7.1 Elaborazione di profili di carico elettrico standardizzati per utenze tipo uffici

Nelle Figure successive si riportano le elaborazioni dei profili di carico elettrico degli edifici uno e due del C.R ENEA Casaccia.

Per le misure relative ai consumi della sede legale è in corso una analisi mirata a separare i consumi orari per illuminazione e prese dai consumi per la climatizzazione degli ambienti, in quanto gli strumenti misurano le uscite in bt dei due trasformatori che alimentano l'edificio, compresa le pompe di calore.

La distinzione delle due misure è fondamentale per l'utilizzo delle curve di carico all'interno del nuovo software per la simulazione energetica degli edifici.

L'elaborazione delle curve di carico ha come obiettivo la definizione di profili medi normalizzati rispetto alla potenza contrattuale dell'edificio da simulare ( $P/P_{max}$ )

Per gli edifici all'interno del C.r. Casaccia essendo localizzati all'interno di una rete locale, non è stato possibile, considerare una potenza contrattuale per edifici come parametro di normalizzazione ma si è fatto riferimento al valore di potenza massima misurata.

L'analisi dei dati raccolti ha permesso di individuare i primi profili medi invernali ed estivi per ogni edificio.

L'analisi dei dati raccolti ha permesso, infine, di confermare l'ipotesi di classificazione degli edifici, già ipotizzata nelle elaborazioni fatte nel report della precedente annualità, in base al parametro aggregato definito "Densità affollamento" rappresentato dal rapporto tra il numero di occupanti e la superficie utile dell'edificio ( $N_{occupanti}/S_{utile}$ )

Le elaborazioni dei profili medi verranno perfezionate nel proseguo dell'attività di monitoraggio con i dati forniti dal terzo edificio monitorato e dai dati forniti dal monitoraggio del edificio della sede legale scorporati dai consumi per climatizzazione.

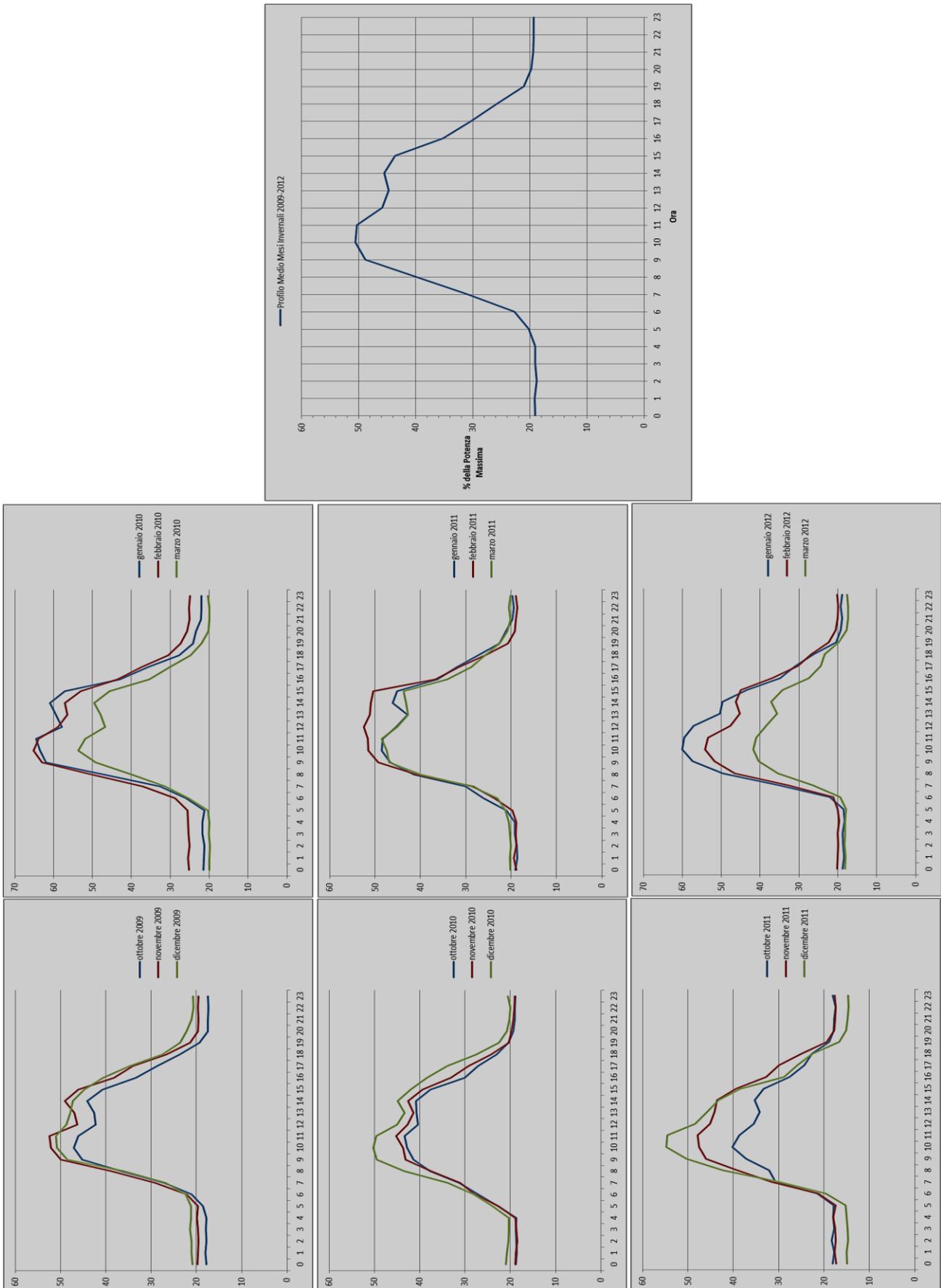


Figura 43; Profilo medio invernale edificio 1.C.r Casaccia – percentuale della potenza elettrica massima assorbita

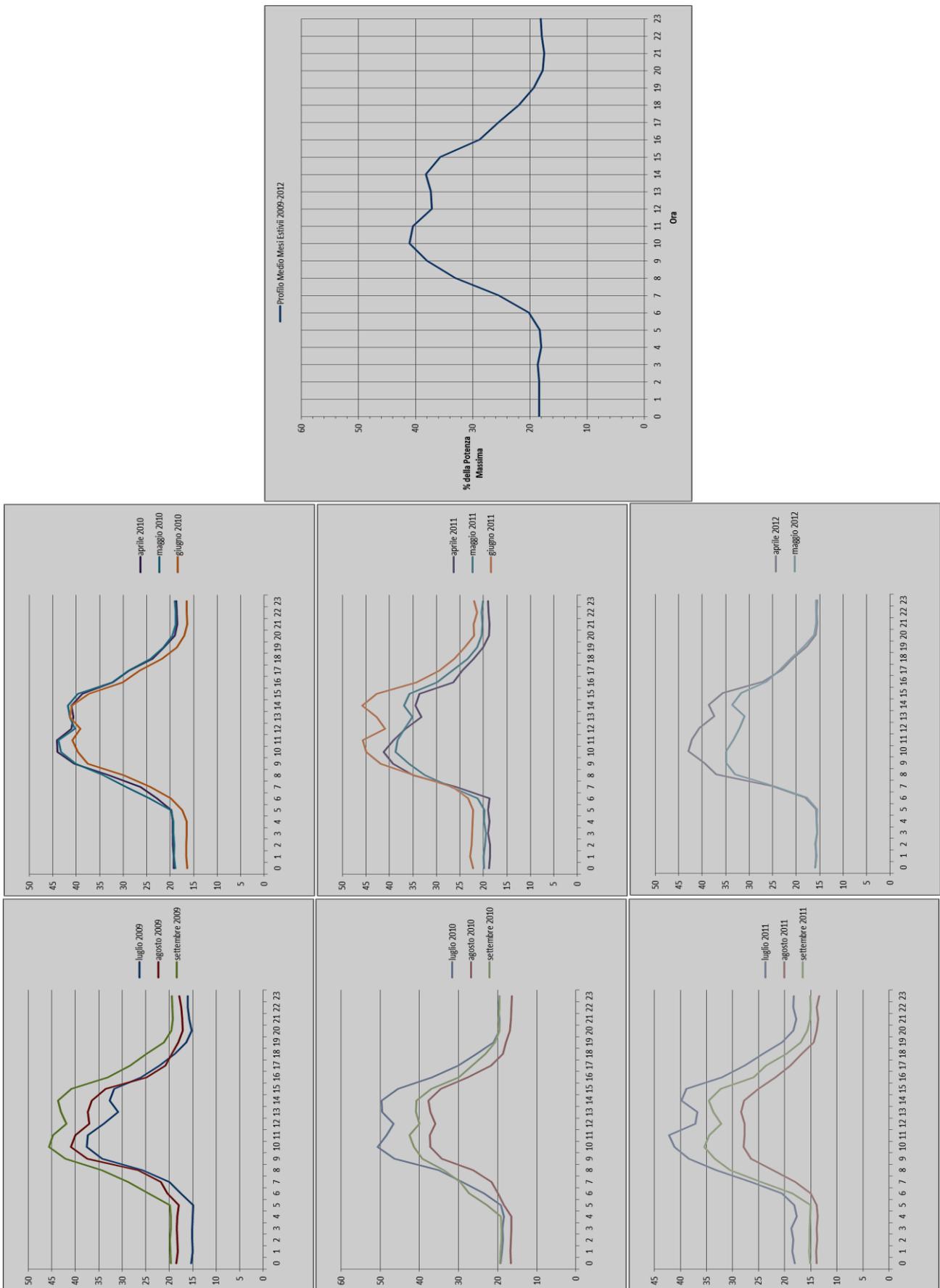


Figura 44: Profilo medio estivo edificio 1 C.r Casaccia - percentuale della potenza elettrica massima assorbita

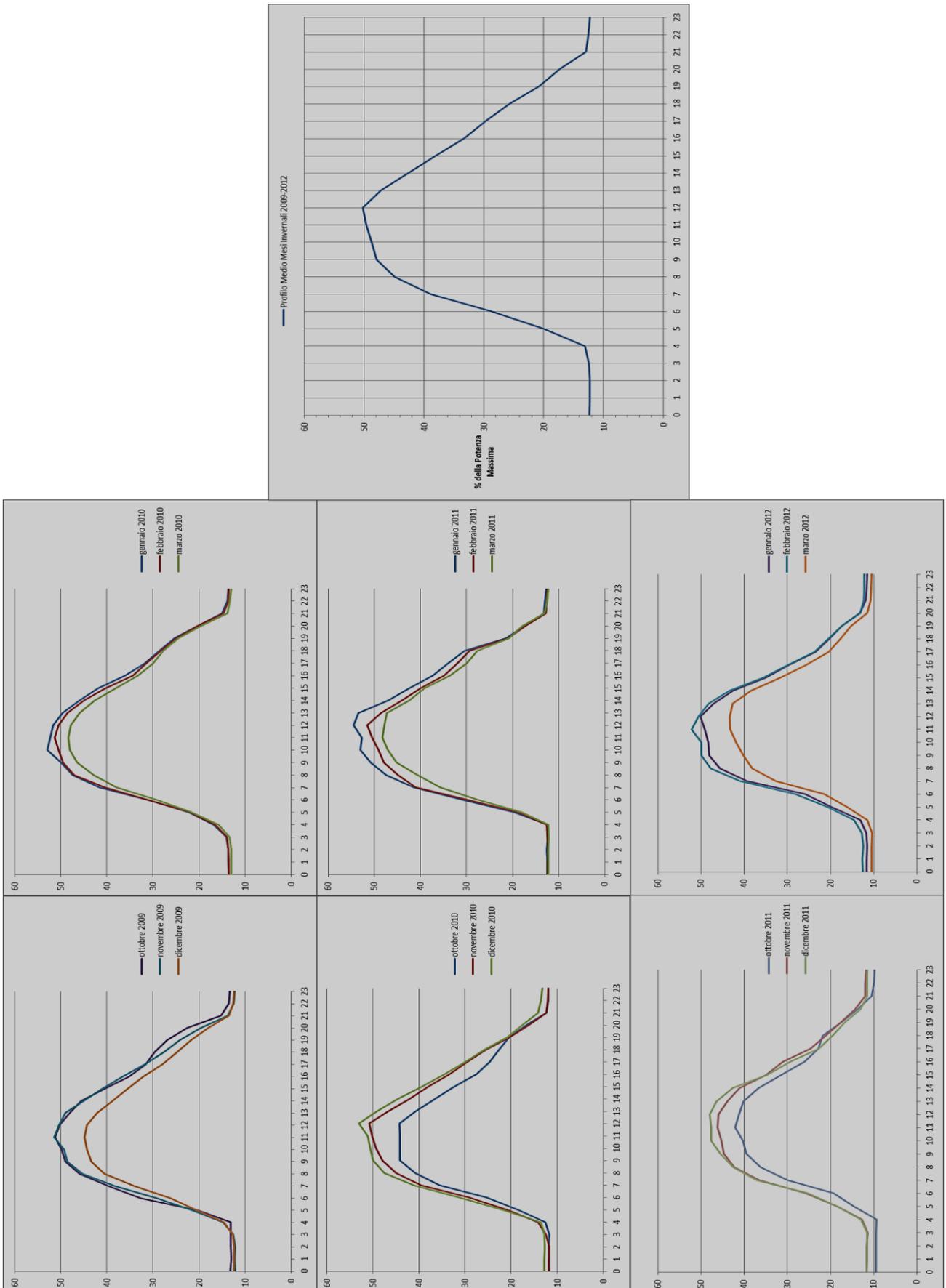


Figura 45: Profilo medio invernale edificio 2.C.r Casaccia - percentuale della potenza elettrica massima assorbita

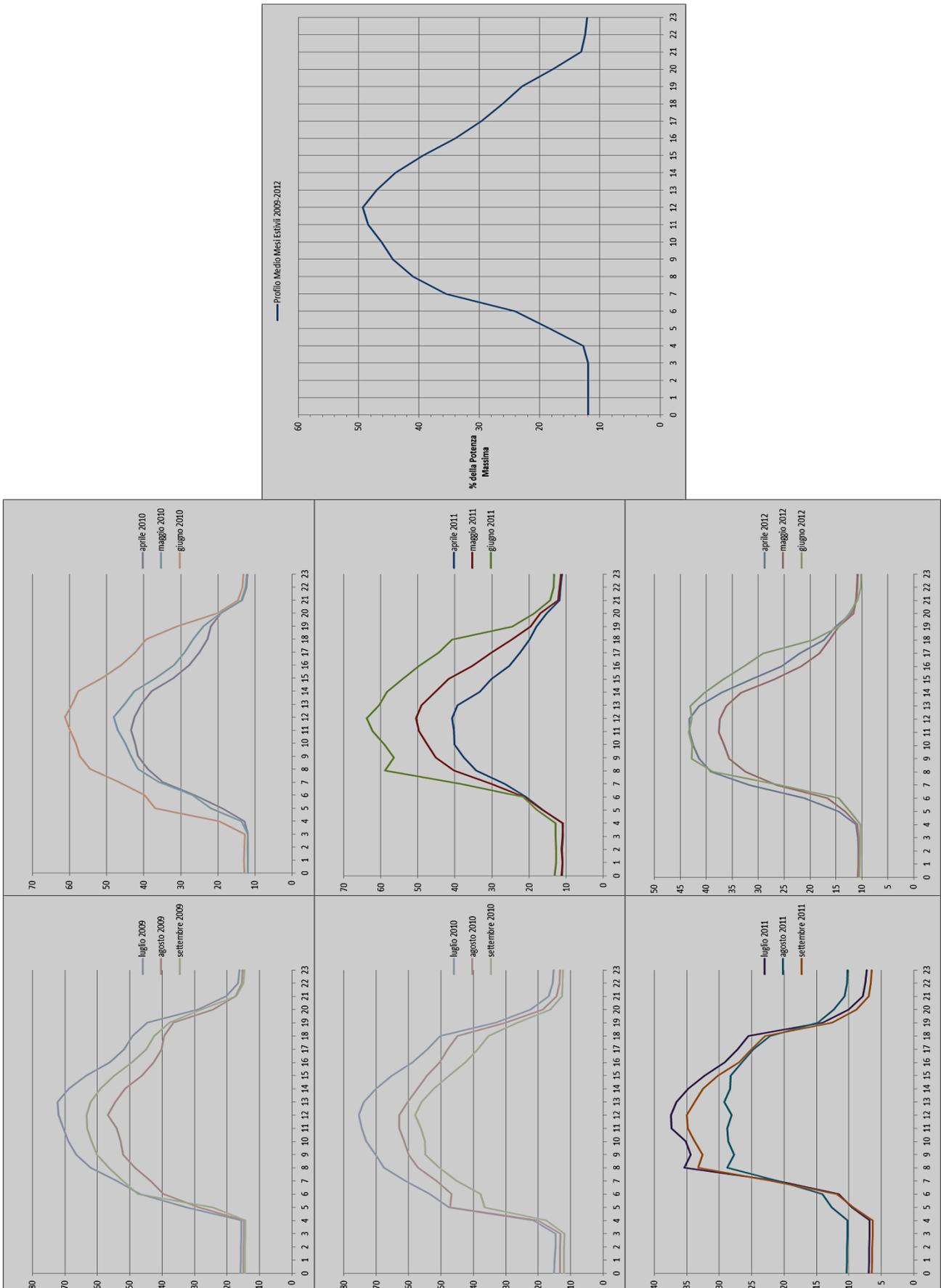


Figura 46: Profilo medio estivo edificio 2 C.r Casaccia- percentuale della potenza elettrica massima assorbita

## 8. Compensazione del carico elettrico degli edifici

Una delle chiavi di sviluppo e diffusione delle micro reti attive è la fornitura da parte di un unico soggetto dei servizi ancillari, cioè dei servizi espletati sulla rete sia lato generazione sia lato carico per garantire oltre alla qualità della fornitura anche funzionamento in sicurezza della rete.

L'esigenza di garantire la fornitura dei servizi ancillari base è tanto maggiore quanto più diffusa è la presenza all'interno della micro rete di generatori non programmabili come le fonti rinnovabili (Fotovoltaico ed eolico); in quanto sono causa di problematiche come fluttuazioni di tensione e non contemporaneità tra produzione e carico.

Tra servizi di rete che sarà possibile simulare con la nuova piattaforma software si mettono in evidenza il servizio di 'load levelling' che consiste nell'inseguimento o livellamento del carico elettrico delle utenze connesse alla rete o la variazione della potenza reattiva immessa in un nodo di generazione per regolare le oscillazioni della tensione.

Oltre allo sviluppo di modelli specifici da integrare all'interno della nuova piattaforma software in oggetto, è stato avviato lo studio di fattibilità relativo alla progettazione e installazione di un compensatore statico di energia attiva e reattiva da installare in un nodo specifico della rete del C.R. ENEA di Casaccia. per l'erogazione dei servizi di rete sopra esposti con logiche di controllo e gestione personalizzabili in modo da ottimizzarne il funzionamento.

Il sistema hardware denominato AFE (Active Front End) sarà costituito da:

- Un inverter bidirezionale (con IGBT) da 30 kW
- Un pacco batterie a litio da 10 kVA
- Un sistema di barre in corrente continua a 600 V
- Una predisposizione per la connessione alle barre DC di una utenza attiva (campo FV) e una utenza passiva (carico DC, veicolo elettrico)

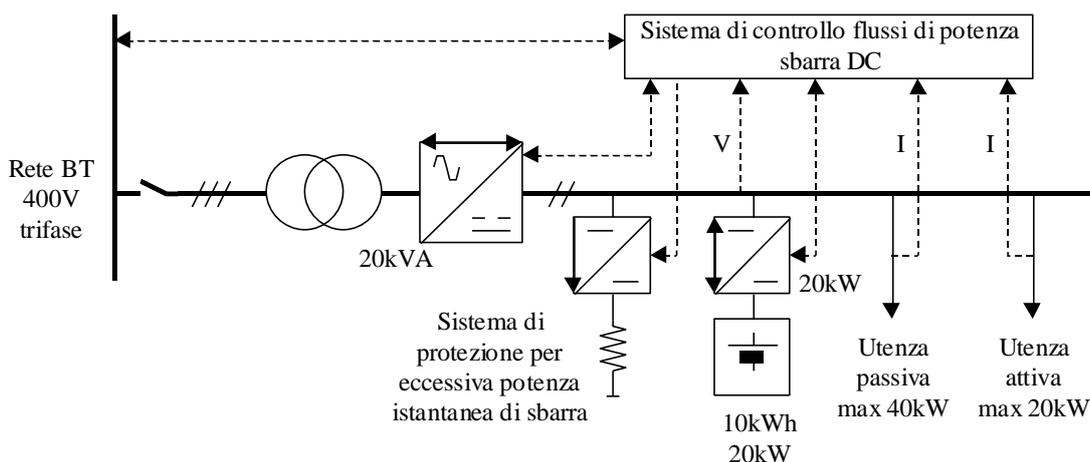
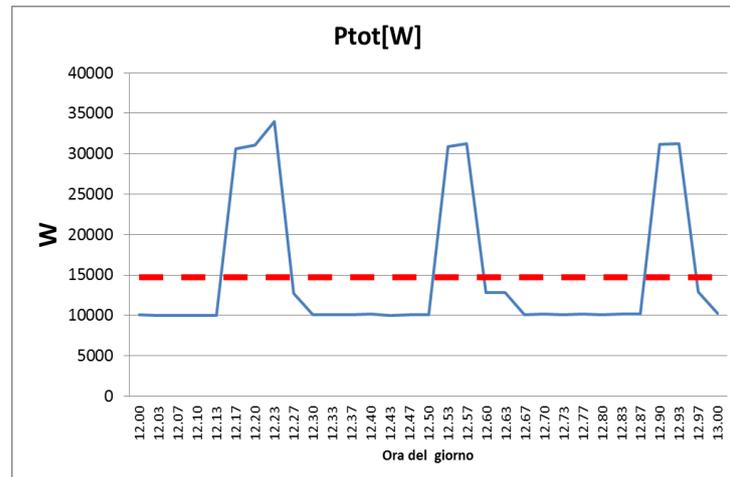


Figura 47: schema del compensatore statico in progetto

L'obiettivo è quello di poter gestire una parte dell'anello MT del Centro Ricerche Casaccia come micro rete attiva applicando i servizi di rete ancillari sopra esposti seguendo anche le azioni di controllo prefigurate dalla nuova norma CEI 0-21.

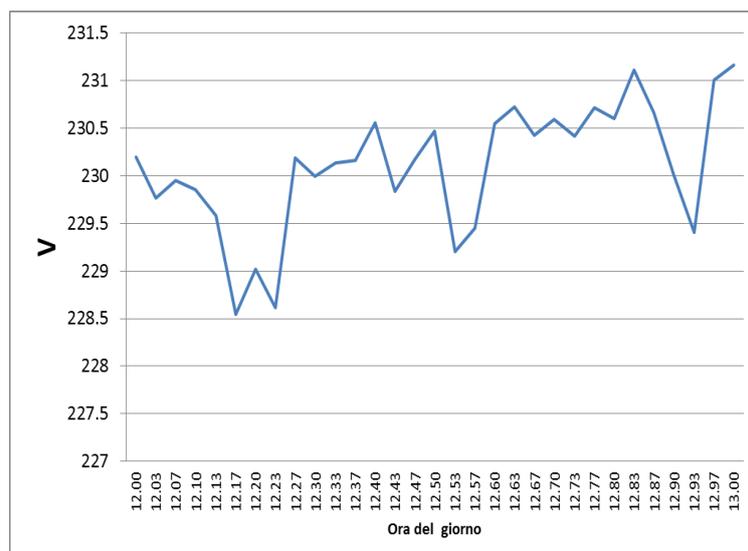
In via preliminare è stato individuato l'edificio F84 dell'area Capanna come possibile carico elettrico su cui sperimentare il funzionamento del sistema inverter-accumulo.

L'edificio alimentato in bassa tensione dalla vicina cabina MT/bt (cabina 20), presenta un carico elettrico molto fluttuante causato dall'avviamento ciclico durante l'intero anno di un compressore da circa 30 kW per la climatizzazione di un laboratorio per la costruzione di celle fotovoltaiche. E' stata effettuata una campagna di misura per verificare il sovraccarico indotto sulla rete dal compressore, si riporta di seguito l'andamento della potenza attiva e reattiva assorbita dal quadro frigo durante un'ora di un giorno tipo.



**Figura 48: Sovraccarico ciclico dovuto all'avviamento del compressore – Livellamento della richiesta dopo compensazione (linea rossa tratteggiata)**

Come si evince dall'andamento della potenza attiva l'avviamento ciclico del compressore genera una un sovraccarico di circa 25 kW rispetto al base load costante di 10 kW.



**Figura 49: tensione di fase nodo di connessione quadro frigo**

Un ulteriore controllo consentirà del dispositivo agirà sulla potenza reattiva erogata per bilanciare la variazione delle tensione del nodo riportata nelle figura seguente:

Nell'ottica della transazione verso la micro rete attiva è stata predisposta una connessione con una utenza attiva in corrente continua come potrebbe essere un generatore fotovoltaico al fine di provale la gestione

di una immissione di potenza in rete programmata da fonte non programmabile e allo stesso tempo ottimizzare i cicli di carica e scarica delle batterie a litio in funzione dei servizi di rete erogati (load levelling) e del prezzo dell'energia. Per rendere possibile la connessione di un campo FV sarà necessario l'inserimento di un convertitore DC/DC, anche esso da porsi in parallelo al BUS DC, che possa operare con un algoritmo di MPPT, la cui potenza sia di 30 kW di picco e tensione pari a quella nominale di barra DC (600 V).

In questo modo il compensatore eserciterà per la rete la funzione di Demand Response, DR, andando a ridurre, lato rete, il picco del carico ed a modificare la forma del diagramma di carico in relazione a segnali di prezzo.

Al fine di personalizzare le logiche di controllo dell'AFE con algoritmi che potranno essere applicati alla futura gestione di una smart grid il è previsto che il sistema verrà pilotato tramite segnali esterni, generati direttamente da modelli implementati in ambienti tipo Labview o Simulink:

In particolare per gestire il sistema dall'esterno, il controllo della potenza attiva e reattiva scambiata con la rete avviene tramite due triple di segnali analogici fornite tramite schede in/out:

- controllo della potenza attiva scambiata con la rete tramite tre segnali analogici esterni uno per fase (-10/+10V o -5/+5 come a voi più comodo) con squilibrio massimo per fase del 30%

- controllo della potenza reattiva erogata per ciascuna fase tramite tre segnali analogici esterni in tensione (0/+10V o 0/+5 come a voi più comodo) con squilibrio massimo per fase 30%

Senza interferire con i controlli di sicurezza interni al sistema, per gestire la potenza erogata ed assorbita dall'esterno è necessario che l'AFE e il BMS delle batterie al litio forniscano al sistema esterno (Labview o Simulink) le seguenti informazioni necessarie

- misura della potenza attiva scambiata P
- misura della potenza reattiva scambiata Q
- misura della tensione ai morsetti lato AC del compensatore V
- misura della frequenza ai morsetti del compensatore f
- stima dello stato di carica del pacco batterie (dal sistema di monitoraggio del pacco di accumulatori)
- segnali digitali di allarme

Il sistema di monitoraggio del pacco accumulatori dovrà essere in grado di controllare le seguenti grandezze al fine di garantire un funzionamento in sicurezza del sistema :

- tensione di ogni modulo (a circuito aperto, in carica e scarica)
- temperatura ambiente
- temperatura per alcuni moduli pilota da scegliere opportunamente all'interno del pacco.
- corrente del pacco durante la carica e scarica

Per alimentare un eventuale carico in continua (es. ricarica veloce di un veicolo elettrico) di cui non si conosce il ciclo di funzionamento è previsto anche il passaggio in modalità automatica la quale prevede:

- a) Gestione di carichi in continua attraverso l'erogazione della potenza, sia da parte delle batterie, sia da parte dell'AFE che preleva potenza dalla rete
- b) Ricarica delle batterie del compensatore nel qual caso queste ultime fossero scariche
- c) Non deve erogare potenza alla rete.

## Bibliografia

---

- B** ASHRAE HANDBOOK, 2009. FUNDAMENTALS, SI Edition.
- B** Manuale TRNSYS 16 vol.6
- B** <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- B** <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- B** <https://analysis.nrel.gov/homer/>
- B** <http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/docs/models.html>
- B** <http://www.reti-fluidi.it/teleit.htm>
- B** <http://www.digsilent.de/>
- B** Riscaldamento urbano : Annuario AIRU 2011
- B** Experiments on Energy Networks of Electricity, Hot Water, and Hydrogen in Residential Homes - Y. Ishikawa, I. Sugimoto, I. Tamura, A. Kegasa, Y. Taniguchi, H. Aki- JSME Annual Meeting, 2007(3), 33-34, 0501, 2007
- B** I Quaderni dell'energia: L'Efficienza nel settore delle reti energetiche – I. Bertini, B. Di Pietra, G. Graditi, Pubblicazioni ENEA - <http://www.efficienzaenergetica.enea.it>
- B** V. Cataliotti, Impianti elettrici, Flaccovio editore
- B** Estimation of potential demand of “Networked Area Energy Use” in Yokohama city - Takao.Ogata - IGRC2011 conference - Seoul, 19-21 October 2011