



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Analisi per la definizione degli indici di severità climatica

**L. Rubini, M. Di Veroli, A. Calabria, S. Sangiorgio, G. Orsini, M. Lavra,
G. Habib**





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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Analisi per la definizione degli indici di severità climatica

L. Rubini, M. Di Veroli, A. Calabria, S. Sangiorgio, G. Orsini, M. Lavra, G. Habib

ANALISI PER LA DEFINIZIONE DEGLI INDICI DI SEVERITÀ CLIMATICA

L.Rubini, M. Di Veroli, A. Calabria, S. Sangiorgio, G. Orsini, M. Lavra, G. Habib (ISES Italia)

Maggio 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione.

Interazione condizionamento e illuminazione

Responsabile Tema: Marco Citterio, ENEA



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

ANALISI PER LA DEFINIZIONE DEGLI INDICI DI SEVERITÀ CLIMATICA

Coordinatore:

ing. Luca Rubini

A cura di:

ing. Mario Di Veroli

ing. Alfonso Calabria

ing. Silvia Sangiorgio

ing. Giuseppe Orsini

ing. Marco Lavra

ing. Giuseppe Habib

Sommario

1.	Descrizione del problema ed obiettivi della ricerca	3
2.	Variabili da cui dipende l'indice di severità climatica.....	4
3.	Metodi di ricerca attraverso simulazioni.....	7
4.	Scelta degli edifici tipo e loro modellizzazione.....	8
5.	Calcolo delle variabili edificio A, B, C.....	11
6.	Modello e Simulazioni	15

1. Descrizione del problema ed obiettivi della ricerca

In seguito al recepimento in Italia della Direttiva Europea 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia, è sorta la necessità di creare parametri oggettivi che definiscano l'efficienza energetica di un edificio. Questi parametri dovranno valutare l'efficienza in termini di necessità energetica per il riscaldamento invernale, il condizionamento estivo, per l'illuminazione artificiale e per l'acqua calda sanitaria.

Con riferimento all'indice di severità climatica invernale utilizzato per la classificazione del territorio nazionale, i cosiddetti Gradi Giorno¹, si intende ricercare un analogo indice il quale permetta un'analoga classificazione basata sulla differente richiesta energetica per la climatizzazione estiva.

Per far questo occorre tenere in considerazione le differenze sostanziali tra lo studio del caso invernale in confronto al caso estivo.

I Gradi Giorno per il caso invernale tengono semplicemente conto, per la classificazione del territorio, dell'andamento della temperatura media esterna e ne fanno una differenza, cumulata nel periodo di riscaldamento, con una temperatura di set point interna (20°C). Si noti come nella definizione del parametro Gradi Giorno non si tenga conto di altre caratteristiche climatiche relative alla località in esame che influenzano gli apporti energetici per la climatizzazione, quali l'umidità e l'irraggiamento.

Per quanto riguarda l'umidità, con particolare riferimento alle utenze residenziali, tale parametro non influenza sensibilmente la richiesta energetica per il riscaldamento, in quanto tradizionalmente il sistema di riscaldamento utilizzato nell'edilizia residenziale risulta essere quello a radiatori - termosifoni, il quale normalmente non prevede il trattamento dell'umidità dell'aria.

Per quanto riguarda l'irraggiamento, invece, risultando un carico positivo (cioè un'energia entrante per il sistema da riscaldare) per la stagione invernale, trascurare questo termine significa dunque sovrastimare il fabbisogno energetico per il riscaldamento di un edificio, eseguendo per gli scopi proposti una semplificazione in "sicurezza".

Per il caso estivo, invece, non risulta possibile effettuare queste semplificazioni di calcolo: l'umidità e l'irraggiamento influenzano sensibilmente l'apporto energetico per la climatizzazione di un ambiente/edificio e occorre includerle nel calcolo del fabbisogno.

Per quanto riguarda l'umidità, il trattamento dell'aria per il condizionamento estivo, largamente utilizzato sia nelle utenze residenziali che nel settore terziario, prevede che l'aria venga deumidificata mediante apposite unità di trattamento.

L'irraggiamento, anche in questo caso energia entrante nel sistema considerato, è uno dei carichi termici da considerare per tener conto dell'energia necessaria al condizionamento estivo.

E' quindi più difficile individuare una semplice funzione che permetta di classificare univocamente la località in esame partendo semplicemente da un parametro climatico, ad esempio la temperatura media giornaliera esterna confrontata con una fissata temperatura di Set Point, così come per il caso invernale.

¹ D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991 n.10. (Versione revisionata a seguito del D.P.R. 21 dicembre 1999 n. 551)

Luca Rubini, Mario Di Veroli, Alfonso Calabria, Silvia Sangiorgio, Giuseppe Orsini, Marco Lavra, Giuseppe Habib

Lo scopo che questo progetto di ricerca intende raggiungere è quantificare e qualificare i fabbisogni energetici per la climatizzazione di un edificio, al fine di individuare “empiricamente” dei parametri caratteristici con i quali “pesare” opportunamente le caratteristiche climatiche di una località e quindi individuare una funzione che permetta una classificazione del territorio nazionale basata sugli indici di severità climatica invernali e estivi.

Per far questo si è deciso di effettuare delle simulazioni tramite software di calcolo dedicato, in modo tale da poter simulare il comportamento di più edifici in più località. In tal modo si è ottenuto un certo numero di dati empirico - sperimentali che possano costituire una base per individuare la giusta relazione matematica che, come detto, permetta di classificare il territorio nazionale.

2. Variabili da cui dipende l'indice di severità climatica

Lo studio è stato effettuato utilizzando le linee guida indicate da Luciano Terrinoni in un suo documento realizzato per l'ENEA (*“Un approccio razionale alla definizione delle zone climatiche di un territorio per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione degli edifici: dai Gradi-Giorno invernali agli indici di severità climatica ALL-WEATHER”*).

Terrinoni delinea una metodologia di calcolo che porta alla definizione di un indice di severità climatica *All weather*, definendo le approssimazioni da effettuare, ma mantenendo comunque un approccio il più generale possibile al problema in oggetto.

Nel calcolo del fabbisogno energetico di un edificio i fattori principali di scambio termico di cui bisogna tenere conto sono: la potenza dispersa dall'involucro dell'edificio, la potenza del ricambio d'aria e la potenza radiante solare incidente sull'edificio. Per effettuare una semplificazione del modello, è possibile trascurare gli apporti interni dovuti per esempio all'attività umana e alle apparecchiature elettriche in funzione. Questa approssimazione rende il calcolo semplificato, allontanandosi dalle modalità normalmente utilizzate nella progettazione degli impianti di termotecnici ma, considerando che lo scopo dello studio è raggiungere dei risultati il più generale possibili, si tratta di una semplificazione indispensabile.

In accordo con quanto scritto da Terrinoni, l'equazione finale che esprime la potenza necessaria per il condizionamento è:

$$P = U_{eq} S (\theta_e - \theta_i) + \rho n V [c_p (\theta_e - \theta_i) + r_0 (x_e - x_i)] + \sum_{\beta} s_{R,\beta} \Gamma_{\beta} I_0$$

Che integrata nel periodo di funzionamento diventa:

$$E_T = \int_T P dt = U_{eq} S \int_T (\theta_e - \theta_i) dt + \rho n V c_p \int_T (\theta_e - \theta_i) dt + \rho n V r_0 \int_T (x_e - x_i) dt + \hat{S}_R \int_T (I_0 - I_{0,ref}) dt$$

Dove:

U_{eq} è un coefficiente di scambio termico equivalente

T è il periodo di funzionamento

S è la superficie dell'involucro esterno

Luca Rubini, Mario Di Veroli, Alfonso Calabria, Silvia Sangiorgio, Giuseppe Orsini, Marco Lavra, Giuseppe Habib

θ_e e θ_i sono la temperatura esterna ed interna

ρ è la densità dell'aria secca

n è il numero di volumi di aria dell'edificio ricambiati nell'unità di tempo

V è il volume dell'edificio

c_p è il calore specifico a pressione costante dell'aria secca

r_0 è l'entalpia di vaporizzazione dell'acqua a 0°C

x_e e x_i sono il titolo di miscela dell'aria esterna ed interna

$S_{R,\beta}$ è una superficie irradiata equivalente definita dall'orientamento, dalla quantità di superficie opaca, dalla quantità di superficie trasparente e dalle caratteristiche delle due parti

Γ_β è il rapporto fra la radiazione solare incidente su superficie orizzontale e la radiazione solare incidente su una superficie con coseni direttori β

I_0 è la radiazione globale incidente su superficie orizzontale

$\hat{S}_R$ è una superficie orizzontale equivalente definita dal prodotto $S_R \cdot \hat{\Gamma}$, dove S_R è dato dalla somma di tutte le superfici esterne dell'edificio e $\hat{\Gamma}$ è un valore opportunamente tarato che definisce il rapporto fra la radiazione solare incidente su tutte le superfici dell'edificio e la radiazione solare su piano orizzontale.

$I_{0,ref}$ è un valore costante, tale da mantenere l'ultimo termine dell'integrale sempre positivo.

Mediando gli integrali si trova l'equazione:

$$\frac{E_T}{VT} = \left[U_{eq} \frac{S}{V} + \rho n c_p \right] \cdot \Theta + \rho n r_0 \cdot X + \frac{\hat{S}_R}{V} \cdot I_{0,ref}$$

Dove:

$$\Theta = \frac{1}{T} \int_T (\theta_e - \theta_i) dt$$

$$X = \frac{1}{T} \int_T (x_i - x_e) dt$$

$$\varphi = \frac{1}{T} \int_T (I_0 - I_{0,ref}) dt$$

Chiamato E l'**indice di severità climatica**, si può riscrivere in forma compatta:

$$E = A\Theta + BX + C\varphi$$

Dove A , B e C sono caratteristiche dell'edificio, mentre ϑ , X e T sono parametri che dipendono dalla località considerata.

Con l'obiettivo di definire una procedura pratica per individuare semplicemente i valori dell'indice di severità climatica appena definito, è necessario ricorrere a delle approssimazioni che rendano il calcolo più immediato, senza però inficiare la veridicità dei risultati ottenuti. Alcune di queste scelte partono da normali considerazioni legate al problema della climatizzazione invernale e estiva negli edifici residenziali. In relazione al calcolo dei carichi termici per il riscaldamento ed il raffrescamento di un edificio, le uniche differenze tra gli edifici residenziali e le altre tipologie di edificio sono le seguenti (in accordo con la norma ASHRAE):

- Diversamente dalle altre strutture, gli edifici residenziali sono generalmente occupati e condizionati 24h al giorno, virtualmente tutti i giorni della stagione di rinfrescamento e riscaldamento
- I carichi termici dei sistemi residenziali sono principalmente dovuti agli scambi di calore attraverso i componenti strutturali dell'edificio e per la presenza di ventilazione/infiltrazione di aria esterna. I carichi termici interni, principalmente dovuti alla presenza di persone e delle luci, sono ridotti in confronto agli edifici commerciali o industriali.
- La maggior parte delle abitazioni sono condizionate come "single zone": la capacità delle unità di condizionamento non può essere re-distribuita da un'area all'altra con il variare del carico termico da un'ora all'altra.
- La maggior parte dei sistemi di condizionamento negli edifici residenziali è di relativamente piccola potenzialità (circa 5÷18 kW in raffrescamento, 18÷32 kW in riscaldamento). Poiché i carichi sono largamente influenzati dalle condizioni esterne e pochi giorni per ogni stagione di condizionamento possono essere considerati giorni di "design", risulta che i sistemi di condizionamento sono generalmente sovradimensionati.
- La deumidificazione viene effettuata **esclusivamente** nel periodo di condizionamento estivo, e il controllo delle condizioni ambientali viene generalmente effettuato per mezzo di un termostato che è sensibile al solo input di calore sensibile.
- Le costruzioni multifamiliari (come palazzi con più appartamenti) hanno un comportamento globalmente simile alle abitazioni monofamiliari (ville), ma le singole unità abitative non hanno le superfici esterne esposte in tutte le direzioni e quindi hanno differenti carichi termici.

Queste considerazioni giustificano la procedura di calcolo e parte delle approssimazioni eseguite, come meglio verrà illustrati in seguito.

Nel tentativo di ridurre il problema della definizione dell'indice di severità climatica, dipendente da 3 parametri climatici legati alla temperatura, umidità e irraggiamento, ad un calcolo "*a due dimensioni*", è possibile trascurare il parametro di mantenimento delle condizioni di umidità X . La formulazione semplificata del fabbisogno energetico di un edificio è quindi esprimibile mediante la formula con due sole variabili climatiche:

$$E = A\Theta + C\wp$$

Considerando l'indice di severità E costante, l'equazione è interpretabile come una retta nel piano bidimensionale delle variabili $\{\Theta, \wp\}$.

Il coefficiente angolare di questa retta è dunque $k = -\frac{A}{C}$.

Posto il problema in questi termini, l'indice di severità climatica è un parametro funzione delle variabili climatiche $\{\Theta, \wp\}$ proprie della località in esame e dal rapporto $\frac{A}{C}$ dipendente dalle caratteristiche dell'edificio. L'obiettivo di questo studio è però di trovare un indice dipendente unicamente dalle variabili climatiche, ovvero dalla località. È pertanto necessario rendere l'indice di severità climatica indipendente dal rapporto $\frac{A}{C}$.

È possibile risolvere il problema da un punto di vista numerico: vengono calcolati i valori di E per diversi edifici collocati in varie località italiane (caratterizzate dalla coppia di valori $\{\Theta, \wp\}$); quindi viene ricercata una funzione dei soli parametri climatici $\{\Theta, \wp\}$ delle località con un'interpolazione ai minimi quadrati, in modo tale da ottenere una superficie di secondo grado dipendente unicamente dalle variabili $\{\Theta, \wp\}$.

Il risultato finale è un'equazione con questa forma:

$$E = a\Theta^2 + b\wp^2 + c\Theta\wp + d\Theta + e\wp + f$$

dove i coefficienti a, b, c, d, e, f (valori numerici) sono il risultato della minimizzazione ai minimi quadrati ottenuta dal fitting di numerose simulazioni sul fabbisogno di diverse tipologie di edificio in diverse località del territorio nazionale.

3. Metodi di ricerca attraverso simulazioni

Il software scelto per la simulazione del comportamento di un edificio è "TRNSYS studio, versione 4.0.0.0 release 16.00.0037". Tale software di calcolo dinamico dà la possibilità di avere come output di una simulazione dinamica di un edificio l'andamento orario delle più importanti caratteristiche di interesse per lo studio in oggetto.

Il software tiene conto di tutte le inerzie termiche dell'edificio stesso e quindi tiene conto dello sfasamento tra tutti gli input termici relativamente alle condizioni di set point dell'ambiente da climatizzare. Questo risultato, se da una parte rende possibile la valutazione puntuale del comportamento di un edificio, dall'altra rende più difficoltosa la valutazione in senso più "generale" e quindi la schematizzazione e la modellizzazione "astratta" del problema in questione.

Si rende perciò necessaria una elevata quantità di simulazioni per poter generalizzare i risultati ottenuti e poter quindi trovare una schematizzazione del problema, effettuando un confronto con le più semplici e immediate equazioni che governano i fenomeni di tipo stazionario

4. Scelta degli edifici tipo e loro modellizzazione

Il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici è stato effettuato in venti località per dodici edifici diversi. Si è ritenuto infatti necessario effettuare il calcolo su più edifici per bilanciare gli effetti termici dovuti all'irraggiamento e quelli dovuti alla temperatura dell'aria esterna. Utilizzando un unico edificio avremmo condizionato il rapporto fra i due contributi in base alle caratteristiche dell'edificio stesso (ad esempio una maggior quantità di superfici vetrate ad est avrebbe accentuato l'influenza dell'irraggiamento).

Le località considerate sono le seguenti: Agrigento, Palermo, Alghero, Bari, Caserta, Campobasso, Gorizia, Roma, Lucca, Pesaro, Perugia, Milano, Ancona, Foggia, Trento, Torino, Aosta, Cuneo, Vicenza e Cagliari.

Nell'effettuare le simulazioni sono stati utilizzati i dati climatici delle località come indicato nella norma UNI 10349.

Tramite il modulo di TRNSYS "weather generator" *type54b* è stato possibile creare valori orari di irraggiamento, temperatura ed umidità necessari per far eseguire la simulazione a TRNSYS. I valori inseriti in input (presi dalla norma UNI 10349) sono la temperatura media mensile, l'irraggiamento medio mensile su superficie orizzontale e l'umidità specifica. L'utilizzo del weather generator è particolarmente indicato per questo studio, infatti per tutte le località viene creato un modello meteorologico analogo. In altre parole per tutte le località ci sarà un'annata con caratteristiche simili (mezze stagioni più o meno pronunciate, precipitazioni analoghe ecc.) mantenendo comunque i valori medi imposti in input. Questo fatto ha notevolmente favorito il confronto dei risultati fra le località.

È stato deciso di creare dodici edifici con caratteristiche verosimili, in modo tale da rispecchiare mediamente le caratteristiche del parco edifici nazionale italiano.

I dati Istat del censimento del 2001 evidenziano le seguenti percentuali:

- In Italia il 61,5 % degli edifici è a muratura portante, il 24,7 % è in calcestruzzo armato mentre il restante 13,8 % è di altro materiale (legno, acciaio, strutture miste).
- Il 19,2 % degli edifici è stato costruito prima del 1919, il 12,3 % tra il 1919 e il 1945, il 50,0 % tra il 1946 e il 1981, l'11,5 % tra il 1982 e il 1991 e il 7,0 % dopo il 1991.
- Il 22,6 % degli edifici ha solo il piano terra, il 52,9 % ha due piani, il 17,3 % ha tre piani e il 7,2 % degli edifici ha quattro o più piani.
- In media le abitazioni occupate da persone residenti hanno una superficie di 96,0 mq.

Partendo da questi dati e considerando le tecniche costruttive dei diversi periodi, è stato possibile ipotizzare i dodici edifici test per il calcolo del fabbisogno energetico. La combinazione delle caratteristiche individuate dai dati statistici sopraelencati, con diverse tipologie di vetrate e parametri di coibentazione dell'edificio più o meno critici ha permesso di creare dei casi il più possibile diversificati. Ogni edificio descritto corrisponde ad una particolare tipologia presente in Italia.

È evidente come certi edifici si trovino difficilmente in determinate località, ad esempio un edificio fortemente coibentato è molto improbabile che venga costruito nel Mezzogiorno e viceversa per un edificio con pareti sottili in una località montana. Nell'effettuare il calcolo sono stati comunque considerati tutti gli

Luca Rubini, Mario Di Veroli, Alfonso Calabria, Silvia Sangiorgio, Giuseppe Orsini, Marco Lavra, Giuseppe Habib

edifici in tutte le località, questo sia per evitare una eccessiva complessità del calcolo matematico (si sarebbe dovuto cambiare completamente l'algoritmo utilizzato per il fitting delle simulazioni effettuate), sia per rendere il valore dell'indice di severità climatica il più possibile indipendente dagli edifici, ma rappresentativo unicamente delle caratteristiche climatiche.

Gli edifici da utilizzare per le simulazioni in TRNSYS sono stati creati in base alle seguenti linee guida:

Tipologia edificio	Dim. Lorde Pianta (m)	Superficie Lorda Pianta (m ²)	H interpiano (m)	Superfici vetrate: N-W-S-E (%)	Volume lordo (m ³)	Piani	Rapporto S/V ²
Villetta monofamiliare	10x15	150	3	30-30-10-10	525	1	0.90
Villetta monofamiliare	10x15	150	3	30-30-10-10	1013	2	0.63
Edificio in linea	11x23	253	3	30-30-10-10	3352	4	0.42
Edificio a torre	20x20	400	3	35-30-10-5	13100	10	0.26

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando 3 diverse tipologie di involucro con diversi valori di trasmittanza media (W/m²K). Gli involucri sono stati selezionati utilizzando i materiali disponibili nelle librerie di TRNSYS. Nello specifico:

Edificio Non Isolato

- Strutture opache:
Brick 0.33 m + Plaster 0.015 m
 $U_{tot}=1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $S=0.345 \text{ m}$
- Soffitto:
Concrete 0.24 m + Insul 0.011 m
 $U_{tot}=1.79 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $S=0.251 \text{ m}$
- Pavimento
Floor 0.005 m + Stone 0.06 m + Silence 0.008 m + Concrete 0.24 m
 $U_{tot}=1.79 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $S=0.313 \text{ m}$
- Vetri:
Vetro singolo 2 mm (TRNSYS ID 13901)
 $U=5.9 \text{ W/m}^2\text{K}$

Edificio Mediamente Isolato

- Strutture opache:
Brick 0.38 m + Insul 0.02 m + Plaster 0.015 m
 $U_{tot}=0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $S=0.415 \text{ m}$
- Soffitto:
Concrete 0.24 m + Insul 0.033 m
 $U_{tot}=0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$

² Rapporto tra la superficie disperdente totale e il volume lordo riscaldato

- S=0.273 m
- Pavimento
Floor 0.005 m + Stone 0.06 m + Silence 0.035 m + Concrete 0.24 m
 $U_{tot}=0.91 \text{ W/m}^2\text{K}$
S=0.340 m
- Vetri:
Doppi vetri 6/12/6 mm (TRNSYS ID 13912)
 $U=3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Edificio Bene Isolato

- Strutture opache:
Brick 0.24 m + Insul 0.08 m + Plaster 0.015 m
 $U_{tot}=0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
S=0.335 m
- Soffitto:
Concrete 0.24 m + Insul 0.09 m
 $U_{tot}=0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
S=0.33 m
- Pavimento
Floor 0.005 m + Stone 0.06 m + Silence 0.04 m + Concrete 0.24 m + Insul 0.05
 $U_{tot}=0.41 \text{ W/m}^2\text{K}$
S=0.395 m
- Vetri:
Tripli vetri 4/8/4/8/4 mm (TRNSYS ID 13923)
 $U=2.2 \text{ W/m}^2\text{K}$

La definizione dei materiali costituenti le pareti è stata lasciata con valori di default, essendo stato necessario variare solamente lo spessore degli stessi per rispettare le caratteristiche costruttive appena descritte.

Materiale	Conduttività [kJ/h m K]	Capacità [kJ/kg K]	Densità [g/m ³]
Brick	3.2	0.144	5
Insul	1	0.8	1
Plaster	1800	40	2000
Floor	0.252	1	800
Stone	5	1	2000
Silence	0.18	1.44	80
Concrete	7.56	0.8	2400

Nell'implementare la struttura degli edifici mediante l'applicativo TRNbuild sono state effettuate le seguenti approssimazioni:

- Edifici schematizzati come parallelepipedi (single zone);
- tetto degli edifici, copertura orizzontale ;
- conduttanza delle pareti posta uguale a quelle sopra specificate e applicate in maniera uniforme sulle due tipologie di tamponature esterne (opache e trasparenti);
- non sono stati previsti fenomeni di ombreggiamento dall'esterno;
- non sono stati previsti carichi termici interni (presenza di persone e apparecchiature elettriche);
- l'edificio viene ruotato nei quattro orientamenti (nord, sud, ovest, est) mantenendo invariata la distribuzione delle superfici trasparenti rispetto a quelle opache;
- Le condizioni di benessere interne sono:
 - a. Estate 26 °C (UNI 10339), 50 % UR e 0,3 ricambi orari (UNI TS 11300)
 - b. Inverno 20 °C, 50 % UR e 0,3 ricambi orari (UNI TS 11300)

Per maggiori dettagli sulla definizione degli edifici, si rimanda alla consultazione diretta dei file *.bui forniti in allegato al presente lavoro.

5. Calcolo delle variabili edificio A, B, C

A partire dalla definizione dell'indice di severità climatica proposto nel documento ENEA:

$$\frac{E_T}{VT} = \left[U_{eq} \frac{S}{V} + \rho n c_p \right] \vartheta + \rho n r_0 X + \frac{\dot{S}_R}{V} \Gamma$$

è possibile individuare le espressioni per il calcolo delle caratteristiche dell'edificio:

$$A = U_{eq} \frac{S}{V} + \rho n c_p$$

$$B = \rho n r_0$$

$$C = \frac{\dot{S}_R}{V}$$

Calcolo della variabile edificio A

E' la caratteristica dell'edificio che comprende le perdite per trasmissione attraverso l'involucro e quelle sensibili dovute alla ventilazione.

Il primo termine $\left(U_{eq} \frac{S}{V} \right)$ dell'espressione in esame può essere ricavato direttamente dall'output QUA (NTYPE 27) di TRNSYS, la cui descrizione è di seguito riportata:

NTYPE 27: QUA static UA-transmission losses (UA*dT) of zone [kJ/hr]

Note: NTYPE 27 (static UA-transmission losses of walls + windows of zone) and NTYPE 46 do not use the transfer functions calculated by BID but instead uses the stationary u-values to calculate steady state transmission losses of walls and windows without considering any capacitance effects.

Noti dunque i valori dell'output QUA e della variabile climatica integrale ϑ (°C) per il periodo di condizionamento, è possibile ricavare direttamente:

Luca Rubini, Mario Di Veroli, Alfonso Calabria, Silvia Sangiorgio, Giuseppe Orsini, Marco Lavra, Giuseppe Habib

$$U_{\text{eff}} \frac{S}{V} = \frac{1}{V} \cdot \frac{QUA}{\phi} \frac{kJ}{hr m^3 K}.$$

Si noti inoltre che, una volta fissato il numero di ricambi orari per l'edificio in esame (ad esempio 0,3 ricambi/ora, come suggerito dalla UNI TS 11300), il secondo termine dell'espressione in oggetto sia una

costante, essendo la quantità $\rho n c_p$ pari a $1,2 \frac{kJ}{m^3 K}$:

$$\rho n c_p = 1,2 \frac{kJ}{m^3 K} \cdot 0,3 \frac{1}{hr} = 0,36 \frac{kJ}{hr m^3 K}.$$

Riassumendo, la variabile A per un edificio con un ricambio fisso d'aria pari a 0,3 ricambi/ora, può essere espressa come:

$$A = \left(\frac{1}{V} \cdot \frac{QUA}{\phi} + 0,36 \right) \frac{kJ}{hr m^3 K}.$$

N.B. Nel calcolare l'indice A dell'edificio mediante il software TRNSYS, per osservare il contributo imputabile esclusivamente alle perdite per trasmissione, si è effettuata una simulazione ad hoc, eliminando tutti i contributi esterni che avrebbero influenzato i risultati (radiazione solare, condizioni climatiche variabili, etc...).

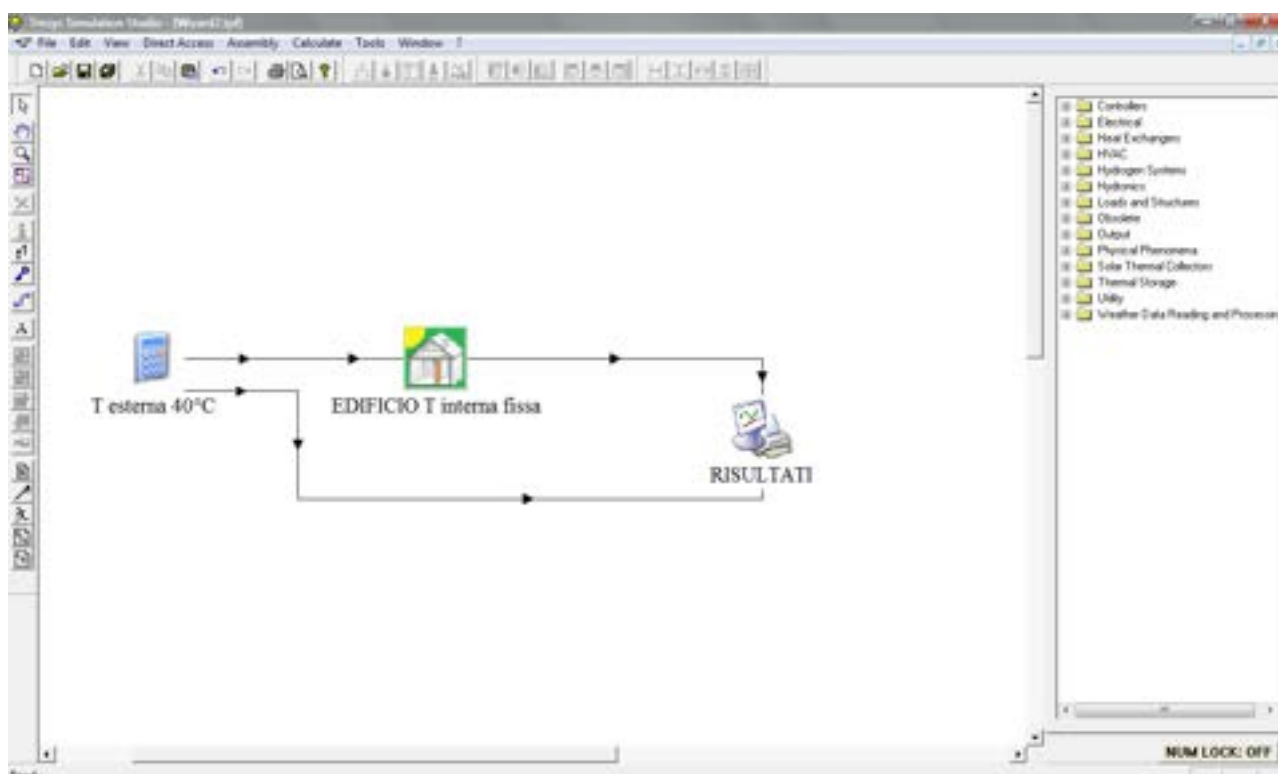


Figure 1

Si riportano di seguito i risultati ottenuti effettuando il calcolo del coefficiente A per i quattro edifici tipo, considerando i tre diversi livelli di isolamento termico.

Edificio	Non Isolato	Mediamente Isolato	Ben Isolato
Villetta Monofamiliare 1	3.24	1.84	1.22

piano			
Villetta Monofamiliare	3.15	1.79	1.21
2 piani			
Edificio in Linea	2.59	1.51	1.05
Edificio a Torre	2.00	1.21	0.87

Calcolo della variabile edificio B

E' la caratteristica che descrive le perdite latenti da imputare alla ventilazione dell'edificio, fissato il numero di ricambi d'aria pari a 0,3 ricambi/ora è immediato calcolare:

$$B = \rho n n_0 = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,3 \frac{1}{\text{hr}} \cdot 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 830 \frac{\text{kJ}}{\text{hr m}^3}$$

Con $n_0 = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, entalpia di vaporizzazione dell'acqua a 0°C.

Come già espresso in precedenza, l'umidità nel caso di trattamento dell'aria per il condizionamento estivo, è un parametro che non viene "regolato" direttamente: per quanto riguarda il controllo del confort ambientale di un ambiente, le tecnologie largamente utilizzate prevedono una regolazione controllata mediante termostato (regolazione in temperatura). Il trattamento dell'umidità dell'aria, pur incidendo in modo significativo, non risulta secondo lo stato dell'arte delle tecnologie per il condizionamento dell'aria, il parametro che condiziona il periodo di condizionamento di un edificio. La sua importanza dovrebbe essere perciò considerata soltanto a livello integrale a valle della determinazione del periodo di condizionamento.

Si presuppone, nel seguito della trattazione qui esposta, che il parametro da valutare sia quindi la richiesta di calore sensibile dell'ambiente da climatizzare, considerando il trattamento dell'umidità una variabile dipendente dalle altre due che maggiormente condizionano il comportamento *termico* dell'edificio (quindi il calore sensibile).

Calcolo della variabile edificio C

E' la caratteristica dell'edificio che tiene conto degli apporti solari (assorbimento da parte di superfici opache e "guadagno" attraverso le superfici trasparenti), il cui segno è positivo o negativo a seconda che si stia considerando il caso di riscaldamento invernale o condizionamento estivo.

Per il calcolo del coefficiente C si considera di sottoporre l'edificio in esame al solo input energetico dovuto alla radiazione solare. Per far questo si simula nel programma di calcolo un edificio con la temperatura esterna pari alla temperatura interna.

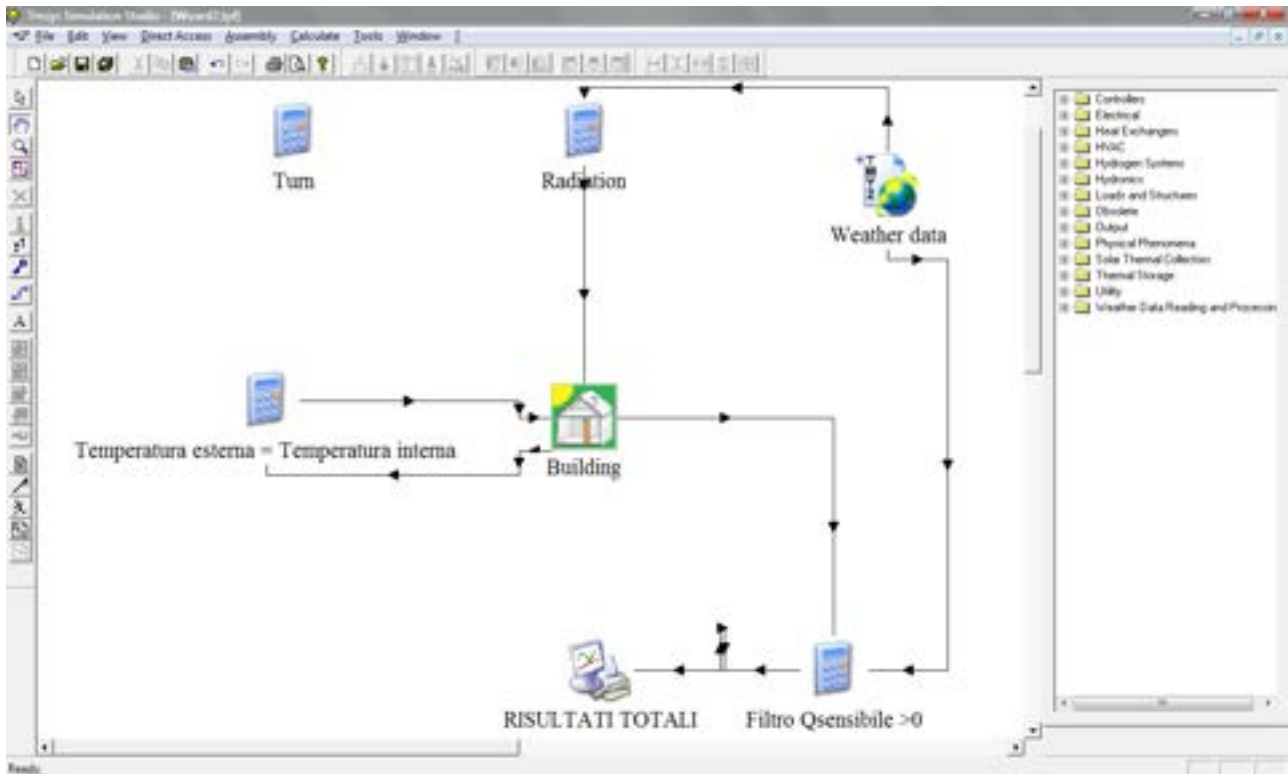


Figure 2

Il parametro preso in considerazione per il calcolo del fabbisogno energetico dovuto all'irraggiamento per il condizionamento dell'edificio è il calore sensibile per il raffreddamento ($Q_{sens} > 0$).

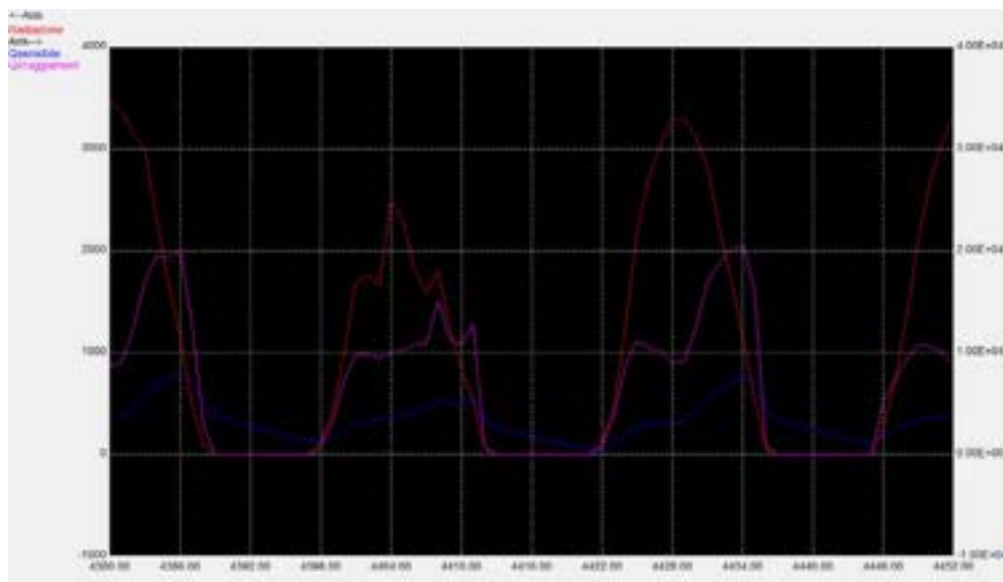


Figure 3

Come si vede nel grafico sopra riportato, il calore sensibile risente dell'inerzia dell'edificio essendo leggermente sfasato nel tempo rispetto all'irraggiamento.

Noto l'apporto solare e la variabile climatica integrale I ($\text{kJ/m}^2\text{hr}$) per il periodo di condizionamento, è possibile ricavare direttamente il valore della variabile C :

$$C = \frac{S_R}{V} = \frac{1}{V} \cdot \frac{Q_{SenT} \text{ m}^3}{F \text{ m}^3}$$

Lo scopo del progetto di ricerca in corso è verificare mediante un numero cospicuo di simulazioni se sia possibile individuare un valore medio per l'intero territorio nazionale, o se sia necessario dividere il territorio in sottozone per ottenere valori del parametro più puntuali.

Si riportano di seguito alcuni dei risultati ottenuti effettuando il calcolo del coefficiente C per un edificio in tre località tipo, considerando quattro diversi orientamenti dell'edificio stesso (edificio ruotato rispetto al sud di volta in volta di 90°).

Località	Orientamento 1	Orientamento 2	Orientamento 3	Orientamento 4
Palermo	0.008669	0.008154	0.012255	0.009124
Roma	0.008826	0.008467	0.012348	0.009336
Milano	0.008545	0.008573	0.012794	0.009584

La variazione del parametro C considerata per un singolo edificio in tre località tipo situate al nord, al centro ed al sud Italia mostra come esista una variazione minima tra centro-sud e nord, ma le variazioni più sensibili vengono riscontrate al variare dell'orientamento dell'edificio. Per dare un'idea dell'effetto della rotazione si consideri che l'edificio nel primo orientamento ha il 30 % delle superfici nord ed ovest vetrate, e solo il 10 % delle superfici sud e est. Mentre nell'orientamento 3 il contrario.

Di seguito viene invece effettuato il confronto per la stessa tipologia edilizia con lo stesso orientamento ma con diversi tipi di isolamento.

Località	Bene isolato	Mediamente isolato	Non isolato
Palermo	0.008669	0.007765	0.007255
Roma	0.008826	0.007794	0.007231
Milano	0.008545	0.006780	0.006504

La tabella evidenzia come effettivamente ci sia, per un edificio poco isolato, maggiore differenza a seconda della località. Ma la differenza resta comunque minore rispetto a quella che si ha per un edificio diversamente isolato anche nella stessa località. Un risultato analogo è stato ottenuto confrontando altre località e tipologie edilizie (non mostrato in questo documento, ma verificabile tramite il file allegato contenente il parametro C per ogni simulazione).

Alla luce di questi risultati possiamo concludere che conviene utilizzare lo stesso parametro C per tutto il territorio nazionale, in quanto il parametro dipende molto più dall'edificio piuttosto che dalla località.

6. Modello e Simulazioni

Uno degli obiettivi del progetto di ricerca è individuare un metodo per poter valutare in ogni località il periodo di condizionamento estivo, per poter quindi effettuare un'integrazione in quel periodo delle grandezze climatiche di interesse. Tramite le simulazioni effettuate mediante il software dedicato si vuole mettere a punto una metodologia di normalizzazione dei consumi e degli intervalli di richiesta energetica che permettano di uniformare per ogni località il periodo di raffrescamento al variare del tipo di edificio in considerazione.

Lettura dei risultati

Luca Rubini, Mario Di Veroli, Alfonso Calabria, Silvia Sangiorgio, Giuseppe Orsini, Marco Lavra, Giuseppe Habib

Considerata la notevole mole di dati ottenuti dalle simulazioni, si è deciso di organizzarle secondo un codice.

Ogni file è definito da un nome di 7 caratteri, nel dettaglio:

- Primo carattere: A, B, C o D. Questa lettera (maiuscola) indica la tipologia di edificio.
 - A. Villetta monofamiliare a un piano
 - B. Villetta monofamiliare a due piani
 - C. Edificio in linea
 - D. Edificio a torre
- Secondo carattere: a, b o m. Questa lettera (minuscola) indica la tipologia di involucro dell'edificio.
 - a. Edificio bene isolato (alto isolamento)
 - b. Edificio non isolato (basso isolamento)
 - m. Edificio mediamente isolato
- Terzo e quarto carattere: numero da 01 a 20 indica la località considerata.
 - 1. Agrigento
 - 2. Palermo
 - 3. Alghero
 - 4. Bari
 - 5. Caserta
 - 6. Campobasso
 - 7. Gorizia
 - 8. Roma
 - 9. Lucca
 - 10. Pesaro
 - 11. Perugia
 - 12. Milano
 - 13. Ancona
 - 14. Foggia
 - 15. Trento

16. Torino

17. Aosta

18. Cuneo

19. Vicenza

20. Cagliari

- Quinto, senso e settimo carattere: 000, 090, 180 o 270 indicano la rotazione in gradi imposta all'edificio con ovvio significato delle tre cifre.

Es. Cm08180: Edificio in linea mediamente isolato, a Roma, ruotato di 180 gradi.

Per ogni simulazione sono stati forniti sia i dati orari (i file relativi hanno tre caratteri addizionali "TOT") che i dati giornalieri di più facile lettura. Tutti i file sono nel formato *.csv, facilmente consultabili con Microsoft Excel o altri lettori di testo.

I file con i risultati orari sono stati forniti direttamente da TRNSYS in output. Sono organizzati in colonne divise da tabulazioni, le colonne indicano nell'ordine: ora dell'anno, temperatura esterna, temperatura interna, umidità [kg di vapore su kg di aria secca], irraggiamento [$\text{kJ/ora}\cdot\text{m}^2$] e calore sensibile [kJ/ora] (un valore negativo indica un riscaldamento, mentre un valore positivo indica raffrescamento).

I file con i risultati giornalieri sono strutturati in maniera simile a quelli orari e forniscono esattamente gli stessi dati con medie giornaliere. Le diverse colonne sono però separate dal *punto e virgola* ";".

Vengono poi forniti altri file dove vengono raggruppati i risultati giornalieri in modo da permettere un confronto immediato dei risultati. In particolare sono stati raggruppati:

- Loc01.csv-Loc20.csv: per ogni località è fornito il calore sensibile per ogni combinazione di edificio, con valori normalizzati rispetto al volume lordo dell'edificio stesso.
- Clima loc 01.csv-20.csv: per ogni combinazione località-edificio sono forniti i valori integrali di differenza di temperatura esterno-interno, irraggiamento e umidità nel periodo di condizionamento. In altre parole in questi file c'è la somma di differenza di temperatura, irraggiamento e umidità per tutte le ore in cui il calore sensibile era maggiore di zero durante la simulazione. C'è inoltre il conto delle ore di funzionamento.
- Clima ed Aa000.csv-Db270: questi file sono simili ai "clima loc 01.csv", ma raggruppati per edifici.
- Inver loc 01.csv-20.csv: questi file sono analoghi ai "clima loc 01.csv", ma per il riscaldamento.
- Caratteristica C.csv: per ogni edificio in ogni località è fornito il valore del parametro C.

Il calore sensibile, il principale output fornito nelle simulazioni, è definito così nel help di TRNSYS:

QSENS: sensible energy demand, heating (-), cooling (+) [kJ/hr]

Il **calore sensibile**, che solitamente prevale su quello latente, è la somma degli apporti di calore che hanno come unico effetto l'aumento della temperatura; proviene dall'esterno per effetto della radiazione solare, della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e quello interno (trasmissione per conduzione

attraverso le strutture) ed anche per effetto dei cosiddetti carichi interni, quali, ad esempio, le persone ed eventuali sorgenti di calore (illuminazione, macchine, motori, ecc.).

Il **calore latente**, invece, è la somma degli apporti che concorrono ad aumentare il contenuto di vapore presente nell'aria, quindi dell'umidità, senza per questo aumentare la temperatura; il calore latente ambiente deriva dall'apporto di vapore delle persone (attraverso la respirazione e la traspirazione) e da altre fonti che producono vapore (come, ad esempio, la cottura dei cibi o l'utilizzo dell'asciugabiancheria). L'aria di rinnovo proveniente dall'esterno apporta a sua volta calore sensibile, in forza della sua temperatura più elevata rispetto a quella ambiente, e calore latente in virtù del suo contenuto di vapore.

Analisi dei risultati

Da una prima analisi grafica dei risultati sono state ottenute diverse indicazioni, sia riguardo la validità dei risultati, sia altre conclusioni utili a capire la reale fattibilità di un indice di severità climatica, nonché a quali parametri dare più importanza.

Nel seguente paragrafo vengono di volta in volta mostrati grafici per evidenziare determinati risultati. Abbiamo preferito non mostrare con più di un esempio ogni fenomeno per evitare di appesantire troppo il presente documento. Tutti i grafici sono stati ricavati dai dati forniti in allegato. Sono pertanto riproducibili per ogni diversa simulazione.

I seguenti grafici (Figure 4-6) mettono a confronto il calore sensibile per lo stesso edificio nella stessa località ruotato di volta in volta di 90 gradi. Nel particolare si tratta dell'edificio A (villetta monofamiliare ad un piano) bene isolato (Figura 4), mediamente isolato (Figura 5) e non isolato (Figura 6). Le simulazioni relative sono: Aa08000-Aa08270, Am08000-Am08270 e Ab08000-Ab08270.

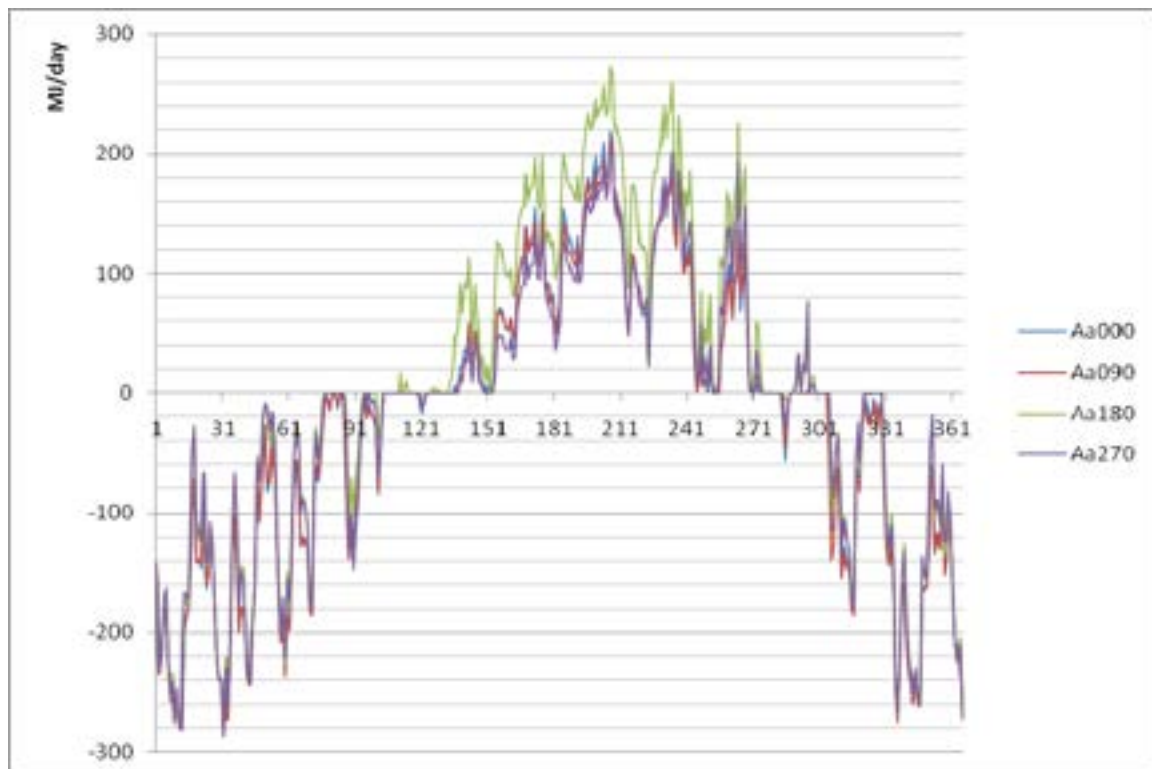


Figure 4

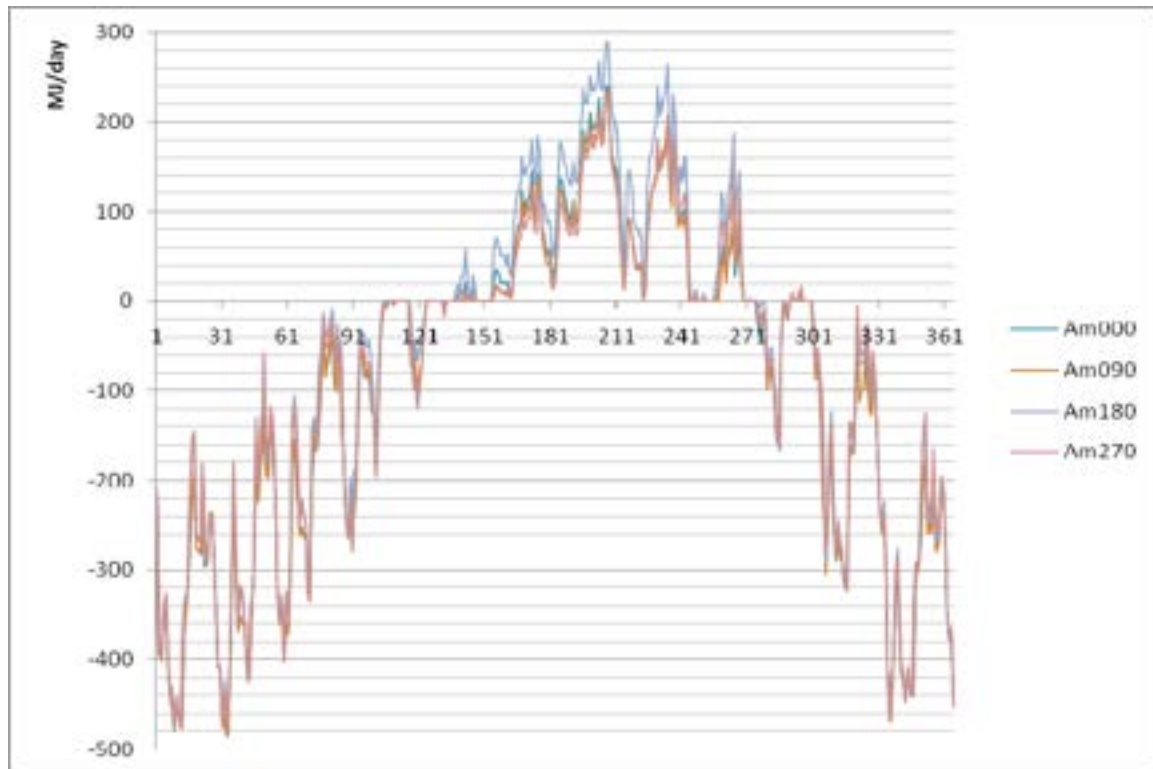


Figure 5

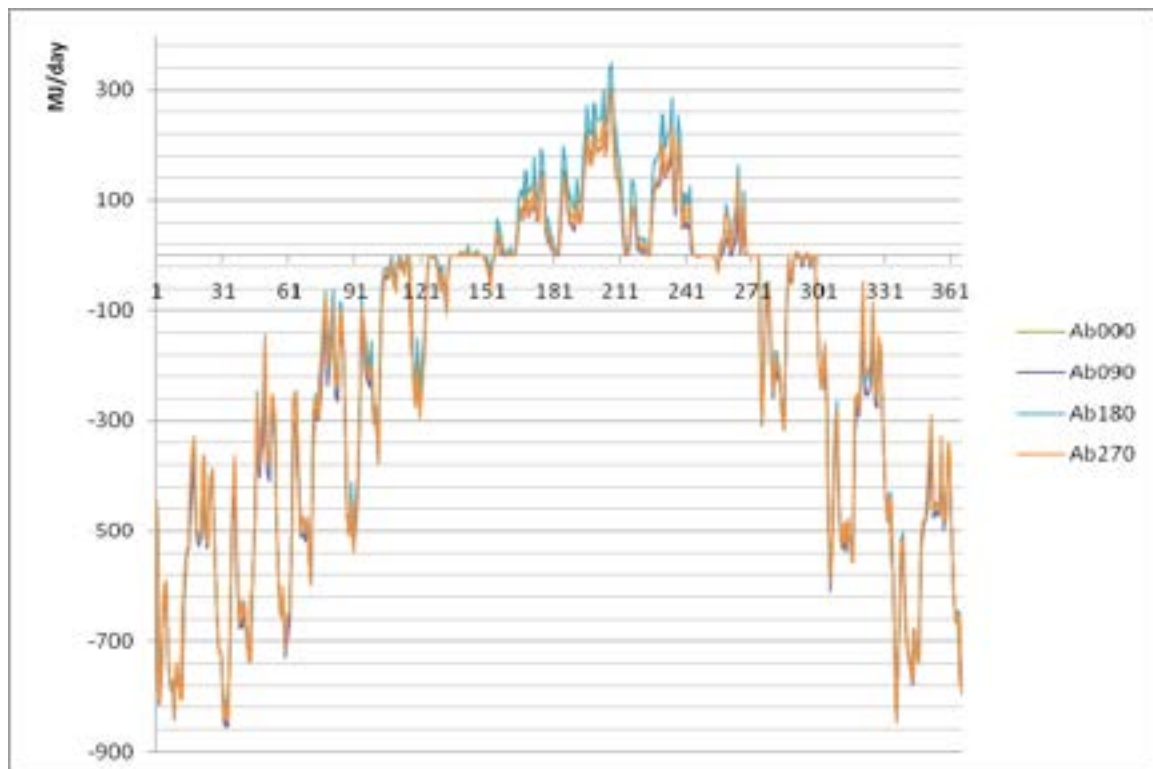


Figure 6

La rotazione dell'edificio serve a simulare una diversa disposizione delle finestre. In tutti e tre i casi la configurazione più *energivora* è quella con rotazione a 180 gradi, cioè con pareti vetrate al 30% a sud e a est, e al 10% a nord e a ovest. Questo risultato era perfettamente prevedibile. Lo stesso risultato è stato confermato in altri edifici e altre località.

Luca Rubini, Mario Di Veroli, Alfonso Calabria, Silvia Sangiorgio, Giuseppe Orsini, Marco Lavra, Giuseppe Habib

Dai grafici si vede anche come l'effetto della rotazione sia apprezzabile solamente in estate per l'irraggiamento, che è decisamente secondario in inverno. Anche questo risultato non rappresenta niente di inaspettato, ma conferma la validità dei risultati.

È invece interessante notare come per l'edificio non isolato (Figura 6) l'effetto della rotazione sia quasi trascurabile anche in estate, mentre con un buon isolamento incida sensibilmente. Confrontando i valori del parametro C, rappresentativo dell'incidenza dell'irraggiamento nella simulazione, si conferma quanto appena detto. Infatti la media del parametro C per le quattro simulazioni in ogni grafico è rispettivamente 0.00974 per l'edificio Aa, 0.00802 per l'edificio Am e 0.0072 per l'edificio Ab. La giustificazione si trova nella differente inerzia termica dell'edificio causata dall'isolamento, infatti per un edificio poco isolato la temperatura esterna incide molto di più che per un edificio bene isolato, per il quale invece il parametro fondamentale è l'irraggiamento.

Dalla Figura 4 si vede la differenza del periodo di condizionamento a seconda della rotazione: con una disposizione sfavorevole delle superfici vetrate i giorni dal 130-esimo al 150-esimo (seconda metà di maggio) indicano già una notevole necessità energetica per il raffrescamento, mentre con una disposizione più favorevole il periodo più critico inizia da giugno.

Il grafico in figura 7 mette a confronto le necessità energetiche per lo stesso edificio, orientato nel medesimo modo, ma con diversi livelli di isolamento. In particolare il grafico si riferisce all'edificio A situato a Roma (simulazioni Aa08000, Am08000 e Ab08000).

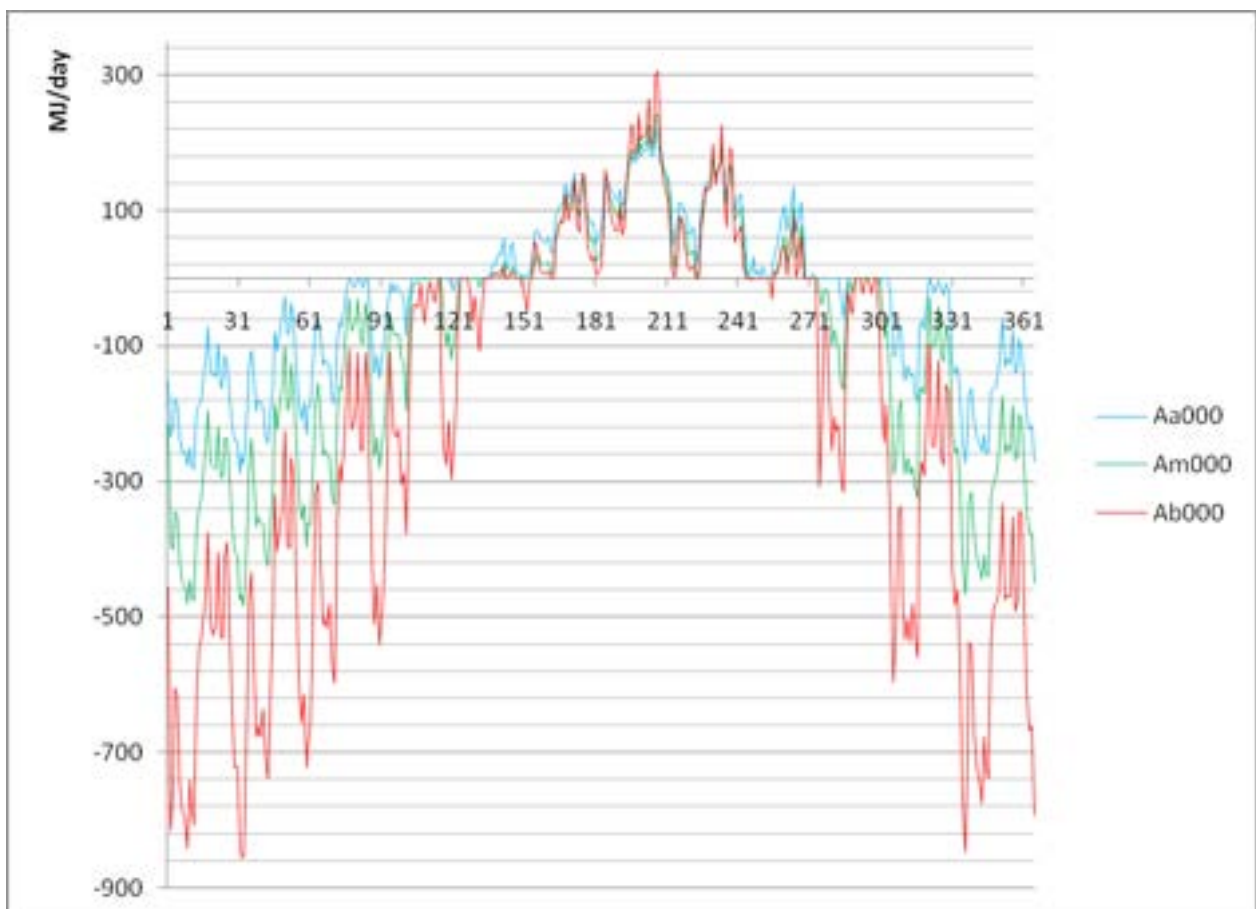


Figure 7

Tralasciando il periodo invernale, dove è evidente l'effetto per la differenza fra le diverse tipologie di involucro, per quanto riguarda il periodo estivo viene mostrato nel grafico un risultato inaspettato. L'edificio non isolato presenta una maggiore richiesta energetica nei mesi di picco (luglio e agosto) caratterizzati da alto irraggiamento e alta temperatura, mentre nei mesi primaverili, in particolare a maggio (giorni 120-151), non richiede per niente raffrescamento, mentre l'edificio bene isolato ne richiede. Questo fatto è giustificabile considerando che nei mesi preestivi la temperatura media è spesso inferiore alla temperatura di benessere, mentre la necessità di raffrescamento è dovuta ad un irraggiamento già considerevole. Quindi sia gli edifici bene isolati che quelli non isolati hanno subito in modo simile l'irraggiamento, ma gli edifici poco isolati hanno beneficiato anche dell'effetto naturale di raffrescamento dovuto alla temperatura esterna minore di quella interna. Il grafico in figura 8, relativo allo stesso edificio, sempre a Roma, ma ruotato di 180° (quindi più critico dal punto di vista dell'irraggiamento) evidenzia ancora di più questo effetto, presente anche ad ottobre (giorni 290-300), ma più attenuato.

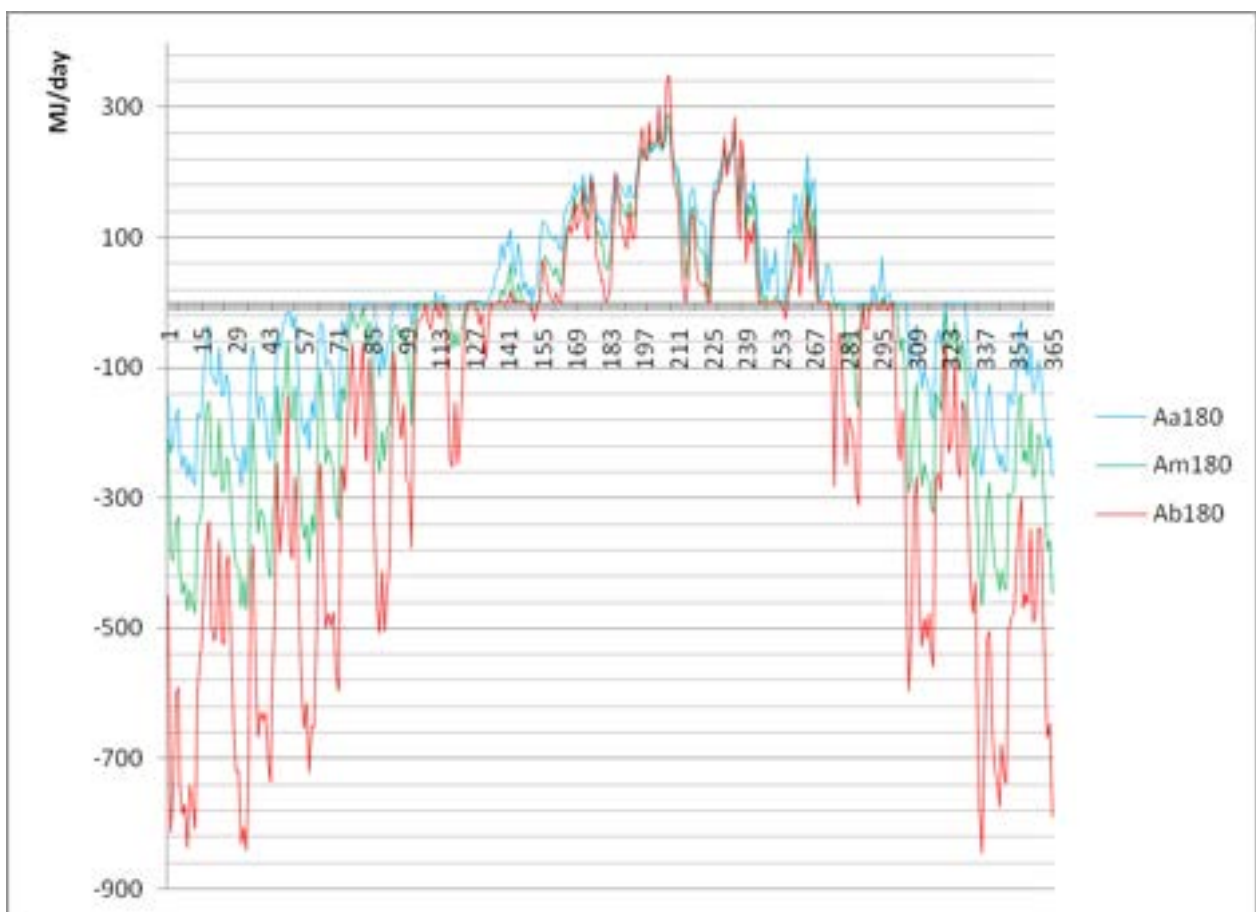


Figure 8

Questa osservazione è verificabile confrontando i valori di differenza di temperatura (figure 9). Si vede infatti come nei giorni 120-151 la temperatura media sia intorno ai 20-22 °C.

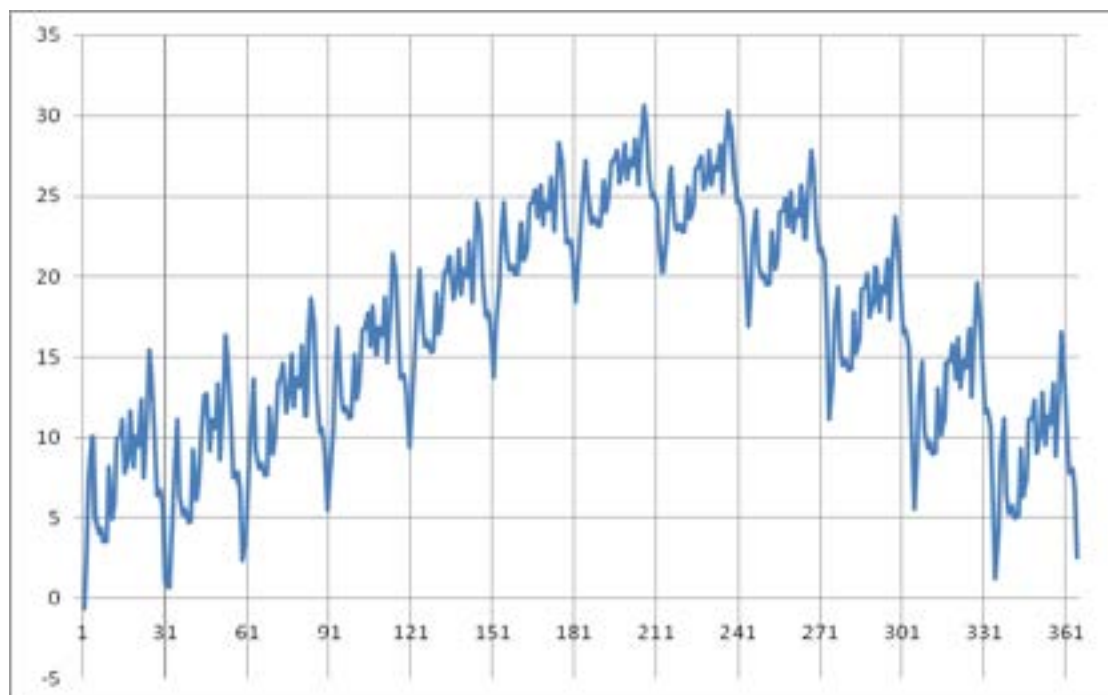


Figure 9

edificio	integrale delta T	integrale irraggiamento	ore condizionamento
Aa000	4329.1	3.12E+06	2442
Aa090	4328.36	3.27E+06	2457
Aa180	4347.58	3.78E+06	2965
Aa270	4327.09	3.12E+06	2455
Ab000	3957.34	1.87E+06	1403
Ab090	3865.61	2.10E+06	1431
Ab180	4086.47	2.55E+06	1730
Ab270	3974.37	1.88E+06	1394
Am000	4183.42	2.54E+06	1864
Am090	4143.15	2.70E+06	1857
Am180	4301.02	3.16E+06	2234
Am270	4172.8	2.46E+06	1803

La tabella mostra i valori della somma di differenza di temperatura e di irraggiamento aggregati sulle ore di condizionamento (la tabella si riferisce a Roma). Si vede come migliore sia l'isolamento e maggiore siano le ore di condizionamento, come spiegato prima. Le maggiori ore di condizionamento influenzano gli altri risultati, poichè gli integrali sono stati fatti su un intervallo temporale maggiore. Considerato questo si può notare come la differenza dei valori fra gli edifici con buon isolamento (Aa) e con cattivo isolamento (Ab) sia molto maggiore per l'irraggiamento che non per la temperatura. Questo avvalorata la tesi che, nelle simulazioni, per gli edifici ben coibentati l'irraggiamento ha avuto un ruolo primario rispetto alla temperatura media.

Analizzando le diverse ore di condizionamento per i vari edifici si nota come il cambiamento di orientamento influenzi le ore di condizionamento meno del 20% (le ore di condizionamento per Aa000 sono il 18% minori di quelle per Aa180), mentre un cambio di coibentazione, da Aa ad Ab, porta un calo

delle ore di funzionamento del 42%. Questo risultato non deve far pensare ad un aumento così considerevole della *stagione* di raffrescamento, che non ha un andamento lineare con le ore di funzionamento (soprattutto per gli edifici poco coibentati c'è spesso uno spegnimento notturno del condizionatore che non è presente negli edifici coibentati meglio, dove la temperatura esterna è meno critica). Confrontando invece l'edificio Aa180 con Ab270 (il caso più critico) la differenza è addirittura del 52%, valore simile a quello ottenuto più avanti in questo documento confrontando le ore di funzionamento per lo stesso edificio a Palermo e a Gorizia.

Nel grafico in figura 10 è mostrato il diverso andamento della necessità energetica a Roma, a Palermo e a Gorizia dello stesso edificio con il medesimo orientamento e involucro. Nello specifico le simulazioni riguardano un edificio in linea, bene isolato non ruotato (simulazioni Ca08000, Ca02000 e Ca07000).

I grafici nelle figure 11, 12 e 13 mostrano invece il valore di irraggiamento giornaliero, la temperatura media e l'umidità per le tre località.

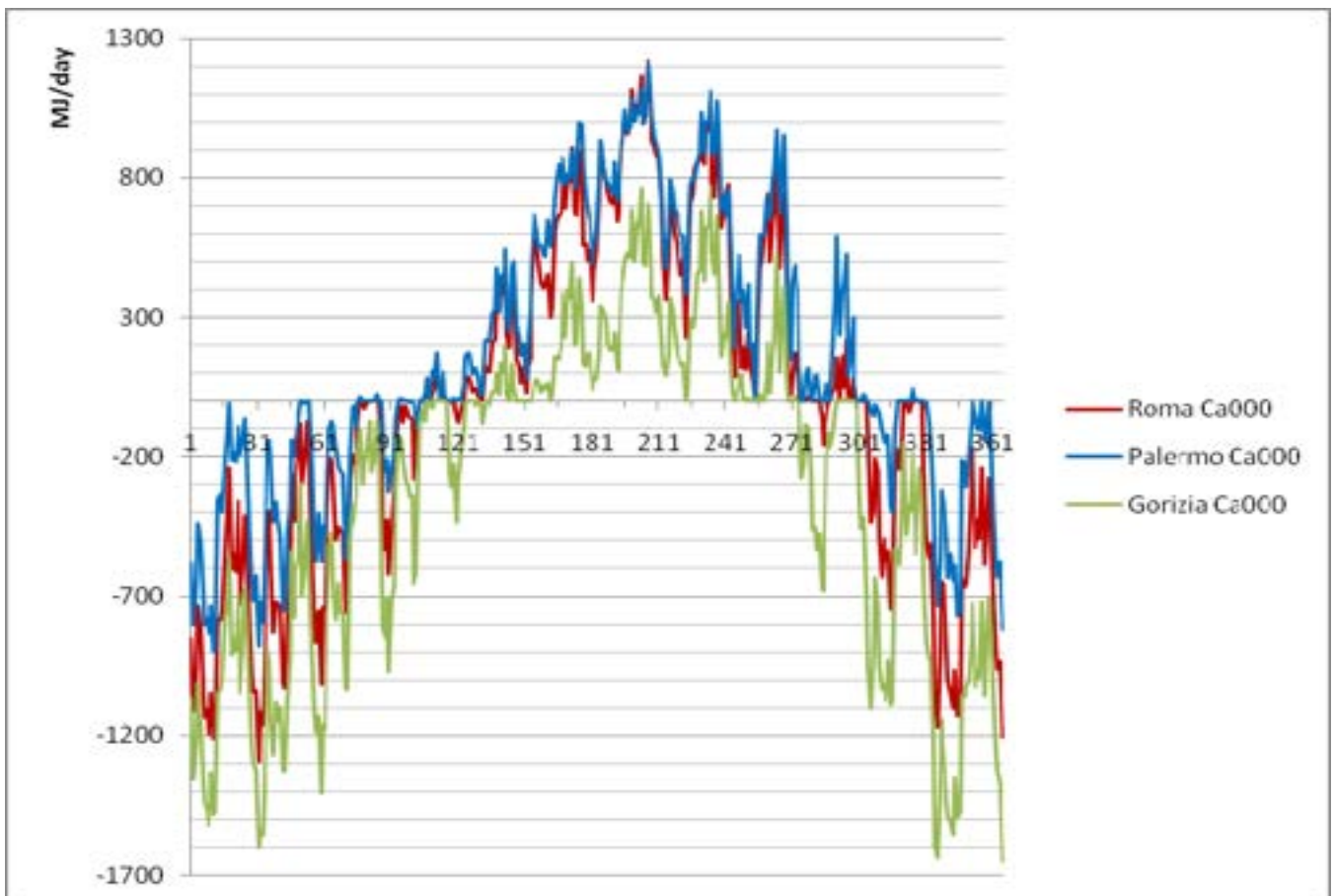


Figure 10

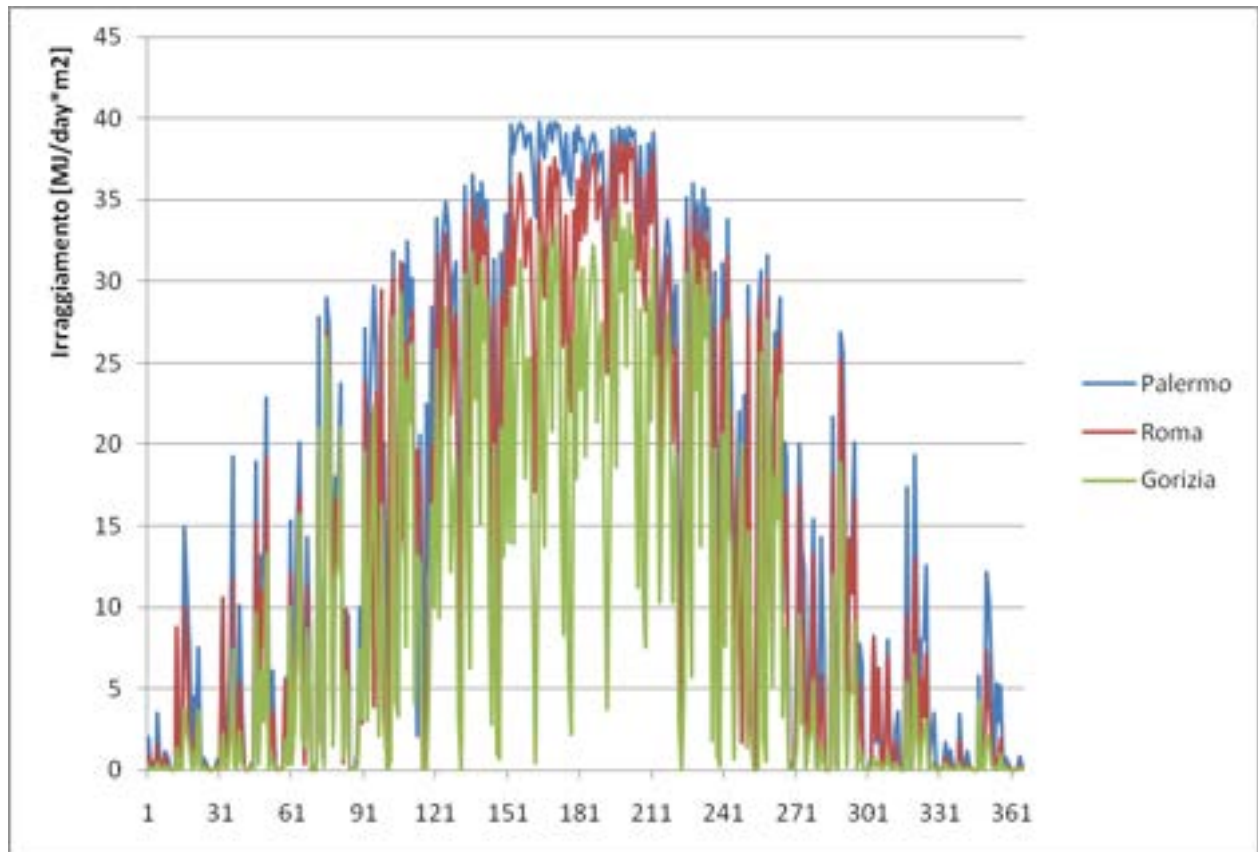


Figure 11

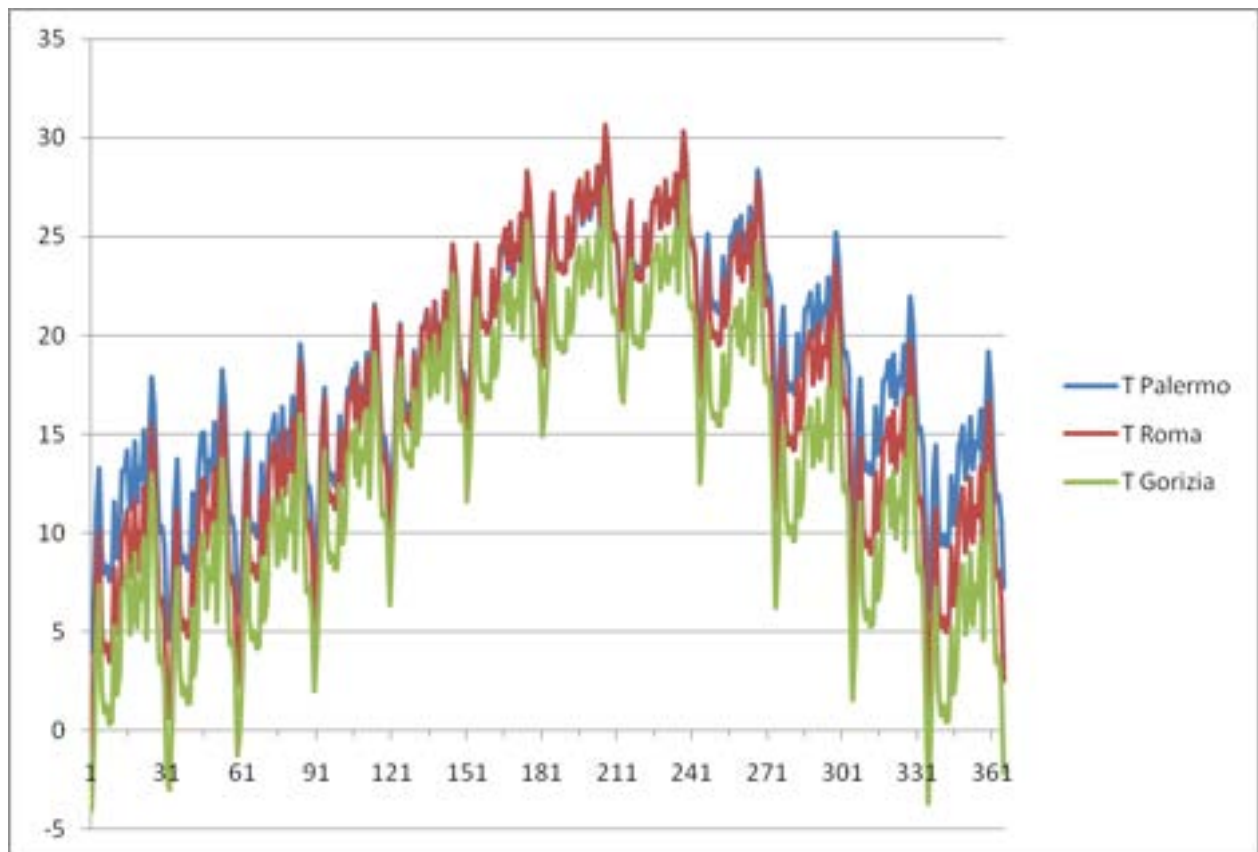


Figure 12

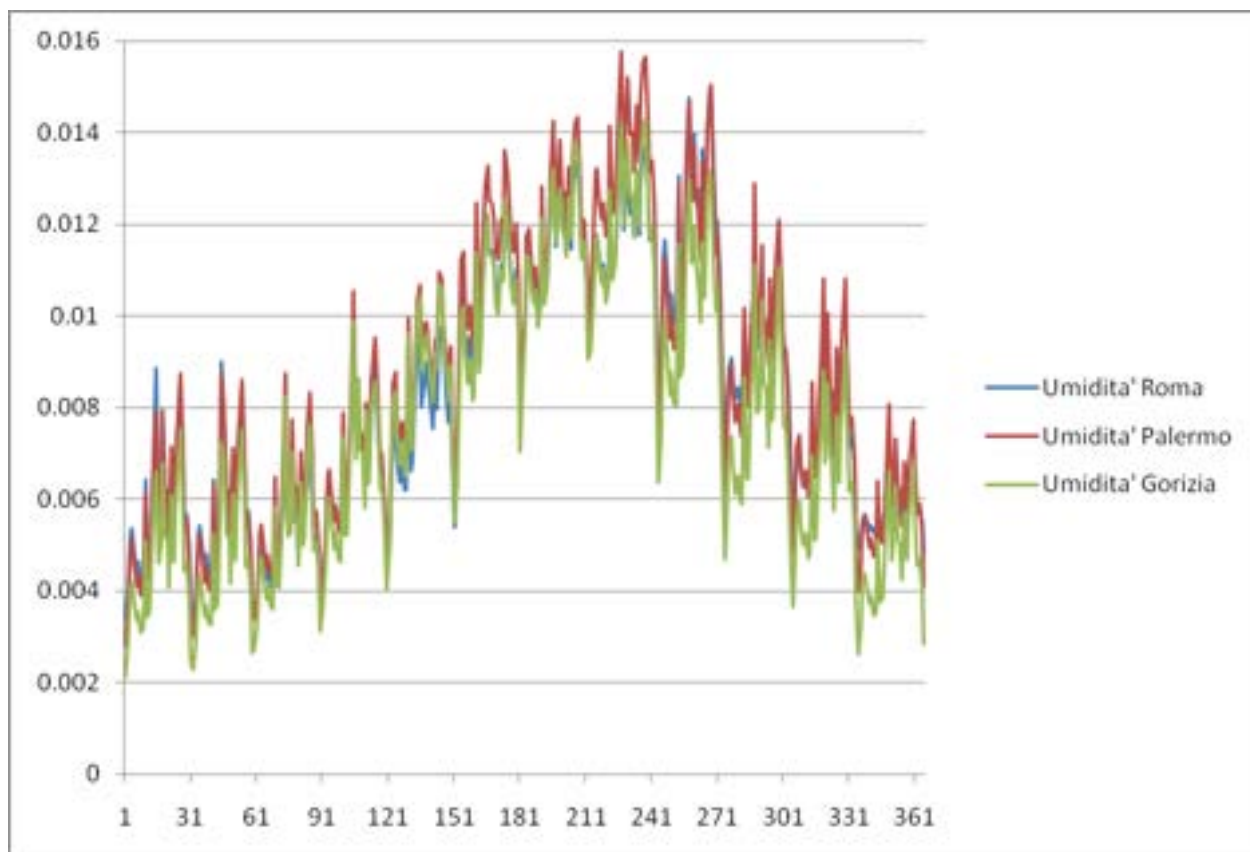


Figure 13

Intuitivamente, guardando i grafici, si comprende come la diversa richiesta energetica per il raffrescamento sia influenzata da irraggiamento e temperatura esterna, mentre non è altrettanto intuitiva la lettura del grafico relativo all'umidità.

L'analisi di questi grafici non permette però di valutare il peso dei due parametri o altre indicazioni. Lasciamo quindi questi grafici con il solo scopo di mostrare quanto disponibile nel dettaglio nei file forniti.

La seguente tabella mostra i valori aggregati di differenza di temperatura esterna-interna e irraggiamento integrati sulle ore di condizionamento (per l'edificio Ca000).

localita'	integrale delta T	integrale irraggiamento	ore condizionamento
Palermo	4834.24	4.43E+06	3321
Gorizia	923.013	1.82E+06	1543
Roma	4350.84	3.59E+06	2865

Dalla tabella si vede il maggior numero di ore di condizionamento richieste per Palermo rispetto a Roma e Gorizia. Nello specifico le ore di condizionamento a Gorizia sono il 54% meno di quelle a Palermo. Questo, considerato che le ore di condizionamento non rispecchiano esattamente la stagione di condizionamento, è comunque un risultato che evidenzia la necessità di regolamentare il periodo di utilizzo.

La seguente tabella mostra invece gli stessi valori, normalizzati sulle ore di funzionamento.

localita'	integrale delta T	integrale irraggiamento
-----------	-------------------	-------------------------

Palermo	1.455657934	1333.03523
Gorizia	0.598193778	1178.295528
Roma	1.518617801	1251.877836

Da quest'ultima tabella è visibile come per Gorizia l'irraggiamento sia nettamente predominante rispetto alla temperatura esterna se confrontato con Roma e Palermo.

Il grafico in figura 14 mostra l'andamento orario del calore sensibile confrontato con il l'energia utilizzata per la deumidificazione. Il grafico si riferisce all'edificio A altamente coibentato ad Agrigento, con orientamento 000 (simulazione Aa01000).

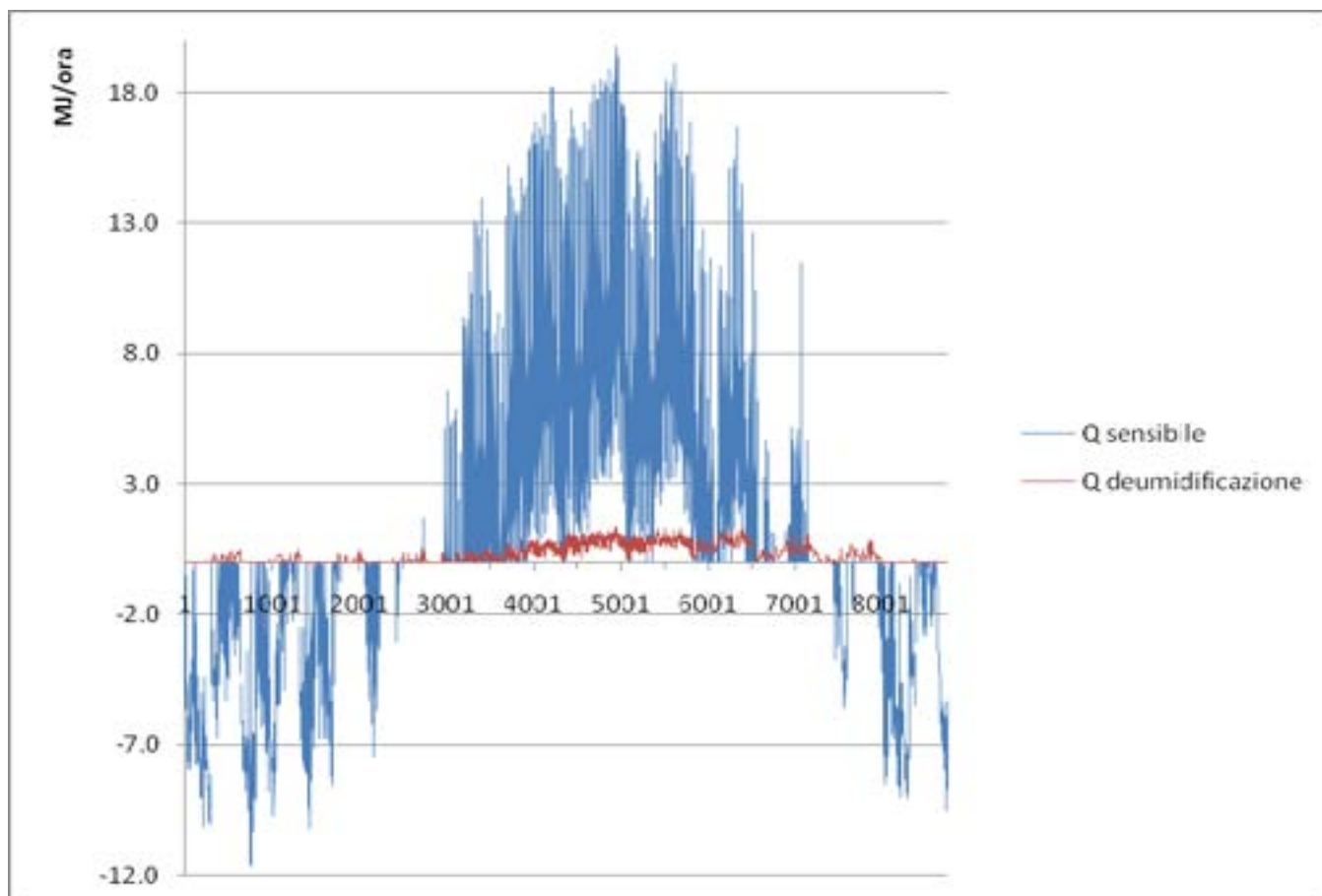


Figure 14

Dal grafico si può apprezzare la bassa incidenza della deumidificazione rispetto all'energia utilizzata per il raffrescamento. È stato scelto di utilizzare i valori orari per far vedere lo sfasamento fra deumidificazione e raffrescamento (si rimanda alla trattazione del parametro C per le considerazioni relative a tale andamento). È apprezzabile in particolare intorno alle ore 7000 (ottobre). Nel valutare il grafico si consideri che Agrigento è una località marinara, nonchè estremamente torrida rispetto al clima "medio" in Italia.