



Ricerca di Sistema elettrico

Applicazione del modello di calcolo ad un caso reale e relative valutazioni energetiche

G. Fasano, F. Margiotta, G. Puglisi

APPLICAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO AD UN CASO REALE E RELATIVE VALUTAZIONI ENERGETICHE

G. Fasano, F. Margiotta, G. Puglisi

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso ufficio e scuole, Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano

Indice

APPLICAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO AD UN CASO REALE E RELATIVE VALUTAZIONI ENERGETICHE	1
SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 CASO STUDIO: EDIFICIO F51- ENEA - C.R.CASACCIA	5
2.1 CARATTERISTICHE TIPOLOGICHE, DIMENSIONALI E COSTRUTTIVE DEL SISTEMA EDIFICIO	5
2.2 CARATTERISTICHE TIPOLOGICHE, DIMENSIONALI E COSTRUTTIVE DELL'IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE.....	11
2.3 VALUTAZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI DELL'EDIFICIO F51 SECONDO IL MODELLO DI CALCOLO R5C1	13
2.4 CONFRONTO	16
3 CONCLUSIONI.....	19
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	19

Sommario

Lo studio e la definizione del comportamento termofisico di un edificio risultano alquanto complessi a causa della variabilità delle condizioni ambientali, che rendono, di non semplice valutazione, i fenomeni che avvengono negli scambi termici tra l'edificio e l'ambiente in una condizione di transitorio continuo.

Motivo, questo, da cui nasce la necessità di considerare una metodologia di calcolo dinamico che, nella definizione del fabbisogno termico dell'edificio, tenga conto delle caratteristiche dinamiche di scambio termico, tra interno ed esterno, degli elementi costruttivi e costitutivi del l'involucro.

Il modello implementato dall'Università di Catania (R5C1), è stato sviluppato per poter rispondere a tali esigenze e poter essere quindi utilizzato per calcolare correttamente i consumi energetici per uno o più periodi dell'anno e anche per l'intero anno mediante sequenze giornaliere multiple.

Lo strumento realizzato, infatti, implementando il metodo di calcolo orario, può essere utilizzato per l'analisi dinamica dei carichi termici in qualsivoglia condizione di calcolo (sia estiva che invernale), oltre che il calcolo dei consumi energetici stagionali.

Obiettivo finale è quello di valutare se la metodologia di calcolo implementata per l'eventuale certificazione dinamica degli edifici sia in grado di fornire delle informazioni sui consumi energetici più vicini al comportamento reale degli edifici rispetto a quelle fornite da metodologie di calcolo in regime stazionario.

Per effettuare tale confronto è stato scelto un edificio, del terziario, presente all'interno del Centro di Ricerca della Casaccia (Roma), adibito ad uffici (F - 51) in quanto dello stesso si dispone di alcuni dati relativi ai consumi energetici, ottenuti da campagne di misura, oggetto di altre attività, e che risulta essere rappresentativo per gli edifici con questa destinazione d'uso. Applicando la metodologia e il modello di calcolo sono state effettuate delle valutazioni che hanno dato risultati che dimostrano la validità del metodo.

1 Introduzione

Come previsto dalle attività di Ricerca del Piano Annuale di Realizzazione (PAR), l'Università di Catania ha implementato, in formato Excel, uno strumento di simulazione che si basa sulla implementazione del modello di calcolo orario semplificato a cinque resistenze e una capacità, R5C1, proposto nella Norma Internazionale UNI EN 13790:2008 completato con l'equazione di bilancio termico del calore latente.

In questo modo è possibile effettuare il calcolo del bilancio energetico di un edificio tenendo conto del calore totale (sensibile più latente) scambiato, dei profili di utilizzo orari, dell'andamento orario delle variabili climatiche (temperatura, radiazione e umidità). L'obiettivo finale è mettere a punto un algoritmo di calcolo da utilizzare per la certificazione dinamica degli edifici che sia più aderente alle condizioni di reale utilizzo di un edificio, di quanto facciano i metodi di calcolo tradizionali (stazionari) oggi comunemente utilizzati per la certificazione energetica.

Lo strumento realizzato, infatti, implementando il metodo di calcolo orario, può essere utilizzato per l'analisi dinamica dei carichi termici in qual si voglia condizione di calcolo (sia estiva che invernale), per uno o più periodi dell'anno e anche per l'intero anno, mediante sequenze giornaliere multiple e oltre che per stimare i consumi energetici.

Tale aspetto è da evidenziare in quanto differenzia sostanzialmente tale approccio da quello utilizzato per i metodi di calcolo stazionari che non possono dare informazioni sui reali consumi dell'edificio in quanto prevedono il calcolo delle prestazioni energetiche in condizioni standard di utilizzo (e quindi distanti da quelle reali).

Obiettivo del presente lavoro è quella di valutare quanto la metodologia di calcolo implementata sia in grado di fornire delle informazioni sui consumi energetici reali degli edifici, per cui è stata effettuata una comparazione fra i risultati forniti dal metodo R5C1 e i consumi termici misurati di un edificio.

Per effettuare tale confronto è stato scelto un edificio del terziario, presente all'interno del Centro di Ricerca della Casaccia (Roma), adibito ad uffici (F - 51) in quanto dello stesso si dispone di alcuni dati relativi ai consumi energetici, ottenuti da campagne di misura oggetto di altre attività, e che risulta essere rappresentativo per gli edifici con questa destinazione d'uso. Applicando la metodologia e il modello di calcolo sono state effettuate delle valutazioni che hanno prodotto risultati che dimostrano la validità del metodo.

Nel proseguo è presentata la descrizione dell'edificio considerato e dell'impianto ad esso asservito, mentre non si forniscono informazioni sull'algoritmo di calcolo per cui si rimanda al rapporto tecnico redatto dall'Università di Catania RdS/PAR2014/077.

2 Caso studio: edificio F51- Enea - C.R.Casaccia

2.1 *Caratteristiche tipologiche, dimensionali e costruttive del sistema edificio*

Per il suddetto confronto è stato scelto l'edificio F-51; il fabbricato è ubicato nell'area Capanna, all'interno del Centro di Ricerca della Casaccia (Roma). L'edificio, con destinazione d'uso ad uffici, è stato realizzato tra il 1982 ed il 1983 per finalità sperimentali.



Figura 1: Ubicazione dell'edificio F51 e vista laterale

Infatti, dalla documentazione acquisita dagli archivi il contratto d'Appalto per la sua realizzazione, stipulato il 28 Maggio 1981, aveva per oggetto "... la realizzazione di un edificio sperimentale a forte coibentazione con elementi di solarizzazione attiva e passiva ...". La realizzazione complessiva dell'immobile comprendeva anche la realizzazione di sistemi di schermature esterne sugli infissi installati sul fronte Sud, con lo scopo di contenere il carico termico estivo limitandone la componente derivata dall'irraggiamento solare. Esso presenta una forma rettangolare e si articola su due piani, con una superficie calpestabile di circa 600 mq per piano.



Figura 2: Prospetto Nord



Figura 3: Prospetto Sud

L'edificio si sviluppa lungo l'asse est-ovest per una lunghezza di 48,21 mt, mentre lungo l'asse nord-sud per soli 12,21 mt, con un'altezza complessiva pari a 8 mt. In particolare, di seguito vengono riportate (Figura 4), sulla base delle caratteristiche dimensionali dell'edificio, le relative superfici, opache e trasparenti, indicate per orientamento verticale ed orizzontale.

PARETI NORD	Superficie Totale	m ²	385,68	PARETI SUD	Superficie Totale	m ²	385,68
	Superficie Opaca	m ²	279,44		Superficie Opaca	m ²	278,83
	Superficie Trasparente	m ²	106,24		Superficie Trasparente	m ²	106,85
	Sup. telaio	m ²	22,37		Sup. telaio	m ²	19,89
	Sup.vetro	m ²	83,87		Sup.vetro	m ²	86,96
PARETI EST	Superficie Totale	m ²	97,68	PARETI OVEST	Superficie Totale	m ²	97,68
	Superficie Opaca	m ²	91,85		Superficie Opaca	m ²	88,45
	Superficie Trasparente	m ²	5,83		Superficie Trasparente	m ²	5,83
	Sup. telaio	m ²	2,70		Sup. telaio	m ²	2,70
	Sup.vetro	m ²	3,14		Sup.vetro	m ²	3,14
SOLAIO DI CALPESTIO	Superficie impronta	m ²	588,64	SOLAIO DI COPERTURA	Superficie Totale	m ²	588,64

Figura 4: distribuzione superfici opache e trasparenti per orientamento

Come si evince dalla figura di seguito riportata (Figura 5), l'edificio è caratterizzato da un corpo centrale, quale elemento di accessibilità, che consente il raggiungimento di tutti gli altri locali, dai servizi, ai singoli uffici, nonché alla sala riunioni.



Figura 5: Distribuzione funzionale dei due piani costituenti l'edificio

La costruzione dell’F51 risale agli inizi degli anni ‘80 e presentando caratteristiche impiantistiche, strutturali e di finitura non molto attente al risparmio energetico. Vengono di seguito riportate le caratteristiche tecnico-strutturali e le caratteristiche tecnico-impiantistiche.

Caratteristiche tecnico – strutturali

- **Serramenti esterni:** l’edificio è caratterizzato da due tipologie di infissi, sui fronti nord e sud da finestre, mentre sui lati est ed ovest da porte-finestre, costituite, però, dalle medesime caratteristiche termofisiche dei materiali che li compongono. Il telaio è in alluminio con una trasmittanza termica pari a 2,2 W/m²K [fonte: UNI EN ISO 10077-1/Appendice F], mentre i vetri doppi presentano una trasmittanza termica pari a 2,8 W/m²K [fonte: UNI EN ISO 10077-1/Appendice F].
- **Struttura portante verticale:** calcestruzzo cellulare aerato autoclavato (Siporex), lastre termoisolanti in polistirolo, pannelli in cls. (Figura 6)

Caratteristiche strutturali Pareti Verticali Esterne								
	s	λ	ρ	c_s	resistenza	R_{si}	R_{se}	Trasmittanza
	[m]	[W/mK]	[kg/m ³]	[kJ/kgK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
intonaco interno di calce e gesso	0,01000	0,7	1400	1,09	0,01	0,13	0,04	0,474
siporex	0,07500	0,06	550	0,84	1,25			
pannello di poliuretano	0,03000	0,056	10	1,34	0,54			
lastre nervate prefabbricate	0,08000	0,63	1700	0,84	0,13			
intonaco esterno di calce e gesso	0,01000	0,7	1400	1,09	0,01			
TOTALE	0,205				2,111			

Figura 6: Caratteristiche termofisiche delle superfici verticali

- **Struttura portante orizzontale:** costituita, per entrambe le superfici, di calpestio e di copertura, da solai alleggeriti realizzati in latero-cemento/polistirene, e completati con massetto e allettamento in cls e finitura in linoleum o marmette, rispettivamente per quanto riguarda il solaio di calpestio (Figura 7) e quello di copertura.

Caratteristiche strutturali Solaio Calpestio								
	s	λ	ρ	c_s	resistenza	R_{si}	R_{se}	Trasmittanza
	[m]	[W/mK]	[kg/m ³]	[kJ/kgK]	[m ² K/W]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
moquette sintetica	0,007	0,16	1400	1,17	0,044	0,17	0	1,314
allettamento	0,05	1,4	2000	0,67	0,036			
massetto coibente in cemento cellulare	0,05	0,31	1000	0,88	0,161			
Solaio misto	0,26	0,742857	1800	1	0,350			
TOTALE	0,367				0,761			

Figura 7: Solaio di calpestio

In particolare, per quel che concerne il solaio di copertura, sebbene sulla base dei dati tecnici e costruttivi reperiti in fase di indagine (dati progettuali, e particolari costruttivi), e dopo aver effettuato un'operazione di prelevamento di campioni cilindrici della struttura (carotaggi) dall'intradosso del solaio, come riporta l'immagine in Figura 8, si è potuto ricostruire l'intero pacchetto costruttivo (Figura 9); successivamente l'elemento costruttivo è stato oggetto di un intervento di efficientamento energetico, che lo ha portato a raggiungere valori della trasmittanza termica entro i limiti previsti da normativa vigente (Figura 10).



Figura 8: carotaggio

TIPO DI STRUTTURA <i>Solaio esistente</i> cod 639 SOF										
Massa [kg/m ²]		570,4		Capacità [kJ/m ² K]		493,4		Type Ashrae		34
N	Descrizione strato (dall'interno verso l'esterno)	s (m)	λ (W/mK)	C (W/m ² K)	ρ (kg/m ³)	δa 10 ¹² (kg/msPa)	δu 10 ¹² (kg/msPa)	R (m ² K/W)		
1	Solaio con blocchi di polistirene da 16; sp tot 24 cm, da 1200 (da UNI 10355)	0,2400		1,923	1200	3,0000	3,0000	0,520		
2	Massetto in cemento cellulare 900	0,1800	0,170	0,94	900	17,0500	17,0500	1,059		
3	Prymer bituminoso	0,0008	0,700	875,00	2100	0,0094	0,0094	0,001		
4	Guaina impermeabilizzante 4 mm	0,0040	0,700	175,00	2100	0,0094	0,0094	0,006		
5	Guaina impermeabilizzante 3 mm	0,0030	0,700	233,33	2100	0,0094	0,0094	0,004		
6	Malta cementizia magra di allettamento	0,0400	1,400	35,00	2000	6,2500	6,2500	0,029		
7	Pavimentazione in marmette	0,0100	1,700	170,00	2400	0,9380	0,9380	0,006		
SPESSORE TOTALE [m]		0,4778								

Conduttanza unitaria superficie interna	10	Resistenza unitaria superficie interna	0,100
Conduttanza unitaria superficie esterna	10	Resistenza unitaria superficie esterna	0,100
TRASMITTANZA TOTALE[W/m ² K]	0,548	RESISTENZA TERMICA TOTALE[m ² K/W]	1,824

Figura 9: Scheda tecnica del solaio di copertura (pre-intervento)

TIPO DI STRUTTURA <i>Solaio con nuovi strati</i> cod 637 SOF											
Massa [kg/m ²]		665,6		Capacità [kJ/m ² K]		578,8		Type Ashrae		31	
N	Descrizione strato (dall'interno verso l'esterno)	s (m)	λ (W/mK)	C (W/m ² K)	ρ (kg/m ³)	δa 10 ¹² (kg/m ² Pa)	δu 10 ¹² (kg/m ² Pa)	R (m ² K/W)			
1	Solaio con blocchi di polistirene da 16; sp tot 24 cm, da 1200 (da UNI 10355)	0,2400		1,923	1200	3,0000	3,0000	0,520			
2	Massetto in cemento cellulare 900	0,1800	0,170	0,94	900	17,0500	17,0500	1,059			
3	Prymer bituminoso	0,0008	0,700	875,00	2100	0,0094	0,0094	0,001			
4	Guaina impermeabilizzante 4 mm	0,0040	0,700	175,00	2100	0,0094	0,0094	0,006			
5	Guaina impermeabilizzante 3 mm	0,0030	0,700	233,33	2100	0,0094	0,0094	0,004			
6	Malta cementizia magra di allettamento	0,0400	1,400	35,00	2000	6,2500	6,2500	0,029			
7	Pavimentazione in marmette	0,0100	1,700	170,00	2400	0,9380	0,9380	0,006			
8	Lastra termoisolante da 40 Kg/mc	0,0500	0,033	0,66	40	1,6000	1,6000	1,515			
9	Tessuto TNT in poliestere	0,0010	0,500	500,00	2000	0,0038	0,0038	0,002			
10	Calcestruzzo di sabbia e ghiaia 1800	0,0500	0,940	18,80	1800	5,0000	6,2500	0,053			
11	Strato di resina poliureica pura	0,0010	0,170	170,00	1200	0,0094	0,0094	0,006			
SPESSORE TOTALE [m]		0,5798									

Conducibilità unitaria superficie interna	10	Resistenza unitaria superficie interna	0,100
Conducibilità unitaria superficie esterna	10	Resistenza unitaria superficie esterna	0,100
TRASMITTANZA TOTALE [W/m ² K]	0,30	RESISTENZA TERMICA TOTALE [m ² K/W]	3,3

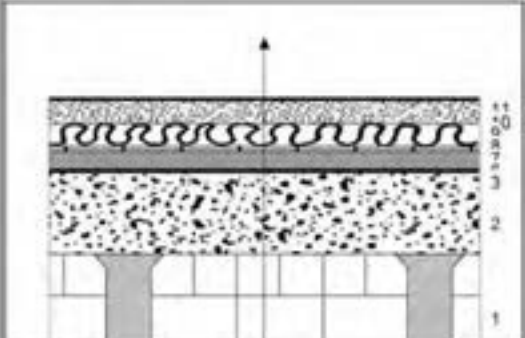


Figura 10: Scheda tecnica del solaio di copertura (post-intervento)

2.2 Caratteristiche tipologiche, dimensionali e costruttive dell'impianto di climatizzazione

L'edificio è dotato di un impianto per la climatizzazione invernale ed estiva alimentato da sorgente solare, in configurazione solar cooling. L'impianto, seppur costruito con componentistica comunemente reperibile nel mercato, è stato utilizzato anche per valutare diverse soluzioni di integrazione, per cui è dotato sia di una caldaia tradizionale ad alta temperatura (per l'integrazione della sorgente calda) sia di una pompa di calore (per integrare la potenza frigorifera).

L'impianto è costituito principalmente da:

- un campo solare (superficie di 100 m²) composto da pannelli a tubi evacuati, che può sviluppare una potenza che va da 13,9 kW in inverno (400 W/m²) a 56,6 kW in estate (800 W/m²);
- due accumuli per il fluido termovettore "caldo" ed uno per l'acqua fredda;
- una macchina frigorifera ad assorbimento a singolo effetto ad Acqua-Bromuro di Litio, con potenza frigorifera di 70 kW (con acqua calda di alimentazione a 88 °C);
- una torre di raffreddamento per lo smaltimento del calore della macchina frigorifera
- una caldaia di integrazione, che sopperisce alla mancanza eventuale di radiazione solare
- una pompa di calore per l'integrazione fredda.

L'impianto è configurato per generare la potenza frigorifera necessaria al raffrescamento dell'edificio attraverso la macchina frigorifera ad assorbimento attivata dall'energia termica fornita dal campo solare; nella stagione invernale, l'energia prodotta dai pannelli, accumulata nei serbatoi "caldi", quando non raggiunge il livello termico richiesto dal sistema di emissione a ventil convettori è integrata dalla caldaia. La Figura 11 riporta il sinottico del sistema di controllo e monitoraggio che gestisce l'intero impianto e le immagini dei componenti principali. Poiché l'impianto è stato realizzato con l'obiettivo di effettuare analisi dettagliate sul funzionamento degli impianti di solar cooling, è dotato di 8 energy meter, che forniscono i principali parametri energetici (portata, temperatura, potenza ed energia) nei punti essenziali dello stesso.

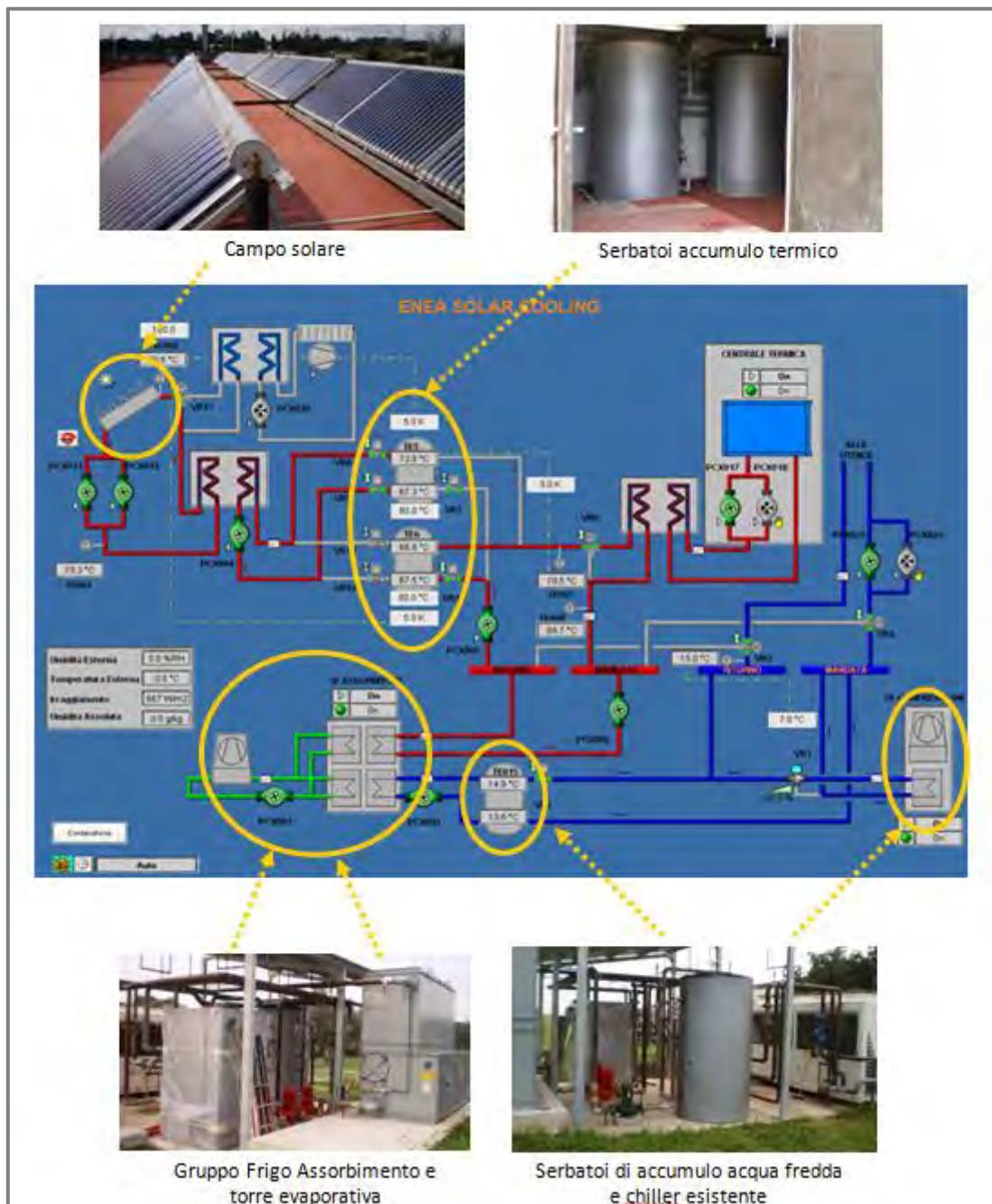


Figura 11: Schema Impianto di climatizzazione con tecnologia solar-cooling

2.3 Valutazione dei consumi energetici dell'edificio F51 secondo il modello di calcolo R5C1

Si è proceduto con l'inserimento dei dati di input sul foglio Excel per la simulazione energetica secondo il modello di calcolo implementato dall'Università di Catania, tenendo ovviamente conto del fatto che l'edificio oggetto di valutazione è sito in Roma, per cui sono stati caricati all'interno dello stesso foglio di calcolo i dati climatici relativi alla città di Roma.

Temperature medio giornaliere mensili a Roma												
Time	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	5,6	5,9	8,3	10,4	13,6	17,3	19,5	20,5	18,2	13,7	11,4	7,8
1:01- 2:00	5,3	5,7	7,9	10	13	16,8	18,9	20	17,8	13,2	11,1	7,6
2:01- 3:00	5	5,5	7,5	9,6	12,6	16,4	18,6	19,6	17,4	12,9	10,9	7,5
3:01- 4:00	4,7	5,3	7,3	9,3	12,1	16	18,4	19,3	17	12,6	10,7	7,3
4:01- 5:00	4,5	5,3	7	9,3	12,5	16,5	18,8	19,2	17	12,3	10,5	7,2
5:01- 6:00	4,2	5,3	6,7	9,4	13,2	17,4	19,7	19,2	17,1	12,1	10,2	7,1
6:01- 7:00	4	5,4	6,5	9,7	14,3	18,8	21,1	19,4	17,5	11,8	10	7
7:01- 8:00	4,4	6,2	7,5	10,9	15,8	20,2	22,6	20,7	18,7	13,1	10,6	7,3
8:01- 9:00	5,3	7,3	9,1	12,8	17,7	21,7	24,4	22,8	20,6	15,1	11,6	7,7
9:01-10:00	6,5	8,7	11,4	15,2	20,1	23,4	26,6	25,5	23	17,9	13	8,3
10:01-11:00	7,7	9,9	12,5	16,2	20,9	24	27,4	26,5	24	19,5	14,3	9,2
11:01-12:00	9	11	13,3	16,8	21,2	24,1	27,6	27	24,7	20,9	15,7	10,5
12:01-13:00	10,4	12,2	13,8	17	20,9	23,8	27,3	27	24,8	22,1	17,3	12
13:01-14:00	10,8	12,6	14,1	17	20,8	23,7	27,3	27	24,9	22,5	17,8	12,5
14:01-15:00	10,8	12,6	14,1	16,9	20,5	23,7	27,2	26,8	24,6	22,4	17,7	12,5
15:01-16:00	10,3	12,2	13,8	16,4	20,1	23,5	27	26,4	24,1	21,8	17	12,1
16:01-17:00	9,7	11,6	13,4	15,9	19,6	23,1	26,6	25,9	23,4	21,1	16,4	11,5
17:01-18:00	8,8	10,7	12,8	15,1	19	22,4	26	25,4	22,6	20,1	15,5	10,8
18:01-19:00	7,7	9,5	12,1	14,2	18,3	21,6	25,1	24,7	21,6	18,8	14,3	9,7
19:01-20:00	7,1	8,6	11,4	13,5	17,6	20,9	24,3	24,1	20,9	17,8	13,6	9,1
20:01-21:00	6,7	7,8	10,8	12,9	16,7	20,1	23,2	23,3	20,2	16,7	13	8,5
21:01-22:00	6,5	7	10,1	12,3	15,7	19,4	22,1	22,5	19,6	15,7	12,5	8
22:01-23:00	6,2	6,5	9,4	11,7	14,9	18,7	21,2	21,8	19	14,8	12,1	7,7
23:01-24:00	5,8	6,2	8,9	11,1	14,3	18,1	20,2	21,2	18,5	14,1	11,8	7,6

Figura 12: Dati climatici: Temperature

Hour	Average Hourly Relative Humidity % Rome											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	80	84	88	82	87	84	85	85	87	92	87	81
1:01- 2:00	81	85	88	83	88	84	86	86	88	92	88	81
2:01- 3:00	82	86	89	84	89	85	87	86	88	92	88	81
3:01- 4:00	84	87	89	85	91	85	88	87	89	91	88	82
4:01- 5:00	84	86	89	84	90	83	85	86	89	91	88	82
5:01- 6:00	84	86	90	83	88	81	81	86	88	91	89	82
6:01- 7:00	84	85	90	82	86	77	76	84	87	91	90	82
7:01- 8:00	84	83	87	77	81	73	70	79	83	87	88	82
8:01- 9:00	83	80	81	70	75	67	63	70	77	81	85	81
9:01-10:00	82	76	74	61	67	61	56	60	70	73	81	79
10:01-11:00	79	72	70	58	65	60	54	57	67	68	77	76
11:01-12:00	74	68	66	57	66	60	55	58	65	64	71	71
12:01-13:00	68	63	62	58	68	62	58	61	64	61	65	66
13:01-14:00	66	62	62	58	68	63	59	62	64	62	63	64
14:01-15:00	67	62	63	60	68	63	60	63	66	64	64	64
15:01-16:00	69	65	66	63	67	64	61	64	70	68	67	66
16:01-17:00	70	67	69	66	69	66	63	66	72	72	70	69
17:01-18:00	73	70	72	69	72	69	66	69	75	76	74	73
18:01-19:00	76	73	77	73	76	73	70	72	78	81	79	79
19:01-20:00	77	75	80	75	79	76	73	75	81	84	81	81
20:01-21:00	78	78	82	77	82	79	77	79	83	86	83	82
21:01-22:00	78	80	84	78	85	83	82	82	85	88	84	82
22:01-23:00	79	82	86	80	87	84	84	84	87	89	85	82
23:01-24:00	80	83	87	81	87	84	85	85	87	90	86	81

Figura 13: Dati climatici: Umidità

Time	Hourly Statistics for Global Horizontal Solar Radiation Wh/m ² Rome											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:01- 2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:01- 3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:01- 4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:01- 5:00	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
5:01- 6:00	0	0	0	7	35	51	34	9	0	0	0	0
6:01- 7:00	0	0	12	66	121	143	121	77	37	8	0	0
7:01- 8:00	3	20	80	166	242	271	248	190	132	73	24	4
8:01- 9:00	49	86	177	291	392	427	410	338	255	166	91	50
9:01-10:00	114	165	284	425	548	589	583	501	390	266	161	109
10:01-11:00	174	239	382	542	678	726	732	645	508	352	220	160
11:01-12:00	214	291	445	611	752	805	824	733	576	396	251	190
12:01-13:00	222	304	457	614	749	807	833	740	573	386	245	190
13:01-14:00	196	275	413	550	671	732	758	666	501	326	205	162
14:01-15:00	145	213	328	438	539	599	619	531	383	235	144	114
15:01-16:00	84	139	225	307	385	440	449	371	251	140	77	59
16:01-17:00	27	67	128	185	240	286	286	221	134	58	17	10
17:01-18:00	0	11	46	87	125	160	154	106	46	6	0	0
18:01-19:00	0	0	2	18	44	69	62	29	3	0	0	0
19:01-20:00	0	0	0	0	3	11	9	1	0	0	0	0
20:01-21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:01-22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:01-23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:01-24:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 14: Dati climatici: Irraggiamento

La Figura 15 riassume le caratteristiche strutturali dell'edificio inserite (parte in verde), la Figura 16 riporta i valori delle impedenze calcolate dall'algoritmo e quelli delle ipotesi di calcolo, mentre nella Figura 17 sono evidenziati gli andamenti orari dei parametri climatici e dei guadagni interni.

Parete	U	b.tr	S	a o g	Fsh	AsoEst	aU/he	Aeff	Beta	Ricc	H.tr
Nord	0,472522	1	279,44	0,33			0,006	1,74	1,57	0,500	132,04
Fin. Nord	2,757959	1	106,24	0,75	0,9	8,376		84,54	1,57	0,500	293,00
Sud	0,466632	1	278,83	0,33			0,006	1,72	1,57	0,500	130,11
Fin. Sud	2,751521	1	106,85	0,75	0,9	8,424		64,91	1,57	0,500	294,00
Est	0,473585	1	91,85	0,33			0,006	0,57	1,57	0,500	43,50
Fin. Est	1,886145	1	5,83	0,75	0,9	0,460		1,54	1,57	0,500	11,00
Ovest	0,452536	1	88,45	0,33			0,006	0,53	1,57	0,500	40,03
Fin. Ovest	1,886145	1	5,83	0,75	0,9	0,460		1,54	1,57	0,500	11,00
Nord Est		1	0,00	0,5			0,000	0,00	1,57	0,500	0,00
Fin. NE		1	0,00	0,7	0,9	0,000		0,00	1,57	0,500	0,00
Nord Ovest		1	0,00	0,5			0,000	0,00	1,57	0,500	0,00
Fin. NW		1	0,00	0,7	0,9	0,000		0,00	1,57	0,500	0,00
Sud Est		1	0,00	0,5			0,000	0,00	1,57	0,500	0,00
Fin. SE		1	0,00	0,7	0,9	0,000		0,00	1,57	0,500	0,00
Sud Ovest		1	0,00	0,5			0,000	0,00	1,57	0,500	0,00
Fin. SW		1	0,00	0,7	0,9	0,000		0,00	1,57	0,500	0,00
Pavimento	1,314895	1	588,64	0			0,000	0,00	0	1,000	774,00
Soffitto	0,302392	1	588,64	0,76			0,029	15,22	0	1,000	178,00
Parati Int.	2,5	0	1340,31	0				1340,31	0	1,000	

Figura 15: caratteristiche strutturali edificio

Parametro	Valore	Unità	Parametro	Valore	Unità				
Altazza s.riambata	8		Guano	81					
Htot	1906,67		R.irs	1					
Hce	608,99		R.lms	11784,57					
Hpar	1297,68		R.lcm	1458,28					
Htr.op	1297,68		R.la	1					
Sir	234,75		R.la	11233,76					
Al	118,00		VMC	0	F mandata	17	Um. Aria. Vent. Est.	15	
Al	3256,16		Part. Variab	0	Ar.Usar	3	Um. Aria. Vent. Int.	10	
Aoky	27,85		Attenuazione	0	Temp. Arken	15	C. Let. Int. (W/m²)	2,8	
Hve	693,67		Coef. Sorg. Int		[W/m²]				
Am	1295,008		I-oky, nom	30	[W/m²]		U.R. Ar. VMC	80	%
			Temp. Aria Int	20	°C		U.R. Aria Int.	10	%
			Pressione Totale	1	Bar		Coef. Infil. FL	0	m

Figura 16 – condizioni al della simulazione

Taky	hr	I-oky	I-act	F.int	F.act	Ta (°C)	Ta (°C)	Tvent (°C)	n	imp. Int
0.11	4.34	33.35	0.0	0	-928.88	7.8	20.00	7.80	0.5	1
-0.15	4.33	33.52	0.0	0	-933.65	7.6	20.00	7.60	0.5	1
-0.28	4.32	33.60	0.0	0	-936.05	7.5	20.00	7.50	0.5	1
-0.54	4.31	33.78	0.0	0	-940.87	7.3	20.00	7.30	0.5	1
-0.67	4.30	33.86	0.0	0	-943.28	7.2	20.00	7.20	0.5	1
-0.80	4.30	33.95	0.0	0	-945.71	7.1	20.00	7.10	0.5	1
-0.93	4.29	34.04	0.0	8157.36	-948.14	7.0	20.00	7.00	0.5	1
-0.54	4.31	33.78	4.0	8157.36	-855.96	7.3	20.00	7.30	0.5	1
-0.02	4.33	33.43	50.0	8157.36	-593.45	7.7	20.00	7.70	0.5	1
0.75	4.36	32.93	509.0	8157.36	-2914.51	8.3	20.00	8.30	0.5	1
1.90	4.41	32.20	160.0	8157.36	-5094.68	9.2	20.00	9.20	0.5	1
3.32	4.48	31.27556	190	8157.36	-6153.35528	10.3	20	10.5	0.5	1
5.32	4.56	30.45	190.0	8157.36	-6197.84	12.0	20.00	12.00	0.5	1
5.91	4.59	30.26	162.0	8157.36	-4855.96	12.5	20.00	12.50	0.5	1
5.91	4.59	30.26	114.0	8157.36	-2638.08	12.5	20.00	12.50	0.5	1
5.44	4.57	30.41	59.0	8157.36	-408.83	12.1	20.00	12.10	0.5	1
4.75	4.54	30.89	10.0	8157.36	-409.28	11.3	20.00	11.30	0.5	1
3.89	4.50	31.09	0.0	8157.36	-865.92	10.8	20.00	10.80	0.5	1
2.58	4.44	31.83	0.0	0	-886.55	9.7	20.00	9.70	0.5	1
1.78	4.41	32.28	0.0	0	-899.19	9.1	20.00	9.10	0.5	1
1.01	4.37	32.76	0.0	0	-912.57	8.5	20.00	8.50	0.5	1
0.37	4.35	33.18	0.0	0	-924.16	8.0	20.00	8.00	0.5	1
-0.02	4.33	33.43	0.0	0	-931.26	7.7	20.00	7.70	0.5	1
-0.15	4.33	33.52	0.0	0	-933.65	7.6	20.00	7.60	0.5	1

Figura 17 . andamenti orari dei parametri ambientali e dei guadagni interni

Poiché l’algoritmo implementato nel foglio Excel non è ancora automatizzato per la lettura delle caratteristiche climatiche del mese considerato, il calcolo è stato effettuato manualmente mese per mese, impostando la temperatura interna di riferimento a 20°C in inverno e 26°C in estate.

La Tabella 1 riporta i risultati ottenuti, per i mesi invernali in cui è possibile accendere l’impianto, come da norma vigente e per i mesi estivi in cui è necessaria la climatizzazione. Il mese di giugno non è stato riportato in quanto per questo mese non si dispone del dato misurato con cui sarà fatto il confronto.

Tabella 1 - risultati metodo R5C1

STAGIONE INVERNALE					
gen	feb	mar	nov	dic	TOT
11295	8162	5947	2029	8494	35927
STAGIONE ESTIVA					
	lug	ago	sett	TOT	
	9446	8258	4682	22386	

2.4 Confronto

Il metodo R5C1 non può essere definito un metodo di calcolo dinamico vero e proprio in quanto esegue un calcolo orario per un giorno di riferimento del mese considerato e, mediante sequenze giornaliere multiple, determina il consumo dell’intero mese, valutando, quindi, gli effetti inerziali in un arco temporale di 24 ore, ma trascurando quelli giornalieri, frutto delle variazioni climatiche anch’esse giornaliere.

In una prima fase in confronto è stato effettuato fra i dati misurati e i consumi totali (considerando il calore latente e quello sensibile) prodotti dal modello R5C1; nella Tabella 2 e Tabella 3 si riportano i risultati ottenuti.

Tabella 2 - confronto consumi invernali [kWh]

STAGIONE INVERNALE						
	gen	feb	mar	nov	dic	TOT
R5C1	11295	8162	5947	2029	8494	35927
misure	7080	8910	8560	6130	9150	39830

Tabella 3 - confronto consumi estivi [kWh]

STAGIONE ESTIVA				
	lug	ago	sett	TOT
R5C1	9446	8258	4682	22386
misure	12838	9867	7410	30114

Si precisa che i dati provenienti dalle misure derivano da campagne sperimentali effettuate per attività che avevano l’obiettivo di quantificare le prestazioni dell’impianto di solar cooling, e non specificatamente la determinazione dei consumi dell’edificio per cui per alcuni mesi gli stessi sembrano affetti da incongruenze legate a regolazioni particolari dell’impianto, di cui non si hanno informazioni. Precisamente appare non veritiero per le caratteristiche climatologiche di Roma che i consumi del mese di gennaio siano minori di febbraio, marzo e dicembre, così come sembra eccessiva la differenza fra luglio e agosto, i cui consumi probabilmente sono inficiati dal periodo di chiusura del Centro della Casaccia.

A valle di tali considerazioni sono riportate nella Tabella 4 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Tabella 5 le differenze in percentuale.

Tabella 4 - errori relativi consumi stagione invernale

STAGIONE INVERNALE						
	gen	feb	mar	nov	dic	TOT
R5C1-MIS	-60%	8%	31%	67%	7%	10%

Tabella 5 - errori relativi consumi stagione estiva

STAGIONE ESTIVA				
	lug	ago	sett	TOT
R5C1-MIS	26%	16%	37%	26%

Il confronto invernale del modello R5C1 rispetto al dato misurato confronto invernale evidenzia un errore molto variabile su scala mensile, che va dal 7% di dicembre al 67% di novembre; tuttavia gli effetti compensativi e il considerare un intervallo temporale più ampio come l'intera stagione di riscaldamento attenuano sensibilmente l'errore che si attesta sul 10%; l'approccio del modello è quello di un calcolo giornaliero medio, "spalmato" su tutto il periodo, quindi più ampio è il periodo a cui è riferita la media, più contenuta è l'approssimazione.

Per la stagione estiva l'errore su base mensile è più contenuto, mentre quello totale (il periodo considerato è più corto) è maggiore rispetto all'invernale: 26%.

Successivamente il confronto è stato effettuato considerando l'apporto del solo calore sensibile e per effettuare una valutazione più completa delle potenzialità del modello R5C1, il tale confronto è stato esteso considerando i risultati prodotti da un software più complesso che tiene conto degli effetti dinamici su detti, ODESSE (per una descrizione del quale si rimanda al RdS/PAR2013/146).

Di seguito le tabelle riassuntive con i dati assoluti (Tabella 6 e Tabella 7) e con gli errori relativi dei confronti effettuati (Tabella 8 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Tabella 9).

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.

Tabella 6 - confronto consumi invernali con il solo calore sensibile [kWh]

STAGIONE INVERNALE - Solo calore sensibile						
	gen	feb	mar	nov	dic	TOT
R5C1	9941	7956	6871	4695	8230	37694
misure	7080	8910	8560	6130	9150	39830
ODESSE	9085	7135	4848	4567	8560	34195

Tabella 7 - confronto consumi invernali con il solo calore latente [kWh]

STAGIONE ESTIVA - Solo calore sensibile				
	lug	ago	sett	TOT
R5C1	9451	8738	6590	24779
misure	12838	9867	7410	30114
ODESSE	8258	8359	3788	20405

Tabella 8 - errori relativi consumi stagione invernale con il solo calore sensibile

STAGIONE INVERNALE - Solo calore sensibile						
	gen	feb	mar	nov	dic	TOT
R5C1-MIS	29%	-12%	-25%	-31%	-11%	-6%
OD-MIS	22%	-25%	-77%	-34%	-7%	-16%
R5C1-OD	9%	10%	29%	3%	-4%	9%

Tabella 9 - errori relativi consumi stagione invernale con il solo calore sensibile

STAGIONE ESTIVA - Solo calore sensibile				
	lug	ago	sett	TOT
R5C1-MIS	26%	11%	11%	18%
OD-MIS	36%	15%	49%	32%
R5C1-OD	13%	4%	43%	18%

Si nota come il modello abbia prodotto risultati molto più vicini ai dati misurati e con una differenza più regolare mese per mese, sia nella stagione invernale sia in quella estiva: l'errore totale si riduce del 4% in inverno e del 8% in estate.

Inoltre i due modelli di calcolo R5C1 e ODESSE forniscono risultati sostanzialmente concordi fra loro, ma, tranne per il mese di dicembre, mai inferiori al 20%; la ragione di ciò può essere imputata ai diversi dati climatici utilizzati: il modello R5C1 utilizza quelli forniti dall'atlante climatico di Energy Plus che fanno riferimento ad un anno tipo (non reale, ma realistico) che sicuramente induce un errore non trascurabile nelle condizioni iniziali di calcolo e non è direttamente correlato ai consumi energetici misurati.

Va evidenziato come l'incidenza del calore latente sia maggiore nel caso invernale rispetto a quello estivo: infatti in quest'ultimo caso il modello R5C1 fornisce sostanzialmente gli stessi risultati mentre nel caso invernale le differenze sono più marcate. Ciò può essere imputabile alla tipologia di impianto di climatizzazione e soprattutto del sistema di emissione. L'impianto di solar cooling non effettua trattamento dell'aria e i ventil-convettori sono regolati solo in funzione della temperatura ambiente: il dato misurato risente quindi la condizione di un edificio regolato solo in funzione della temperatura dell'acqua di adduzione e indipendente dall'umidità.

Una verifica più approfondita dovrebbe essere condotta con dati climatici (misurati) identici per tutti i casi confrontati.

Si osserva che ODESSE rivela sostanzialmente un errore maggiore di R5C1 rispetto ai dati misurati: la cosa non sorprende in quanto essendo un modello molto più complesso in cui il calcolo avviene su base oraria per l'intero anno, è molto più sensibile alle condizioni di utilizzo dell'edificio e alle condizioni iniziali della simulazione; per avere dei buoni risultati bisogna avere informazioni quanto più inerenti con il funzionamento reale dell'edificio, altrimenti si rischia di vanificare l'approccio metodologico più rigoroso e sicuramente preciso che è stato implementato (equazioni differenziali per il calcolo della temperatura interna, coefficienti CTSf per tener conto dei fenomeni inerziali delle superfici opache, etc.).

Questa, infatti, è la ragione per cui, come specificato nel rapporto tecnico della scorsa annualità si è ritenuto ODESSE non idoneo come strumento potenzialmente utilizzabile per la certificazione dinamica degli edifici.

Si evince dalle considerazioni precedenti quanto sia importante considerare l'influenza del calore latente anche nella stagione invernale in quanto in funzione dell'umidità specifica esterna si può avere un carico latente positivo o negativo e quindi una richiesta energetica dell'edificio sensibilmente diversa da quella determinata considerando solo il calore sensibile.

In conclusione si può affermare che il modello R5C1 è in grado di fornire informazioni sufficientemente precise sui consumi reali dell'edificio, che potrebbero essere ulteriormente migliorate incrementando la precisione dei dati di ingresso al modello, in particolare i dati climatici. Si suggerisce, infatti, nell'ipotesi di utilizzare tale metodo come strumenti di certificazione e a completamento dell'attività, un'analisi più approfondita dell'incidenza di tali informazioni sul risultato finale e l'utilizzo di altra fonte di dati meteo basata su anni reali e non su anni tipo.

3 Conclusioni

Obiettivo dell'attività era valutare quanto la metodologia di calcolo implementata fosse in grado di fornire delle informazioni sui consumi energetici reali degli edifici, per cui è stata effettuata una comparazione fra i risultati forniti dal metodo R5C1, quelli prodotti dal software ODESSE e i consumi termici misurati di un edificio reale. In particolare è stato scelto un edificio presente all'interno del Centro di Ricerca della Casaccia (Roma), adibito ad uffici (F - 51) in quanto dello stesso si dispone di alcuni dati relativi ai consumi energetici e che risulta essere rappresentativo per gli edifici con questa destinazione d'uso.

Dal confronto emerge che il modello R5C1 è in grado di fornire informazioni sufficientemente precise sui consumi reali dell'edificio: la differenza rispetto ai consumi misurati si attesta sul 6% in inverno e sul 18% in estate. Tali differenze aumentano se si esegue il confronto su base mensile in quanto si verificano degli effetti di compensazione poiché l'approccio del modello è quello di un calcolo giornaliero medio, "spalmato" su tutto il periodo esaminato, quindi aumentare il periodo di calcolo a cui è riferita la media (come l'intera stagione di riscaldamento o raffrescamento) attenua l'approssimazione.

Il confronto mette inoltre in evidenza l'importanza di avere dati climatici più vicini possibili a quelli reali della località esaminata e quando l'incidenza degli stessi sia elevata sul risultato finale, specialmente se l'obiettivo ultimo è avere informazioni sui consumi reali dell'edificio.

4 Riferimenti bibliografici

- Report RdS/PAR2013/146: Valutazione di applicabilità del metodo RTS come codice di calcolo per la certificazione energetica degli edifici;
- Report RdS/PAR2013/119: Sviluppo di metodologie e strumenti di misura e analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici;
- RdS/PAR2014/077: Sviluppo del codice di calcolo dinamico per la determinazione delle prestazioni estive ed invernali degli edifici.