



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di un prototipo di serra bioclimatica per l'efficienza e la sostenibilità energetica

Carlo Bibbiani, Fabio Fantozzi, Caterina Gargari



STUDIO DI UN PROTOTIPO DI SERRA BIOCLIMATICA PER L'EFFICIENZA E LA SOSTENIBILITÀ ENERGETICA

Carlo Bibbiani (Centro CiRAA, Università degli Studi di Pisa)
Fabio Fantozzi, Caterina Gargari (Dip. DESTEC, Università degli Studi di Pisa)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: C. Coltri vegetali

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi ENEA.

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Studio di un prototipo di serra bioclimatica per l'efficienza e la sostenibilità energetica”*

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Ing. Carlo Bibbiani

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 ANALISI BIBLIOGRAFICA E DEFINIZIONE DELLO STATO DELL'ARTE SULLE SERRE BIOCLIMATICHE.....	5
2.2 NORMATIVE REGIONALI E NAZIONALI ITALIANE PER LA PROGETTAZIONE DI SERRE BIOCLIMATICHE AL FINE DI MIGLIORARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI RESIDENZIALE.....	6
2.3 ANALISI DEI DATI CLIMATICI PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL CONTESTO CLIMATICO DEL SITO CHE OSPITA LA PIATTAFORMA DIMOSTRATIVA SERRA BIOCLIMATICA-EDIFICIO.....	8
2.4 PARAMETRI DI PROGETTAZIONE E MODELLO DI SERRA BIOCLIMATICA ASSOCIATO ALL'EDIFICIO LOCALIZZATO PRESSO IL CENTRO CASACCIA DELL'ENEA VALUTATO TRAMITE ENERGY PLUS	10
2.4.1 <i>Il modello geometrico – Google SketchUp</i>	14
2.5 IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI FISICO-TECNICI CHE CONDIZIONANO I FLUSSI ENERGETICI TRA LA SERRA BIOCLIMATICA E L'EDIFICIO AI FINI DELL'EFFICIENZA ENERGETICA.....	18
2.6 SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DEL FABBRICATO IN ASSENZA/PRESENZA DI SERRA BIOCLIMATICA TRAMITE SOFTWARE ENERGY PLUS	22
2.7 SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DEL FABBRICATO A CONFRONTO TRA I VARI MODELLI COMPORTAMENTALI....	56
2.7.1 <i>Confronto modelli A e B</i>	56
2.7.2 <i>Confronto tra i modelli B, C, D, E, F e G</i>	67
2.8 ANALISI ED INTERPRETAZIONE CRITICA DEI RISULTATI	69
3 CONCLUSIONI.....	70
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	71
5 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.....	72
6 ALLEGATO A	74

Sommario

La ricerca muove dalle più recenti evoluzioni normative in tema di risparmio energetico e di più moderni sviluppi della tecnologia relativa alla progettazione e realizzazione di elementi vetrati a controllo solare ad alte prestazioni energetiche per dimostrare l'efficacia dei sistemi a serra nel migliorare i livelli di comfort interno riducendo il consumo di energia non rinnovabile per il condizionamento degli ambienti interni.

La ricerca si propone l'obiettivo di verificare il contributo al comfort microclimatico offerto dalla serra solare da realizzare al piano primo dell'edificio ENEA CASACCIA.

L'analisi è stata condotta utilizzando il software opensource EnergyPlus per la simulazione termica e la diagnosi energetica in regime dinamico degli edifici, sulla base del modello geometrico 3D costruito attraverso il software GoogleSketchUp.

La simulazione ha consentito di valutare l'incremento di energia gratuita proveniente da irraggiamento solare attraverso le superfici vetrate dovuto alla realizzazione della serra e il conseguente innalzamento della temperatura operativa dell'ambiente interno durante la stagione invernale.

La simulazione è stata condotta sia in situazione standard (assenza di persone e apparecchiature) sia nella situazione reale di operatività dell'edificio, con la presenza di carichi interni associati alla funzione ufficio dell'ambiente.

A corredo dell'analisi principale, sono state condotte simulazioni variando la configurazione geometrica dell'ambiente oggetto di analisi (rimuovendo la parete di separazione tra la serra e l'ambiente interno) e modificando le caratteristiche degli elementi vetrati della serra nell'ottica di una ottimizzazione delle prestazioni anche nel periodo estivo.

Gli andamenti orari della T° hanno dimostrato un innalzamento medio della T° operativa, durante la stagione invernale di circa 0.59°C .

1 Introduzione

Le attività oggetto del lavoro di ricerca si inseriscono nell'ambito del Progetto dei Progetti C.1 "Coltri vegetali" e C.2 "Climatizzazione microclimatica sostenibile con sistemi innovativi a fonte rinnovabile per sistemi serra" di cui al Piano Annuale di Realizzazione 2015 e si definiscono propedeutiche alla progettazione esecutiva e alla realizzazione di una serra bioclimatica da installarsi presso la Scuola delle Energie della sede casaccia dell'ENEA. La serra, rientra in un più ampio piano di installazione, sul medesimo edificio, di impianti e tecnologie in grado di ridurre il fabbisogno energetico attraverso sistemi passivi quali coperture e schermature a verde, realizzate anch'esse all'interno del PAR 2015.

Il progetto ha l'obiettivo di determinare il contributo effettivo della serra, costruita in aderenza ad uno degli ambienti del piano primo, alla riduzione del fabbisogno energetico per la climatizzazione dello spazio adiacente, confrontando la variazione della T° operativa dell'ambiente interno nelle due situazioni 'pre' e 'post' intervento.

La ricerca si pone anche l'obiettivo di valutare eventuali limiti dell'attuale progetto evidenziando varianti che potrebbero essere considerate e adottate per incrementare ulteriormente i benefici derivanti dalla presenza della serra, offrendo così uno spunto per una revisione progettuale nell'ottica di una ulteriore riduzione del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale ed estiva dello spazio abitato.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 *Analisi bibliografica e definizione dello stato dell'arte sulle serre bioclimatiche*

Le serre bioclimatiche appartengono alla categoria delle tecnologie passive per il controllo delle condizioni termo-igrometriche degli edifici.

Il termine "Sistema solare passivo" è utilizzato per descrivere quei sistemi che raccolgono, accumulano e ridistribuiscono energia solare senza l'utilizzo di impianti meccanici. I sistemi solari passivi sono composti essenzialmente da due elementi: un collettore, costituito generalmente da una superficie trasparente orientata a Sud/Sud-Ovest e una massa termica in grado di accumulare la frazione termica della radiazione solare.

I sistemi passivi possiedono quindi la capacità di accumulare energia termica sotto forma di radiazione solare e di restituirla poi, direttamente o indirettamente, agli spazi adiacenti, migliorandone le condizioni di comfort interno e riducendone la spesa energetica per il riscaldamento.

In relazione alle diverse modalità di trasmissione del calore accumulato, le serre si possono dividere in due tipologie: a *guadagno diretto* o a *guadagno indiretto*.

Le serre a guadagno diretto costituiscono estensioni vere e proprie dello spazio abitato, da questo non separate se non per tramite di schermature vetrate e pertanto la radiazione solare incidente sulla superficie della serra, entra direttamente nell'ambiente interno e viene assorbita durante il giorno dagli elementi massivi di accumulo (pareti, solai, ecc) e da questi rilasciata all'ambiente durante le ore notturne.

Nei sistemi a guadagno indiretto, al contrario, la radiazione solare incide su una superficie di accumulo e riscalda l'aria dello spazio filtro fisicamente separato dallo spazio abitato, detto spazio *tampone*, a questo collegato tramite aperture che vengono aperte o chiuse per favorire lo scambio d'aria che, assieme al calore trasmesso verso l'interno da una eventuale superficie di accumulo, riscalda lo spazio abitato.

Tra i diversi sistemi passivi, la serra costituisce indubbiamente il più popolare, non soltanto per l'efficacia del modello in termini di guadagno energetico, ma soprattutto per i vantaggi in termini di disegno dell'edificio e ampliamento dello spazio abitato che conseguentemente comporta. [7]

Poiché il sistema serra risente in maniera evidente e repentina delle variazioni del clima esterno, nonostante spesso le serre siano progettate come naturali prolungamenti dello spazio abitato, è importante che queste siano invece configurate come zona termica indipendente, isolata dallo spazio adiacente, tanto nei climi caldi, quanto nei climi freddi. Una errata progettazione della serra, può infatti compromettere la prestazione energetica dell'edificio, causando un incremento della domanda di riscaldamento in inverno quanto un incremento dei consumi per il raffrescamento in estate.

Diversi sono gli studi che sono stati condotti negli anni, in zone climatiche diverse, e su tipi edilizi diversi per tecnologie e utilizzo, con l'obiettivo di determinare il reale contributo delle serre, o meglio delle diverse tipologie di serra, al risparmio energetico complessivo dell'edificio e al miglioramento del comfort termico e luminoso degli spazi adiacenti.

Nel 2000, Jørgensen e Hendriksen [8] hanno condotto uno studio sulle diverse tipologie di schermatura trasparente realizzata a chiusura di balconi di edifici residenziali, per determinare se tale installazione, produca un effettivo risparmio energetico quanto piuttosto un incremento dei consumi. Analizzando configurazioni diverse, con tipologie di vetro, orientamenti e modelli di utilizzo diversi, è emerso infatti come i consumi per il riscaldamento possano crescere anche del 200% a fronte di un design non corretto mentre, attraverso una accurata progettazione, si possono ottenere risparmi fino al 28% riscaldando i balconi a 20°C e fino al 40% nel caso di balconi non riscaldati.

In un clima caldo e temperato come quello dell'Iran, Owraq *et al.* [15] hanno analizzato, si attraverso simulazioni realizzate con il software E+ che monitoraggi diretti, il comportamento termo igrometrico di un ambiente riscaldato attraverso una serra implementata con diversi sistemi di accumulo dimostrando come la presenza di un elemento di accumulo determini una notevole ed ulteriore riduzione del costo energetico (37% contro 10%) rispetto alla semplice realizzazione della serra.

In clima mediterraneo, Aelenei *et al.* [1], attraverso il software E+, hanno condotto uno studio sulla prestazione energetica di una nuova serra realizzata in *retrofitting* di un edificio residenziale, simulato in 6 diverse città del Portogallo, dimostrando come i risparmi più significativi di ottengano, indipendentemente dalla zona climatica, attraverso un design della serra integrato nell'edificio, con orientamento a Sud, predisponendo un sistema di ventilazione naturale e una schermatura interna ad alta riflettanza delle superfici vetrate. Lo studio ha però anche rilevato come i risparmi energetici complessivi, siano fortemente condizionati dal comportamento dell'utente al quale è affidata l'apertura/chiusura delle porte delle aperture di ventilazione e dei sistemi di schermatura.

In Italia, Olivieti *et al.* [12] hanno condotto svariati studi sul contributo offerto da serre realizzate in adiacenza a spazi residenziali, proponendo anche [13] modelli di calcolo semplificati per la valutazione dell'energia solare assorbita da una serra. In [14] Olivieti *et al.* Hanno investigato l'entità dei guadagni solari e il valore della temperatura operativa, in condizioni di free-floating, di una serra nelle città di Cosenza, Roma e Milano.

Più recentemente, Chiesa *et al.* [6], hanno dimostrato come in Europa, la realizzazione di serre addossate ad edifici non isolati riducano considerevolmente la domanda di riscaldamento, indipendentemente dalla tipologia dell'elemento vetrato installato (singolo, doppio, triplo), costituendo, specialmente nelle zone a clima più caldo del sud Europa, le serre costituiscano una valida alternativa, negli interventi di riqualificazione, a consistenti interventi di isolamento termico dell'involucro.

2.2 Normative regionali e nazionali italiane per la progettazione di serre bioclimatiche al fine di migliorare l'efficienza energetica degli edifici residenziale.

L'Unione europea ha impostato una politica energetica che spinge gli Stati membri ad aumentare l'utilizzo delle fonti rinnovabili e ridurre le fonti fossili, per rendere l'Unione meno dipendente dalle fonti di energia tradizionali, quasi totalmente importate da Paesi terzi.

Attraverso il pacchetto clima-energia 20-20-20 l'Ue impone agli Stati membri entro il 2020 di ridurre del 20% le emissioni di gas serra, raggiungere il 20% di dipendenza energetica da fonti rinnovabili (per l'Italia sarà il 17%) e incrementare del 20% il risparmio energetico.

La normativa in materia di energia è piuttosto frammentaria e disorganica, in modo particolare per quel che riguarda le fonti rinnovabili.

La Commissione europea ha presentato il 30 novembre 2016 il cosiddetto "pacchetto invernale" di direttive in materia di energia, "Energia pulita per tutti gli europei".

Il corposo gruppo di provvedimenti prevede aggiornamenti per tutta la normativa di settore, dall'efficienza energetica, all'efficienza in edilizia, alle fonti rinnovabili, passando per l'ecodesign dei prodotti che consumano energia, e la riforma del mercato elettrico.

In questo ambito, è stata soggetta a revisione anche la Direttiva sulla Efficienza Energetica in edilizia n. 2010/31/UE per il controllo dei consumi energetici degli edifici e la riduzione delle emissioni i gas clima-alteranti, e recentemente, è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea (L 156/75) la Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.

Obiettivo della nuova direttiva, che entrerà in vigore il prossimo 9 luglio 2019, è arrivare entro il 2050 alla realizzazione di edifici pubblici e privati a consumo di energia vicino allo zero (NZEB), assicurare la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra di almeno il 40% entro il 2030 rispetto al 1990, aumentare la quota di consumo di energia da fonti rinnovabili, migliorare il risparmio energetico, la sicurezza energetica, la competitività e la sostenibilità dell'Europa

A questo proposito gli Stati membri sono tenuti a definire una tabella di marcia con misure e indicatori di progresso, con tappe indicative per il 2030, il 2040 e il 2050, misurabili e stabiliti a livello nazionale in vista dell'obiettivo di lungo termine per il 2050 di ridurre le emissioni di gas a effetto serra nell'Unione dell'80-95% rispetto al 1990. Ricordiamo che oggi circa il 40% del consumo finale di energia nel Vecchio Continente dipende dalle costruzioni.

A livello nazionale, la normativa sulla prestazione energetica degli edifici è regolata dal D.Lgs. 192/2005 e successive modifiche sul rendimento energetico in edilizia, dalla L. 3 agosto 2013 n. 90 sulla efficienza energetica in edilizia (conversione del D.L. 4 giugno 2013 n. 63) d e dal D.M. 26 giugno 2015 Linee guida per la certificazione energetica degli edifici.

L'utilizzo della serra bioclimatica per la riduzione dei consumi energetici invernali è una strategia di fatto largamente impiegata fino dagli anni '70 ma oggi formalmente riconosciuta non tanto dalla normativa nazionale (nessuna delle normative energetiche sopracitate, riferisce esplicitamente ai sistemi serra) quanto piuttosto dalla normativa regionale e comunale dal momento che, con l'adozione del D.Lgs. 192/2005, le regioni hanno visto legittimato il proprio diritto ad esplicitare le proprie competenze, sviluppare specificità e cogliere opportunità proprie dei loro contesti nella definizione delle normative regionali in materie di energia in edilizia.

In assenza quindi di una normativa nazionale che fissi parametri dimensionali e prestazionali, diverse sono le Leggi Regionali e i Regolamenti Edilizi ed Urbanistici locali che riportano riferimenti a metodologie di calcolo per la determinazione del contributo energetico offerto dal sistema serra alla prestazione globale dell'edificio.

In genere la realizzazione delle serre solari è incentivata e stimolata attraverso benefici di carattere urbanistico e dal punto di vista edilizio, essendo assimilata ad un volume tecnico, non è da considerarsi per il calcolo della volumetria dell'edificio e pertanto esclusa dai computi urbanistici.

Per essere considerata tale, una serra solare deve soddisfare una serie di requisiti che variano da Comune a Comune, quali ad esempio:

- la serra non deve essere riscaldata dall'impianto di climatizzazione dell'edificio cui si appoggia;
- deve essere orientata nell'arco compreso tra sud-est e sud-ovest;
- non deve essere ombreggiata da manufatti e/o piante;
- la superficie vetrata deve essere prevalente, con un rapporto tra superficie vetrata e superficie totale (verticali, orizzontali e inclinate) almeno del 70%; in alcuni casi le amministrazioni esigono il 100%;
- il volume lordo della serra in genere non può superare il 10% del volume riscaldato dell'edificio; (variabile fino al 20%);
- deve prevedere dei sistemi di schermatura estiva dei raggi solari e superfici vetrate apribili per consentire una ventilazione naturale senza pregiudicare la climatizzazione invernale;

- la destinazione funzionale non deve determinare la nascita di un nuovo locale per la presenza continuativa delle persone; in pratica non deve configurarsi legalmente come locale di abitazione e/o luogo di lavoro;
- deve assicurare un guadagno energetico durante la stagione invernale almeno del 20% rispetto alla soluzione senza serra solare (variabile tra il 5% e il 25%)

A livello regionale, quindi, le serre bioclimatiche sono state riconosciute quali valide strategie per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici e ne sono stati pertanto definiti i parametri descrittivi e di calcolo.

Tra le prime regioni ad integrare il sistema serra nella normativa regionale, la regione Umbria che con la L.R. 20 dicembre 2000 n. 38 "Agevolazioni nel calcolo dei parametri urbanistici per il miglioramento del comfort ambientale e del risparmio energetico negli edifici", definisce per la prima volta le serre solari non riscaldate con funzione di captazione solare quali volumi finalizzati espressamente all'ottenimento di comfort ambientale e risparmio energetico attraverso il miglioramento della coibentazione e la captazione diretta dell'energia solare:

In Lombardia, con la delibera n. X/1216 del 10 gennaio 2014, ha approvato un documento denominato "Criteri per il riconoscimento della funzione bioclimatica delle serre e delle logge, ai fini dell'equiparazione a volumi tecnici", di cui alla L.R. 21 dicembre 2004 n. 39.

Nel Lazio, la L.R. 27 maggio 2008 n. 6 determina lo scomputo di volumi urbanistici delle serre solari costruite sia in aderenza che in adiacenza con superficie non superiore al 30% della superficie della unità abitativa realizzata.

La Toscana, la L.R. 24 luglio 2018 n. 39/R decreta lo scomputo dal calcolo della SE (Superficie edificabile) e della CS (Superficie coperta) della serra solare (inclusa però nel calcolo della SA-superficie accessoria), definite come "un elemento di architettura bioclimatica finalizzato ad introitare la radiazione solare coadiuvando nella stagione invernale il riscaldamento dell'edificio o dell'unità immobiliare".

A mero titolo elencativo e a completezza della informazione sulla normativa regionale si citano inoltre:

- Regione Piemonte Legge regionale 28 maggio 2007, n. 13
- Regione Veneto Allegato A, del D.G.R. n. 1781, art. 1, del 8 novembre 2011 La Legge Regione Veneto n. 13/2011
- Regione Friuli Venezia Giulia L. R. 11/11/2009, n. 19, art. 37
- Regione Emilia Romagna L.R. 23/12/2004 n. 26, modificata della L.R. del 22/12/2011 n. 21
- Regione Puglia Art. 11, Legge Regionale, n. 13, "Norme per l'abitare sostenibile"

Dal punto di vista del calcolo per la valutazione del contributo offerto dalla serra solare alla determinazione del fabbisogno per la climatizzazione invernale, il riferimento metodologico è costituito dalle norme UNI TS 11300-1:2014 "Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale" e UNI EN ISO 52016-1:2018 "Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo".

Definiti i parametri geometrici della serra e i parametri termici dei componenti trasparenti e opachi (vetro, telaio, pareti o solai), determinati i coefficienti di riflessione e trasmissione delle schermature, e definiti i volumi di ricambio d'aria tra la serra e l'ambiente interno, la normativa consente di calcolare gli apporti solari attraverso le superfici di partizione con la zona climatizzata, la temperatura interna della serra in regime invernale ed estivo e i relativi scambi energetici per trasmissione, da utilizzare poi per il calcolo del fabbisogno di energia primaria specifico per la climatizzazione invernale.

2.3 Analisi dei dati climatici per la caratterizzazione del contesto climatico del sito che ospita la piattaforma dimostrativa serra bioclimatica-edificio.

La localizzazione dell'edificio è un fattore determinante nel calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio in uso e, conseguentemente, nel determinare i potenziali impatti sul consumo di energia legati alla scelta di un sistema di copertura.

Una accurata valutazione della prestazione dell'edificio, si basa su una altrettanto accurata selezione dei dati climatici di input. La qualità del database climatico è un elemento indispensabile per una corretta progettazione sostenibile degli edifici poiché è in grado di incidere in maniera significativa sulle strategie progettuali e sulla accuratezza della progettazione dei carichi e sul calcolo del consumo energetico. Negli ultimi anni, sono stati impiegati diversi tipi di dati climatici quale base per la valutazione comportamento energetico degli edifici e la loro risposta prestazionale ai sempre più estremi stress climatici. In una progettazione sempre più orientata al raggiungimento di elevate prestazioni energetiche, l'analisi e la valutazione della consistenza e rappresentatività dei dati climatici diventano elementi cruciali di una corretta progettazione, quanto degli edifici che degli impianti.

Purtroppo le banche dati a disposizione del progettista per la raccolta di informazioni climatiche da impiegare all'interno dei software di simulazione energetica sono ancora scarse, incomplete e difficilmente accessibili. E soprattutto, ove i dati climatici fossero disponibili, questi raramente sono raccolti e organizzati in formati adatti alla importazione nei software di simulazione.

Per le valutazioni energetiche dettagliate è necessario avere a disposizione la sequenza dei valori orari delle grandezze meteorologiche. E' necessario costruire un "anno tipo" elaborando statisticamente dati climatici misurati su lungo periodo (almeno 20 anni)

Il software EnergyPlus, infatti, dispone di una banca dati internazionale contenente profili climatici di località diverse nel mondo, elaborati su profilo orario e raccolti in un file zip che contiene il file climatico nativo *.epw, un report informativo sul dato specifico (*.stat) e di un file di supporto alla modellazione climatica contenente i dati relativi ai giorni di progetto di riferimento per la località specifica (ASHRAE Design Conditions Design Day Data file - *.ddy).

All'interno di questa banca dati, è disponibile una sezione dedicata ai profili climatici di alcune città italiane (NREL DOE Dati meteo per Energy+: <http://www.nrel.gov>¹)

Il Database italiano di riferimento per l'applicazione Energy Plus è costituito dalla banca dati IGDG "Gianni De Giorgio"² realizzata nell'anno 1979 dall'IFA (Istituto di Fisica dell'Atmosfera del CNT) all'interno del Progetto Finalizzato Energetica. I dati climatici sono stati raccolti dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (68 stazioni sparse in modo piuttosto omogeneo sul territorio nazionale), in maniera praticamente continua nel periodo 1951-1970. sono state calcolate, per ogni stazione, il valore medio e varianza della temperatura dell'aria per ogni mese dell'anno sull'intera popolazione. La stessa operazione è stata poi ripetuta per ogni singolo mese di ogni singolo anno. È stato quindi selezionato quale mese tipo più rappresentativo quello con valore medio e varianza della temperatura dell'aria più prossimi ai valori calcolati per quel mese sull'intera popolazione. L'anno tipo (TRY o Test Reference Year) è stato infine costruito come composizione dei mesi tipo.

Generato così l'anno tipo, che è costituito da una sequenza di mesi reali (cioè effettivamente verificatisi) provenienti da anni diversi, sono stati estratti dall'insieme dei dati e aggiunti alla temperatura dell'aria (dati orari ottenuti per interpolazione dai dati orari) le altre grandezze meteorologiche:

- la velocità del vento a 10 metri dal suolo (data dalla media aritmetica calcolata nei 10 minuti centrati intorno all'ora sinottica a cui il valore si riferisce);
- l'umidità relativa dell'aria al suolo;
- il numero di ore e di decimi di ora di sole verificatesi nell'intera giornata.

A tali dati, disponibili per ognuna delle 68 stazioni è stata aggiunta quando disponibile, la irradiazione solare oraria diretta e diffusa elaborata appunto secondo il metodo De Giorgio.

Una analisi dei record contenuti nel database De Giorgio, ha permesso di evidenziare alcune lacune strutturali della banca dati che risulta ormai antiquata dal momento che e i dati climatici, della T° oraria dell'aria esterna ad esempio, non descrivono l'attuale scenario meteorologico ed ignorano i mutamenti climatici dell'ultimo decennio.

¹http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=ITA/cname=Italy

² http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/italia_dati_climatici_g_de_giorgio.pdf

All'interno del database EnergyPlus, sono stati pertanto indagati anche i file climatici IWEC (International Weather for Energy Calculations) elaborati dal Numerical Logistics and Bodycote Materials Testing Canada all'interno del progetto ASHRAE Research Project 1015 [4]. Il progetto ha elaborato in formato EnergyPlus dati climatici di oltre 227 località al di fuori di Stati Uniti e Canada, derivati da oltre 18 anni di monitoraggio orario, svolto presso il U. S. National Climatic Data Center, dei parametri climatici, raccolti in formato ASCII *data set* DATSAV3. I dati raccolti sono stati successivamente integrati con riferimenti estimativi della radiazione solare calcolata a partire dalla geometria del percorso solare e integrati da informazioni aggiuntive quali la presenza e distribuzione di nuvolosità.

Oltre ai IGDG e ai dati IWEC, sono disponibili per il contesto italiano, altre fonti di dati climatici, non sempre però esaustive rispetto alle richieste di input del software. I dati climatici ricavati da tali banche dati necessitano comunque di essere rielaborati e ricostruiti in formato idoneo all'importazione nel software.

Di seguito alcune delle fonti da cui è possibile ricavare dati climatici:

- UNI 13049:1994
- Dati climatici per la progettazione edile ed impiantistica - CNR PFE, 1982.
- Profilo climatico d'Italia – ENEA, 1999
- MeteoNorm - WMO: <http://www.meteotest.ch/>
- Satel-light: <http://www.satel-light.com/>
- National Oceanic Atmospheric Administration: <http://www.noaa.gov/>
- Società Italiana Meteorologia: <http://www.nimbus.i>

File climatici annuali specifici completi possono essere costruiti a partire dal database presente sul sito <http://www.ilmeteo.it/>

E' da considerare che la norma UNI 10349:1994 sui cui è basata l'attuale normativa energetica italiana, così come peraltro le pubblicazioni CNR ed ENEA tracciano un profilo climatico dello stivale ormai datato e non più rappresentativo del reale andamento climatico.

La fonte più attuale di informazioni climatiche sulle diverse realtà Italiane, è ancora rappresentata dall'Archivio meteorologico dell'Aeronautica militare³ che dispone sia di **dati di archivio**, ossia messaggi meteorologici d'osservazione pregressi, presenti nella Banca Dati Climatologica, o prodotti di elaborazioni statistiche, sia di **dati in tempo reale**, costituiti sia da messaggi meteorologici d'osservazione, sia da prodotti di previsione.

Per soddisfare gli obiettivi del presente lavoro di ricerca, i dati climatici di riferimento per le simulazioni sono stati selezionati tra quelli presenti nel database EnergyPlus, avendo cura di scegliere, tra i dati presenti, quelli potenzialmente più simili rispetto alla localizzazione specifica dell'edificio oggetto di studio, sulla base di Lat. e Long.

I dati climatici sono stati elaborati sulla base del file :

- Roma, zona climatica D - ITA_Roma-Ciampino.162390_IGDG.epw

2.4 Parametri di progettazione e modello di serra bioclimatica associato all'edificio localizzato presso il centro Casaccia dell'Enea valutato tramite Energy Plus

L'edificio oggetto di studio si trova all'interno del Centro Ricerche Casaccia, il più grande complesso di laboratori ed impianti dell'ENEA. Sorge sulla via Anguillarese, circa 25 km a nord-ovest di Roma, presso il lago di Bracciano. Il suo nome deriva dalla fattoria "La Casaccia" attorno alla quale sorsero, nel 1959, i primi

³ http://www.meteoam.it/?q=dati_in_tempo_reale

laboratori in cui operavano poche decine di ricercatori, che hanno costituito il nucleo originario di quella che è oggi una delle principali sedi di ricerca interdisciplinare in ambito nazionale.

Le attività progettuali sono state condotte sull'edificio F92, denominato "Scuola delle Energie", situato presso il Centro Casaccia dell'ENEA. Si tratta di una villetta monofamiliare, con piano semi interrato, due fuori terra con copertura piana a lastrico solare, con una superficie complessiva di circa 230 mq² : qui ha sede il laboratorio per la nuova casa del futuro, dove tecnologie, comfort ed ecosistema trovano un punto di convergenza grazie all'ENEA. L'edificio che ospita la Scuola è stato realizzato dall'Enea con criteri di alta efficienza energetica e soggetto, negli ultimi anni, a numerosi interventi di riqualificazione energetica quali ad esempio la realizzazione di un tetto verde (Figura 1) e l'installazione di una parete verde verticale (Figura 2).

Sia la copertura a prato che la parete verde sono stati oggetto di precedenti indagini sul comportamento energetico e ambientale, condotte da questa unità di ricerca per conto di ENEA.¹

Dispone di una *hall* tecnologica, di aule e impianti "a vista" ed è stato concepito come laboratorio per l'applicazione di nuove soluzioni impiantistiche per il riscaldamento e il condizionamento dell'aria, assistite da fonti rinnovabili.

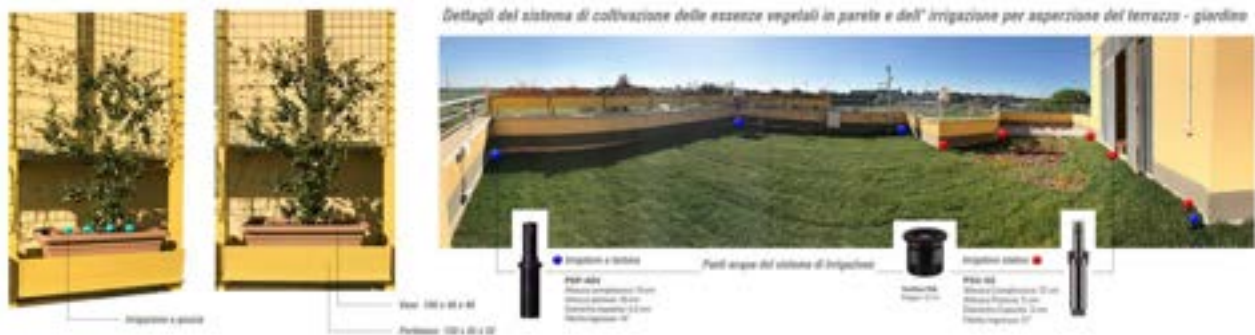


Figura 1 Particolare del prototipo tetto-giardino sull'edificio Scuola delle Energie



Figura 2 Prototipo della parete-verde sull'edificio Scuola delle Energie

Il progetto della serra bioclimatica prevede la realizzazione, su porzione di terrazzo del piano di primo (Figura 3), di una serra a ridosso del parapetto della terrazza, con tre lati trasparenti e copertura inclinata anch'essa trasparente.

L'accesso alla serra è dall'esterno.

La serra avrà una superficie coperta di 7,5 mq per un volume complessivo di 20 m³ ed esposizione sud-ovest, struttura in scatolari in acciaio con struttura trasparente verticale a vetro 5 mm con finestrature scorrevoli su binari a tutta superficie e struttura trasparente inclinata (una falda) composta da lastra in policarbonato compatto di spessore 10 mm, con trattamento anti-UV.

La superficie inclinata e le finestrature verticali della serra sono protette internamente con una schermatura solare interna mobile a capanno con guide laterali (binari) a struttura fissa con funzionamento automatico azionato da motori elettrici su tutta la lunghezza.

E' prevista anche l'installazione di un sistema schermante mobile verticale per le pareti laterali comprensivo di schermatura della porta e di una schermatura solare mobile esterna alla struttura mobile con guide laterali (binari) a struttura fissa con funzionamento automatico azionato da motori elettrici su tutta la lunghezza della parete inclinata (falda) fino alle finestrate verticali.

In merito al tipo di schermatura, ai materiali e alla programmazione dei cicli automatici di apertura/chiusura saranno avanzate delle ipotesi.

Ai fini della ricerca, quindi, è stata simulata la situazione più gravosa relativamente ai carichi estivi, ipotizzando la sola presenza di un sistema schermante interno lungo la falda inclinata e la parete verticale esposta a Sud-Ovest della serra.

Analogamente, la vetratura a colmo di falda sarà provvista di apertura basculante, ma in prima istanza la simulazione ha considerato la situazione più gravosa di involucro vetrato completamente chiuso.

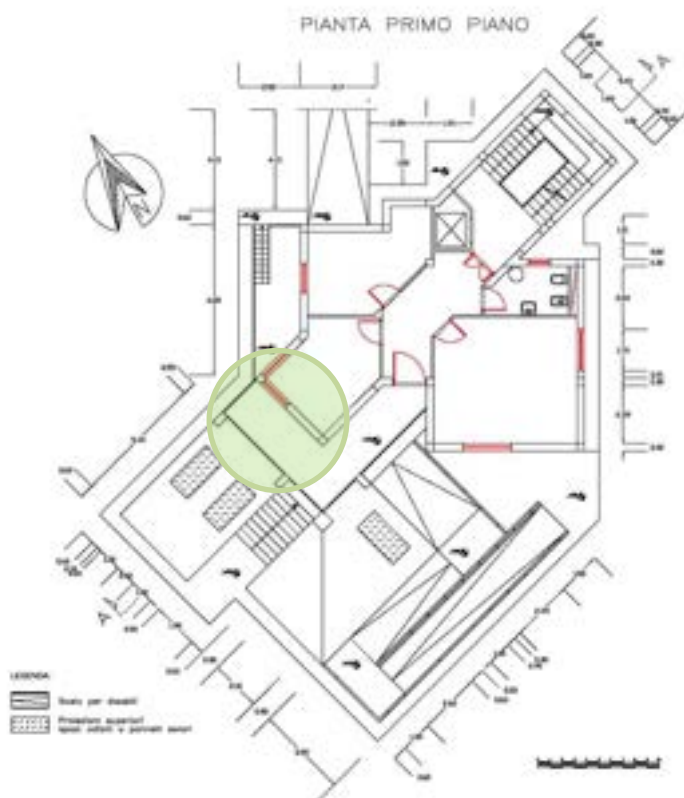


Figura 3 Planimetria del piano primo con evidenziata l'area di realizzazione della serra

La Figura 3 e la Figura 4 riportano il dettaglio delle dimensioni e della geometria della serra. Le immagini di Figura 5 e Figura 6 rappresentano il rendering del progetto.

Progetto serra captante

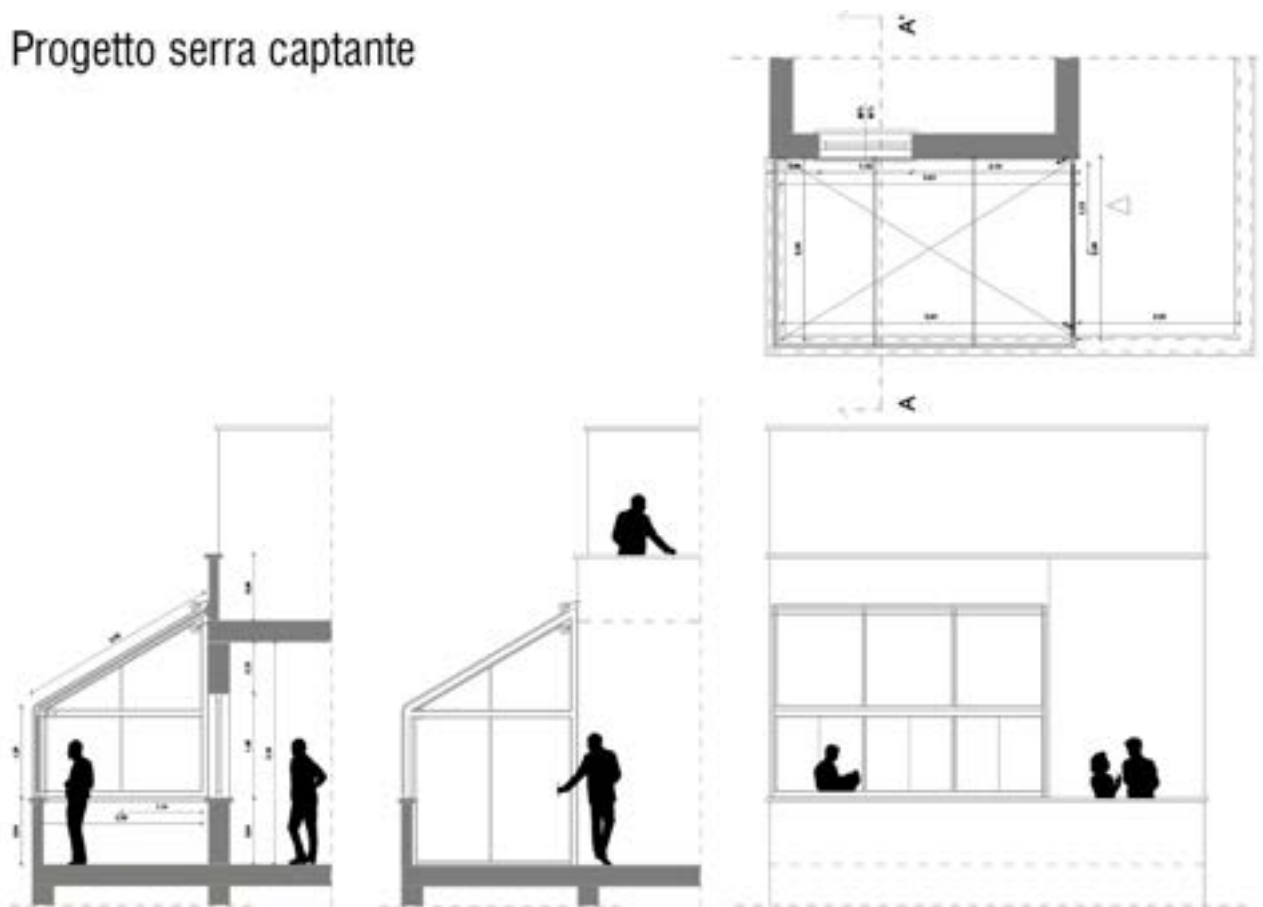


Figura 4 Progetto serra bioclimatica



Figura 5 Rendering del progetto della serra – vista laterale



Figura 6 Rendering del progetto – vista frontale

2.4.1 Il modello geometrico – Google SketchUp

Il software Energyplus non dispone di una interfaccia grafica e la costruzione del modello geometrico passerebbe attraverso una complessa ricostruzione dei riferimenti cartesiani di ognuno degli elementi d’involucro (pareti, coperture, solai, infissi, schermi aggetti, ecc...)

Per ovviare a questa mancanza e per rendere più facilmente gestibile e controllabile la correttezza della costruzione del modello geometrico descrittivo dell’edificio da simulare, EnergyPlus dispone di una serie di Plug-in che consentono di disegnare l’edificio e le sue parti, definendone direttamente sul disegno, alcune proprietà (orientamento, materiali, stratigrafia, zona termica di appartenenza) riconosciute da Energyplus per la simulazione del comportamento energetico.

I due Plug-in di riferimento, in grado di operare in maniera combinata, che sono stati impiegati per la realizzazione del modello di calcolo dei due edifici di riferimento sono Google SketchUp e Euclid.

Google Sketchup consente di disegnare, anche a partire da un rilievo digitale o vettoriale, il modello tridimensionale dell’edificio e di collocarlo in un luogo specifico attraverso l’integrazione con il modulo 3D di Google Earth.

Nelle Figura 7 e Figura 8 sono riportati i due modelli grafici utilizzati quale base per le simulazioni di EnergyPlus.

Il modello è stato costruito rispettando il reale orientamento dell’edificio esistente (84’ Sud).

Il modello di Figura 7 corrisponde al progetto reale della serra bioclimatica, realizzata sulla terrazza del piano primo dell’edificio, in aderenza alla parete esterna esposta a Sud-Ovest.

Il modello di Figura 8, invece, costituisce una variante progettuale in cui la parete di tamponamento di separazione tra la serra e il piano primo dell’edificio, è stata demolita in modo da ampliare la zona di influenza della serra stessa, attualmente limitata dalla presenza della sola finestra. Alla serra, infatti, si accede esclusivamente uscendo dall’edificio sulla terrazza e non esiste comunicazione diretta tra il piano primo e la serra. Gli scambi termici tra la serra e l’interno sono quindi limitati alla trasmissione di energia termica e luminosa attraverso gli elementi vetrati della finestra e vincolati alla apertura manuale della stessa. La demolizione della parete di tamponamento e la creazione di un ambiente ibrido opaco/trasparente consente di valutare con maggiore efficacia il contributo della serra: si è pertanto ritenuto interessante valutare il comportamento dell’edificio così modificato.

Il modello SketchUp è stato composto con 5 Zone Termiche diverse, come in Tabella 1

Tabella 1 Elenco delle Zone Termiche di analisi

ZONE NON RISCALDATE	ZONE RISCALDATE
Piano Interrato	Piano Terra
Vano Scale	Piano Primo
	Serra

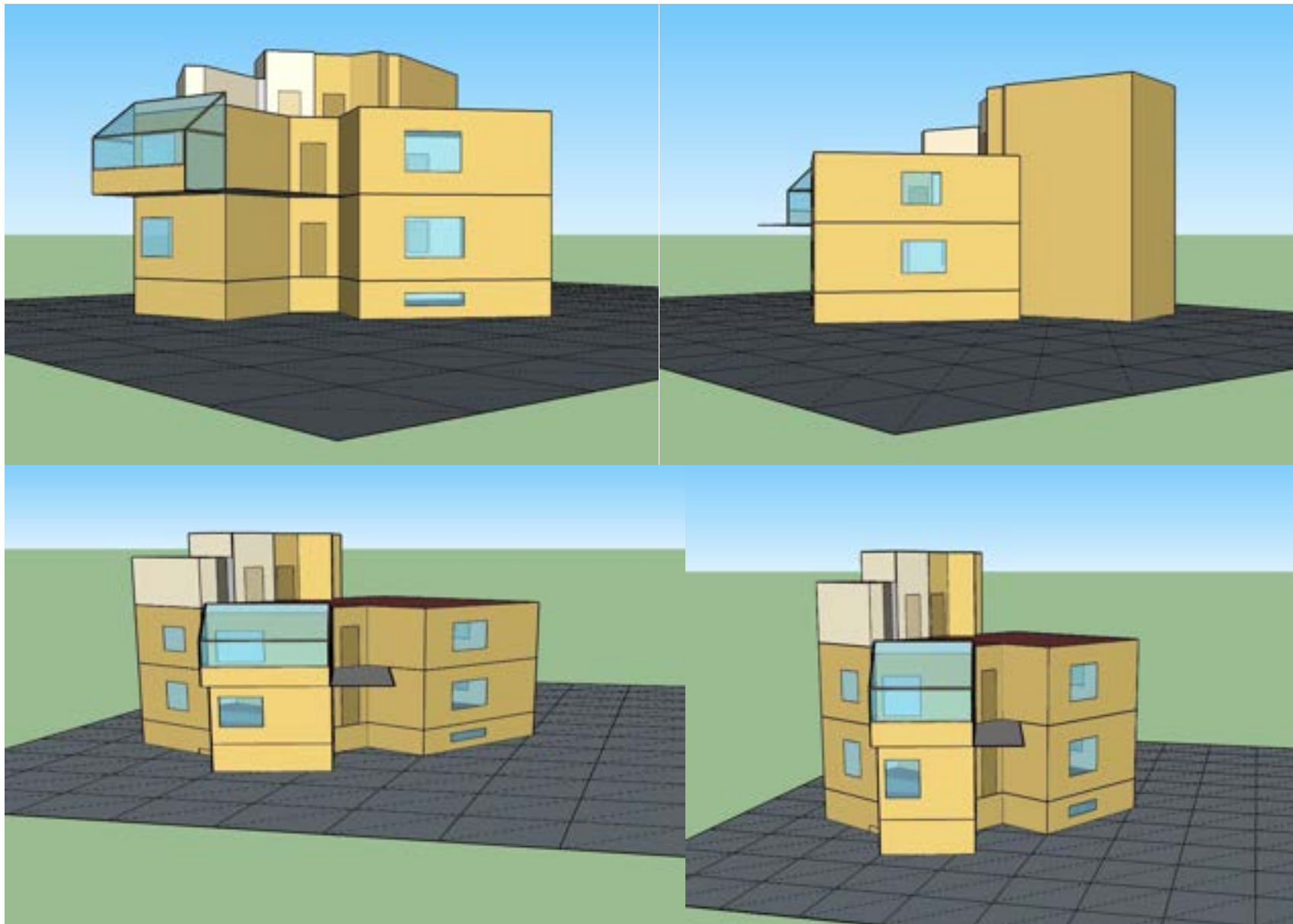


Figura 7 modello SketchUp della serra bioclimatica, come da progetto ENEA

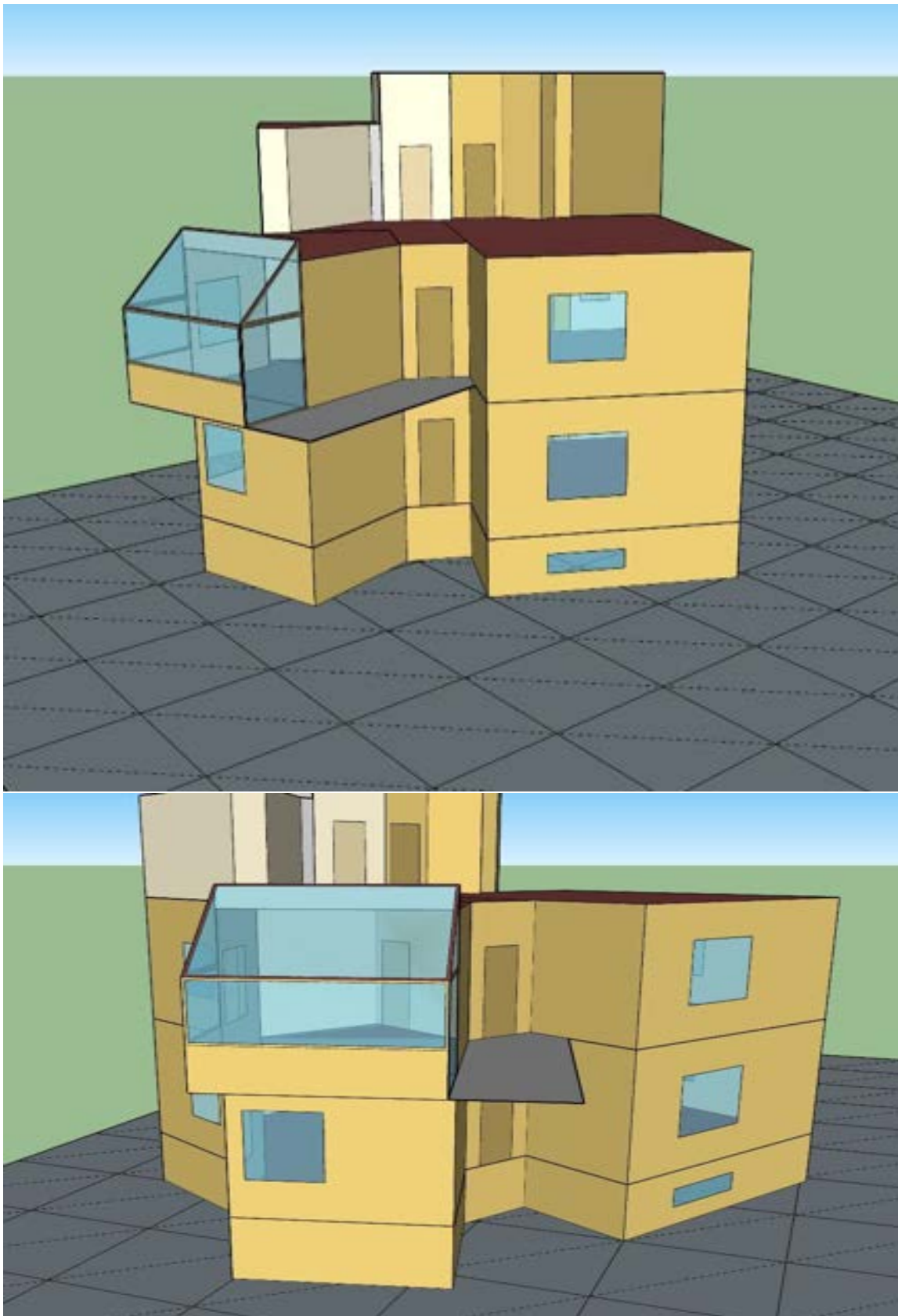


Figura 8 modello Sketchup dell'edificio Scuola dell'Energia, modificato con l'ampliamento della serra e la demolizione della parete di tamponamento

2.5 Identificazione dei parametri fisico-tecnici che condizionano i flussi energetici tra la serra bioclimatica e l'edificio ai fini dell'efficienza energetica

L'edificio oggetto di studio ha una struttura a telaio in c.a. con tamponamento in laterizio.

Non essendo disponibili informazioni specifiche sulla stratigrafia degli elementi orizzontali e verticali, la configurazione degli elementi di chiusura dell'involucro e dei divisori interni è stata ipotizzata sulla base della tipologia edilizia e della epoca di costruzione.

In linea generale, è stata ipotizzato un tamponamento in muratura di laterizio pieno con solai orizzontali in laterocemento e copertura piana calpestabile.

I dettagli delle stratigrafie con i relativi valori termoigrometrici utilizzati per il calcolo in dinamico, sono riportati nelle schede dell'Allegato A.

Il tetto giardino è stato configurato secondo le indicazioni fornite da ENEA, come da Figura 9.

Il comportamento del tetto giardino è stato simulato attraverso il modulo RoofIrrigation di EnergyPlus secondo quanto già verificato nel corso della ricerca "Validazione di modelli di simulazione semplificati per il bilancio energetico dei fabbricati dotati di coltri vegetali", condotta da questa unità di ricerca per conto di ENEA e al cui rapporto si rimanda per i dettagli tecnici⁴.

E' stato altresì configurato un piano di irrigazione meccanica della copertura, programmata giornalmente tra le 06:00 e le 08:00 del mattino e tra le 19:00 e le 21:00 per un totale di circa 12,3 mm/settimana, pari a 52,8 mm/mese.

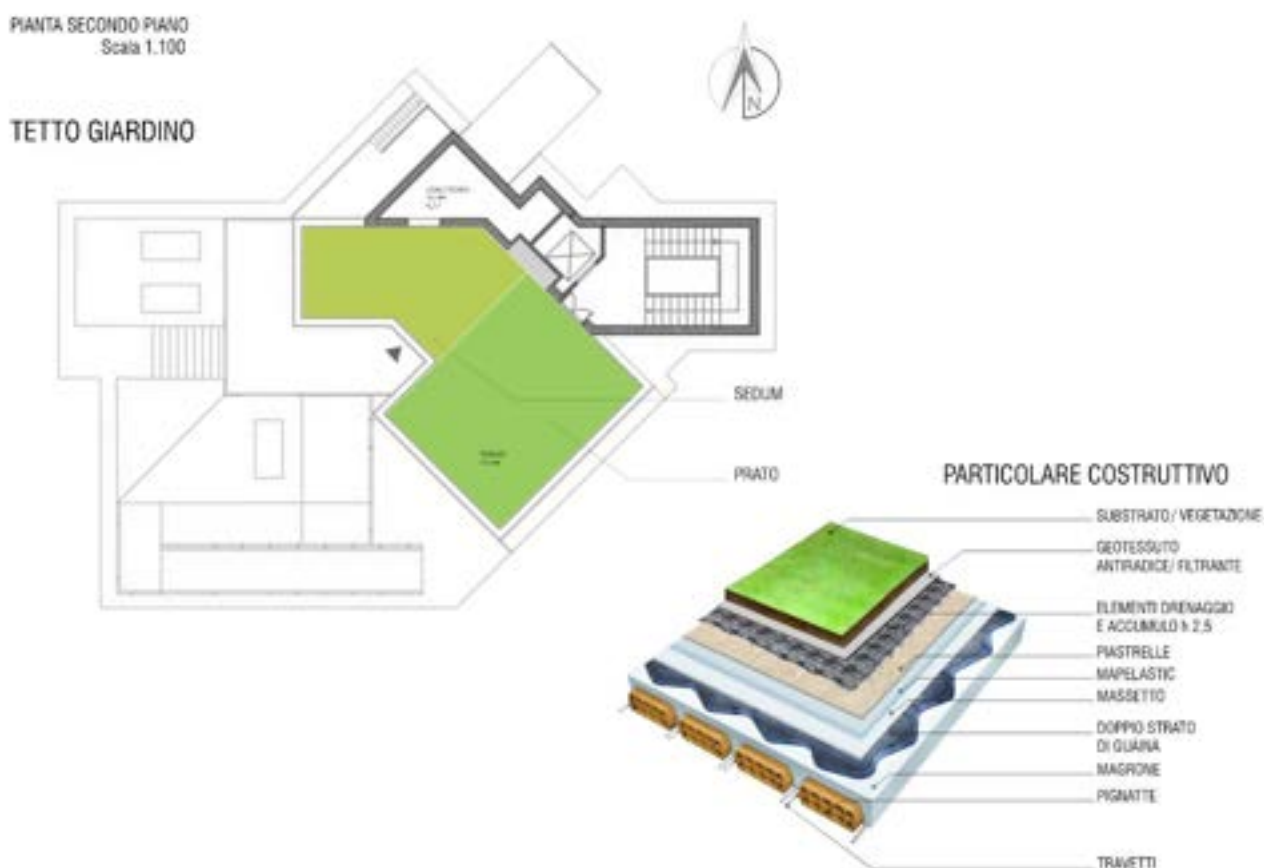


Figura 9 pianta e sezione della copertura a verde sulla copertura della Scuola delle Energie

Le prestazioni termo-igrometriche degli elementi vetrati ed in particolare degli elementi della serra, sono stati calcolati attraverso il software Window 7.6.

⁴ Si veda a proposito Report RdS/PAR2013/136 e Report RdS/PAR2013/139

Le finestre esistenti sono caratterizzate da telaio in alluminio e vetro doppio 5-12-5. Sono provviste di avvolgibili standard per i quali si è ipotizzata una apertura nei giorni feriali dalle 7 alle 17:00 e la chiusura totale nei giorni festivi.

La serra è costituita da elementi vetrati di diversa natura.

Vetro singolo 5 mm per gli elementi verticali e policarbonato per la falda inclinata.

Le caratteristiche solari degli elementi sono riportate in Figura 10 e in Figura 11.

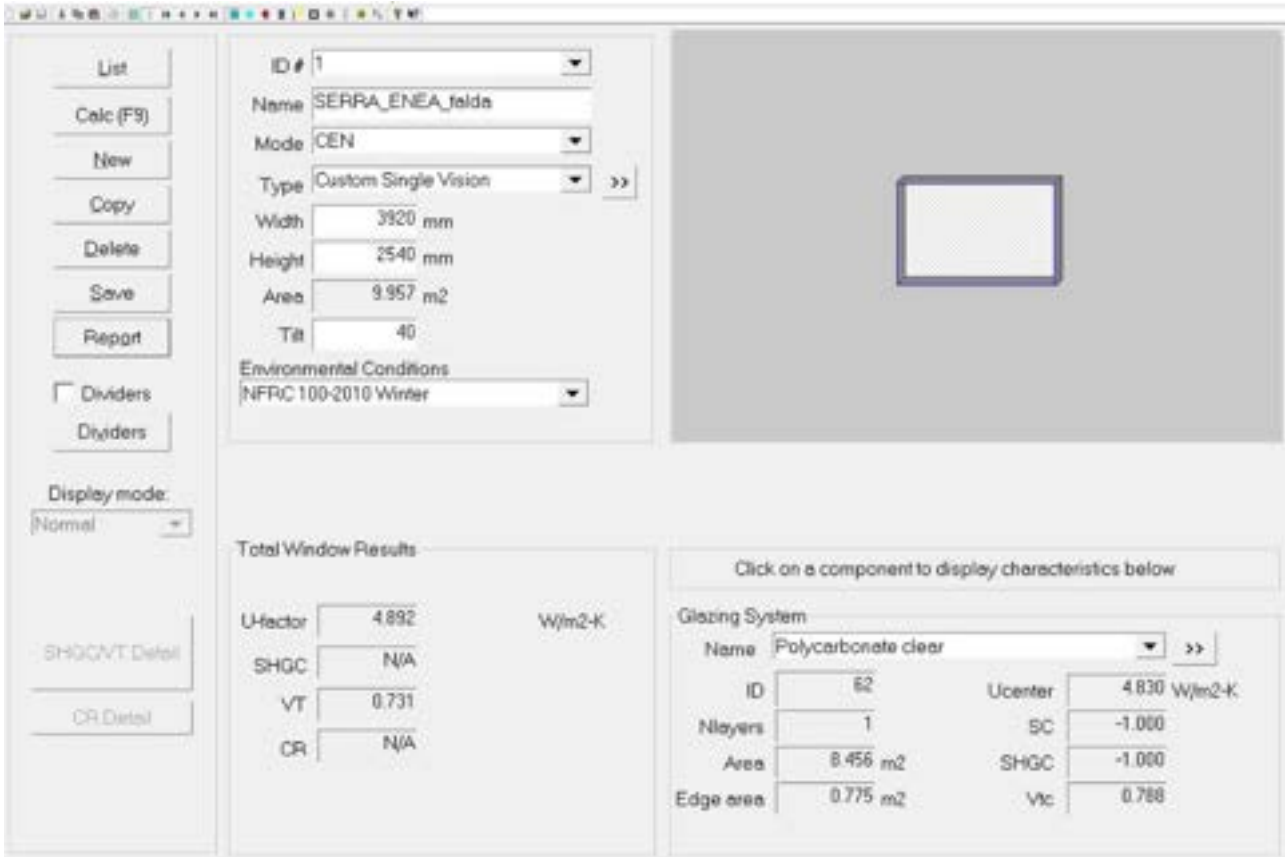


Figura 10 caratteristiche solari del vetro singolo degli elementi verticali della serra

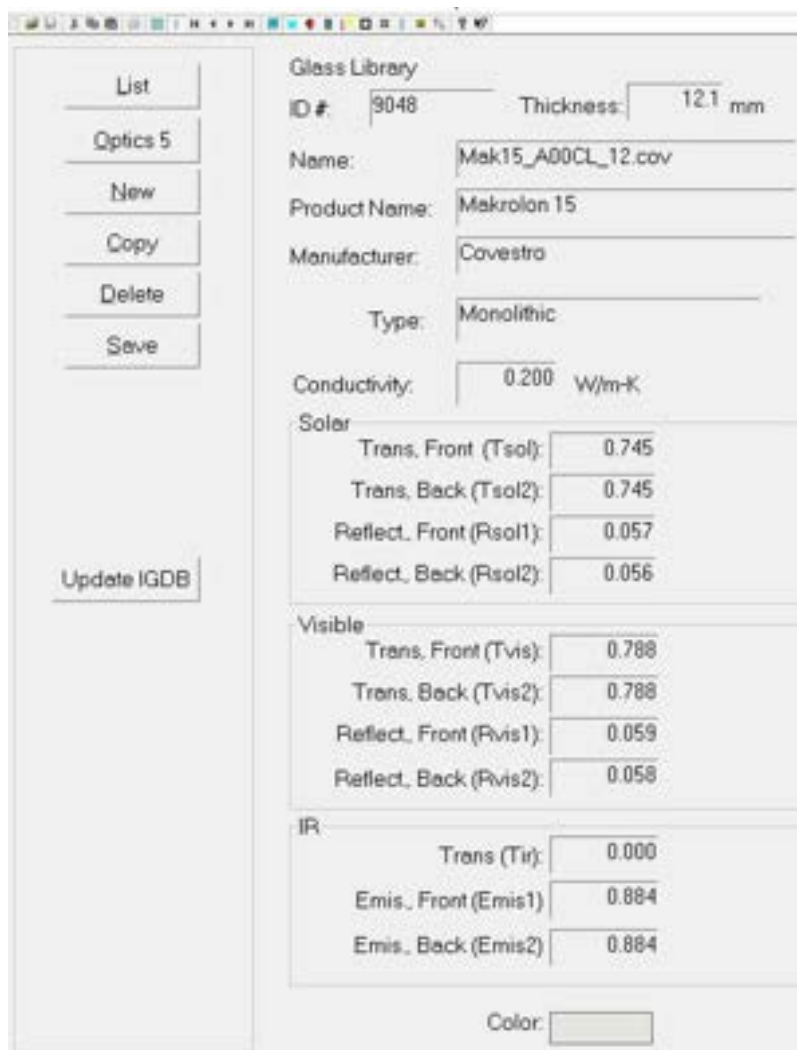


Figura 11 caratteristiche solari del policarbonato della serra

Gli elementi vetrati della serra sono schermati internamente con una tenda scorrevole in tessuto, spessore 1,5 mm color crema, avente le caratteristiche riportate in Figura 12.

Non è prevista alcuna apertura della serra, né nel periodo invernale né in quello estivo ma, con particolare riferimento al controllo del surriscaldamento durante il periodo estivo, è stata simulata una chiusura automatica delle schermatura in relazione ai livelli di irraggiamento sulla superficie vetrata, con chiusura durante il periodo estivo tra le 13:00 e le 17:00 nei soli giorni feriali e chiusura per l'intera giornata nei giorni festivi e, nel periodo invernale, con chiusura limitata tra le 13:00 e le 14:00 dei giorni feriali e chiusura totale nei giorni festivi.

Per verificare eventuali miglioramenti prestazionali con particolare riferimento al periodo estivo, è stata simulata anche una configurazione variata della serra ampliata in cui le vetrate di cui alla Figura 10 e Figura 11 sono sostituite con un vetro basso emissivo come in Tabella 2. Si tratta di una vetratura doppia composta da un vetro Solar-E™ float chiaro con rivestimento pirolitico basso emissivo e proprietà di controllo solare, in grado di migliorare il controllo solare di una vetratura isolante.

Per migliorare ulteriormente le prestazioni di isolamento termico è stato assemblato in vetratura doppia con un secondo vetrato basso emissivo, con intercapedine (20mm) Aria 10% e Argon 90%

Tabella 2 Proprietà del vetro basso emissivo di progetto

BERKELEY LAB WINDOW v7.6.4.0 Glazing System Thermal and Optical Properties	
Name	: SERRA ENEA A+ LowE
Tilt	: 90.0

Glazings: 2 KEFF : 0.1251 Width : 27.700 Uvalue : 1.98 SHGCc : 0.46 Scc : 0.53 Vtc : 0.51 RHG : 347.18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Layer Data for Glazing System '63 SERRA ENEA A+ LowE' <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Name</th> <th>D(mm)</th> <th>Tsol</th> <th>1 Rsol</th> <th>2 Tvis</th> <th>1 Rvis</th> <th>2 Tir</th> <th>1 Emis</th> <th>2 Keff</th> <th colspan="3"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="13">-----</td> </tr> <tr> <td colspan="13">Outside</td> </tr> <tr> <td>20107</td> <td>SolarEclear4mm.#</td> <td>3.9</td> <td>.458</td> <td>.118</td> <td>.075</td> <td>.583</td> <td>.089</td> <td>.075</td> <td>.000</td> <td>.181</td> <td>.843</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td colspan="3">9 Air (10%) / Ar 20.0 SF6: 0% Ar: 0%</td> <td colspan="3"></td> <td colspan="3">.094</td> </tr> <tr> <td>3291</td> <td>CGIS-20c4.0.grd#</td> <td>3.8</td> <td>.755</td> <td>.096</td> <td>.094</td> <td>.873</td> <td>.092</td> <td>.092</td> <td>.000</td> <td>.840</td> <td>.198</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td colspan="13">Inside</td> </tr> </tbody> </table> Environmental Conditions: 1 NFRC 100-2010 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tout</th> <th>Tin</th> <th>WndSpd</th> <th>Wnd Dir</th> <th>Solar</th> <th>Tsky</th> <th>Esky</th> <th colspan="6"></th> </tr> <tr> <th>(C)</th> <th>(C)</th> <th>(m/s)</th> <th>(W/m2)</th> <th>(C)</th> <th colspan="7"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="13">-----</td> </tr> <tr> <td>Uvalue</td> <td>-18.0</td> <td>21.0</td> <td>5.50</td> <td>Windward</td> <td>0.0</td> <td>-18.0</td> <td>1.00</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td>Solar</td> <td>32.0</td> <td>24.0</td> <td>2.75</td> <td>Windward</td> <td>783.0</td> <td>32.0</td> <td>1.00</td> <td colspan="5"></td> </tr> </tbody> </table> Optical Properties for Glazing System '63 SERRA ENEA A+ LowE' <table border="1"> <thead> <tr> <th>Angle</th> <th>0</th> <th>10</th> <th>20</th> <th>30</th> <th>40</th> <th>50</th> <th>60</th> <th>70</th> <th>80</th> <th>90</th> <th>Hemis</th> <th colspan="1"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Vtc</td> <td>: 0.512</td> <td>0.515</td> <td>0.508</td> <td>0.499</td> <td>0.486</td> <td>0.460</td> <td>0.402</td> <td>0.293</td> <td>0.136</td> <td>0.000</td> <td>0.427</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rf</td> <td>: 0.121</td> <td>0.113</td> <td>0.111</td> <td>0.114</td> <td>0.125</td> <td>0.145</td> <td>0.185</td> <td>0.280</td> <td>0.508</td> <td>0.999</td> <td>0.173</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rb</td> <td>: 0.150</td> <td>0.144</td> <td>0.143</td> <td>0.147</td> <td>0.160</td> <td>0.188</td> <td>0.248</td> <td>0.385</td> <td>0.642</td> <td>1.000</td> <td>0.226</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tsol</td> <td>: 0.368</td> <td>0.370</td> <td>0.364</td> <td>0.356</td> <td>0.346</td> <td>0.326</td> <td>0.283</td> <td>0.204</td> <td>0.092</td> <td>0.000</td> <td>0.303</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rf</td> <td>: 0.139</td> <td>0.132</td> <td>0.130</td> <td>0.132</td> <td>0.143</td> <td>0.162</td> <td>0.198</td> <td>0.288</td> <td>0.511</td> <td>0.999</td> <td>0.187</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rb</td> <td>: 0.136</td> <td>0.133</td> <td>0.132</td> <td>0.135</td> <td>0.145</td> <td>0.167</td> <td>0.218</td> <td>0.335</td> <td>0.570</td> <td>1.000</td> <td>0.201</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Abs1</td> <td>: 0.440</td> <td>0.444</td> <td>0.452</td> <td>0.456</td> <td>0.456</td> <td>0.457</td> <td>0.465</td> <td>0.463</td> <td>0.366</td> <td>0.001</td> <td>0.447</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Abs2</td> <td>: 0.054</td> <td>0.054</td> <td>0.055</td> <td>0.055</td> <td>0.056</td> <td>0.056</td> <td>0.054</td> <td>0.046</td> <td>0.031</td> <td>0.000</td> <td>0.052</td> <td></td> </tr> <tr> <td>SHGCc</td> <td>: 0.459</td> <td>0.462</td> <td>0.458</td> <td>0.451</td> <td>0.441</td> <td>0.421</td> <td>0.379</td> <td>0.295</td> <td>0.160</td> <td>0.000</td> <td>0.395</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tdw-K</td> <td>: 0.383</td> <td colspan="11"></td> </tr> <tr> <td>Tdw-ISO</td> <td>: 0.478</td> <td colspan="11"></td> </tr> <tr> <td>Tuv</td> <td>: 0.352</td> <td colspan="11"></td> </tr> </tbody> </table> Temperature Distribution (degrees C) <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Winter</th> <th colspan="2">Summer</th> <th colspan="2"></th> </tr> <tr> <th>Out</th> <th>In</th> <th>Out</th> <th>In</th> <th colspan="2"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="6">-----</td> </tr> <tr> <td>Lay1</td> <td>-15.1</td> <td>-14.8</td> <td>50.5</td> <td>50.9</td> <td colspan="1"></td> </tr> <tr> <td>Lay2</td> <td>1.7</td> <td>2.0</td> <td>44.1</td> <td>43.9</td> <td colspan="1"></td> </tr> </tbody> </table>													ID	Name	D(mm)	Tsol	1 Rsol	2 Tvis	1 Rvis	2 Tir	1 Emis	2 Keff				-----													Outside													20107	SolarEclear4mm.#	3.9	.458	.118	.075	.583	.089	.075	.000	.181	.843	1.00				9 Air (10%) / Ar 20.0 SF6: 0% Ar: 0%						.094			3291	CGIS-20c4.0.grd#	3.8	.755	.096	.094	.873	.092	.092	.000	.840	.198	1.00	Inside													Tout	Tin	WndSpd	Wnd Dir	Solar	Tsky	Esky							(C)	(C)	(m/s)	(W/m2)	(C)								-----													Uvalue	-18.0	21.0	5.50	Windward	0.0	-18.0	1.00						Solar	32.0	24.0	2.75	Windward	783.0	32.0	1.00						Angle	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Hemis		Vtc	: 0.512	0.515	0.508	0.499	0.486	0.460	0.402	0.293	0.136	0.000	0.427		Rf	: 0.121	0.113	0.111	0.114	0.125	0.145	0.185	0.280	0.508	0.999	0.173		Rb	: 0.150	0.144	0.143	0.147	0.160	0.188	0.248	0.385	0.642	1.000	0.226		Tsol	: 0.368	0.370	0.364	0.356	0.346	0.326	0.283	0.204	0.092	0.000	0.303		Rf	: 0.139	0.132	0.130	0.132	0.143	0.162	0.198	0.288	0.511	0.999	0.187		Rb	: 0.136	0.133	0.132	0.135	0.145	0.167	0.218	0.335	0.570	1.000	0.201		Abs1	: 0.440	0.444	0.452	0.456	0.456	0.457	0.465	0.463	0.366	0.001	0.447		Abs2	: 0.054	0.054	0.055	0.055	0.056	0.056	0.054	0.046	0.031	0.000	0.052		SHGCc	: 0.459	0.462	0.458	0.451	0.441	0.421	0.379	0.295	0.160	0.000	0.395		Tdw-K	: 0.383												Tdw-ISO	: 0.478												Tuv	: 0.352												Winter		Summer				Out	In	Out	In			-----						Lay1	-15.1	-14.8	50.5	50.9		Lay2	1.7	2.0	44.1	43.9	
ID	Name	D(mm)	Tsol	1 Rsol	2 Tvis	1 Rvis	2 Tir	1 Emis	2 Keff																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				

Outside																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
20107	SolarEclear4mm.#	3.9	.458	.118	.075	.583	.089	.075	.000	.181	.843	1.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
			9 Air (10%) / Ar 20.0 SF6: 0% Ar: 0%						.094																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
3291	CGIS-20c4.0.grd#	3.8	.755	.096	.094	.873	.092	.092	.000	.840	.198	1.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Inside																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Tout	Tin	WndSpd	Wnd Dir	Solar	Tsky	Esky																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
(C)	(C)	(m/s)	(W/m2)	(C)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

Uvalue	-18.0	21.0	5.50	Windward	0.0	-18.0	1.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Solar	32.0	24.0	2.75	Windward	783.0	32.0	1.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Angle	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Hemis																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Vtc	: 0.512	0.515	0.508	0.499	0.486	0.460	0.402	0.293	0.136	0.000	0.427																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Rf	: 0.121	0.113	0.111	0.114	0.125	0.145	0.185	0.280	0.508	0.999	0.173																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Rb	: 0.150	0.144	0.143	0.147	0.160	0.188	0.248	0.385	0.642	1.000	0.226																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Tsol	: 0.368	0.370	0.364	0.356	0.346	0.326	0.283	0.204	0.092	0.000	0.303																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Rf	: 0.139	0.132	0.130	0.132	0.143	0.162	0.198	0.288	0.511	0.999	0.187																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Rb	: 0.136	0.133	0.132	0.135	0.145	0.167	0.218	0.335	0.570	1.000	0.201																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Abs1	: 0.440	0.444	0.452	0.456	0.456	0.457	0.465	0.463	0.366	0.001	0.447																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Abs2	: 0.054	0.054	0.055	0.055	0.056	0.056	0.054	0.046	0.031	0.000	0.052																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
SHGCc	: 0.459	0.462	0.458	0.451	0.441	0.421	0.379	0.295	0.160	0.000	0.395																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Tdw-K	: 0.383																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Tdw-ISO	: 0.478																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Tuv	: 0.352																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Winter		Summer																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Out	In	Out	In																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										

Lay1	-15.1	-14.8	50.5	50.9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Lay2	1.7	2.0	44.1	43.9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

Per simulare il reale utilizzo dell'edificio da parte dei ricercatori ENEA, nella simulazione è stato configurato anche un ipotetico carico interno dovuto alla presenza combinata nello spazio adiacente la serra, nei soli giorni feriali e dalle ore 8:00 alle ore 17:00, di 2 persone con attività sedentaria, 2 PC in funzione e 2 lampade da 100 W con accensione programmata in base ai livelli di luminosità dell'ambiente interno.

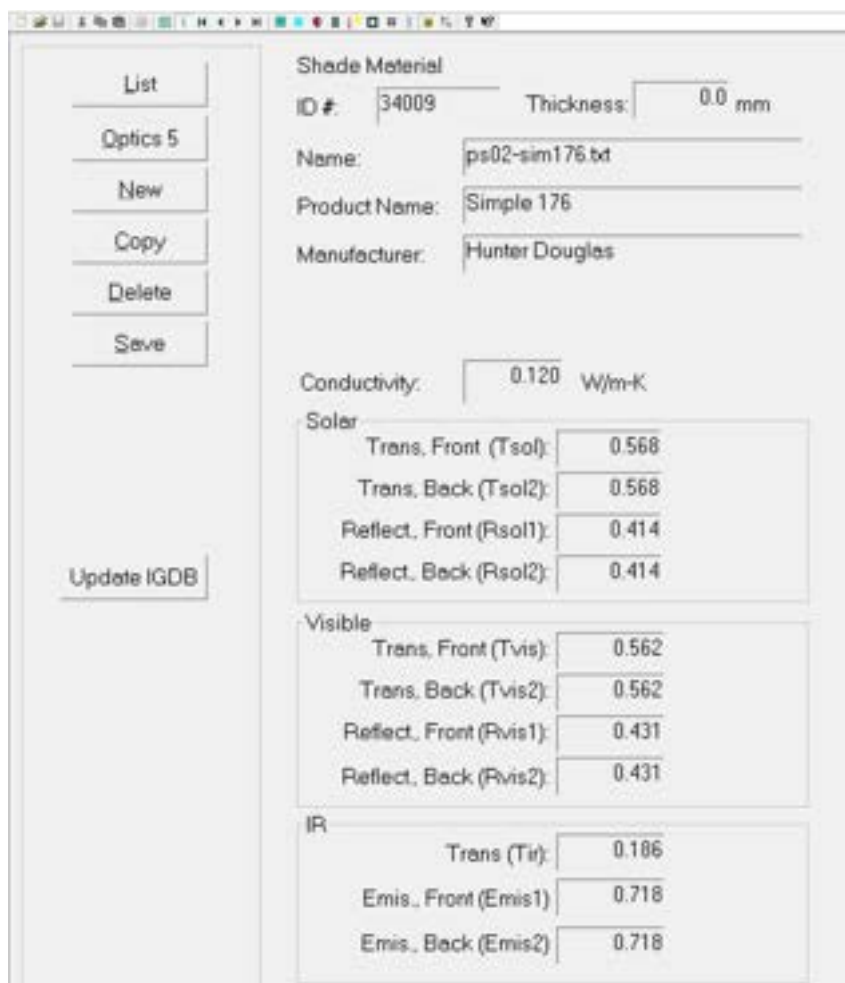


Figura 12 caratteristiche solari della schermatura della serra

2.6 Simulazione del comportamento energetico del fabbricato in assenza/presenza di serra bioclimatica tramite software Energy Plus

Una volta definito il modello geometrico su Sketchup ed impostati i parametri fisici, termoisolativi e temporali per la simulazione, sono stati impostati 7 diversi piani di simulazione dell'edificio denominato Scuola delle Energie, come di seguito specificati

- **MODELLO A:** stato attuale prima della installazione della serra
- **MODELLO B:** stato modificato con serra realizzata in vetro 5 mm e policarbonato come da disegno tecnico di cui alla Figura 4
- **MODELLO C:** stato variato con demolizione della parete tra il piano primo e la serra e ampliamento della zona di lavoro
- **MODELLO D:** stato variato con demolizione della parete tra il piano primo e la serra e ampliamento della zona di lavoro e sostituzione della vetratura di progetto con un vetro A+ Low E come in Tabella 2
- **MODELLO E:** il modello B al quale sono stati applicati i carichi interni (persone, apparecchiature, illuminazione)
- **MODELLO F:** il modello C al quale sono stati applicati i carichi interni (persone, apparecchiature, illuminazione)
- **MODELLO G:** il modello D al quale sono stati applicati i carichi interni (persone, apparecchiature, illuminazione)

A verifica delle ipotesi di miglioramento, è stato costruito il

- **MODELLO H:** il modello B nel quale le vetrate sono state sostituite con un vetro A+ Low E

A valutazione del contributo offerto dalla vetratura ad alte prestazioni al comfort invernale ed estivo.

Per ognuno dei modelli sono stati elaborati i seguenti profili orari, nei due periodi di analisi
INVERNO: dal 21 Novembre al 21 Marzo / ESTATE: dal 21 Giugno al 21 Settembre
 per i seguenti parametri:

- *Temperatura Media Radiante [°C]*
- *Temperatura Operativa [°C]*
- *Radiazione solare totale attraverso le superfici vetrate [kWh]*
- *Apporto Solare Totale attraverso le superfici vetrate [kWh]*

Si riportano di seguito i grafici relativi ai risultati delle simulazioni condotte per le sole zone riscaldate PIANO PRIMO e SERRA, per ognuno dei modelli di analisi sopra descritti.

Nel Modello A, la zona termica denominata UFFICIO corrisponde all'area colorata in blu della planimetria di Figura 13, la zona termica PIANO PRIMO, corrisponde all'area colorata in grigio.

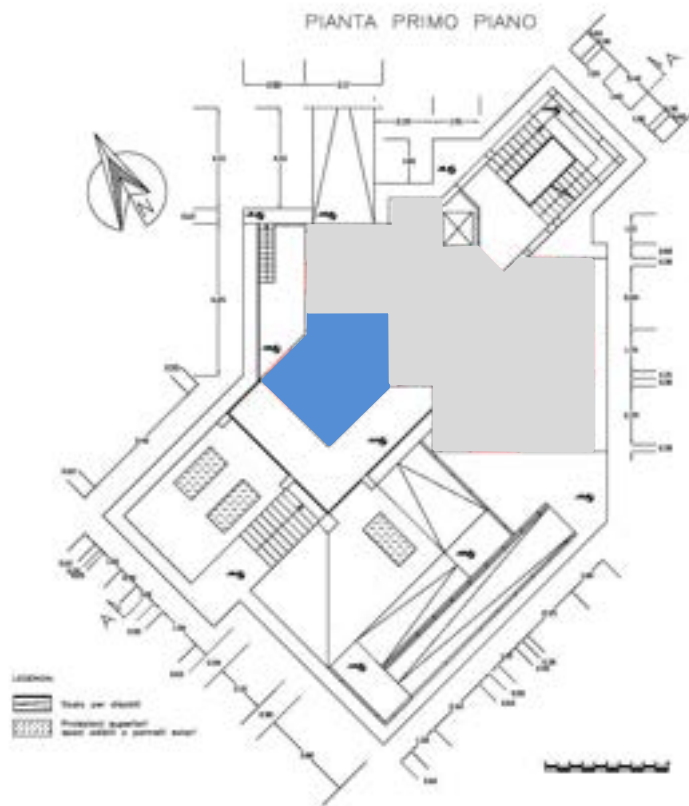


Figura 13 MODELLO A Individuazione delle Zone Termiche di analisi

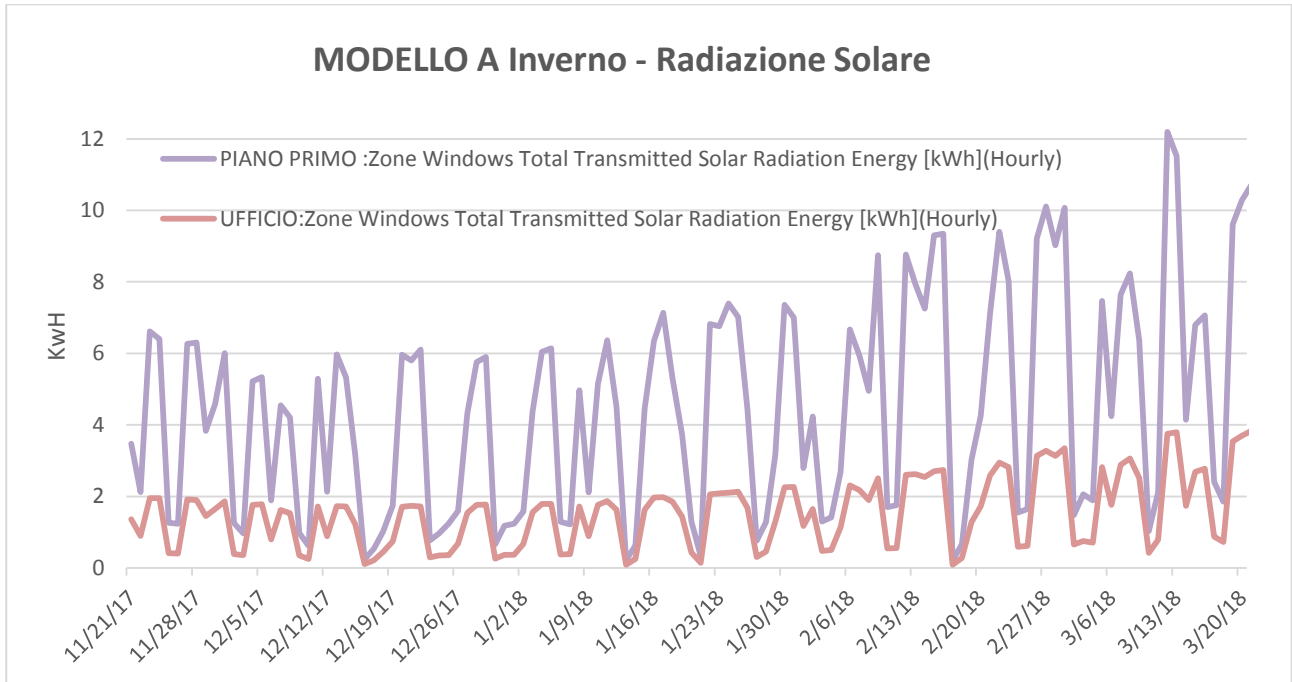


Grafico 1 MODELLO A Radiazione solare Totale in Inverno

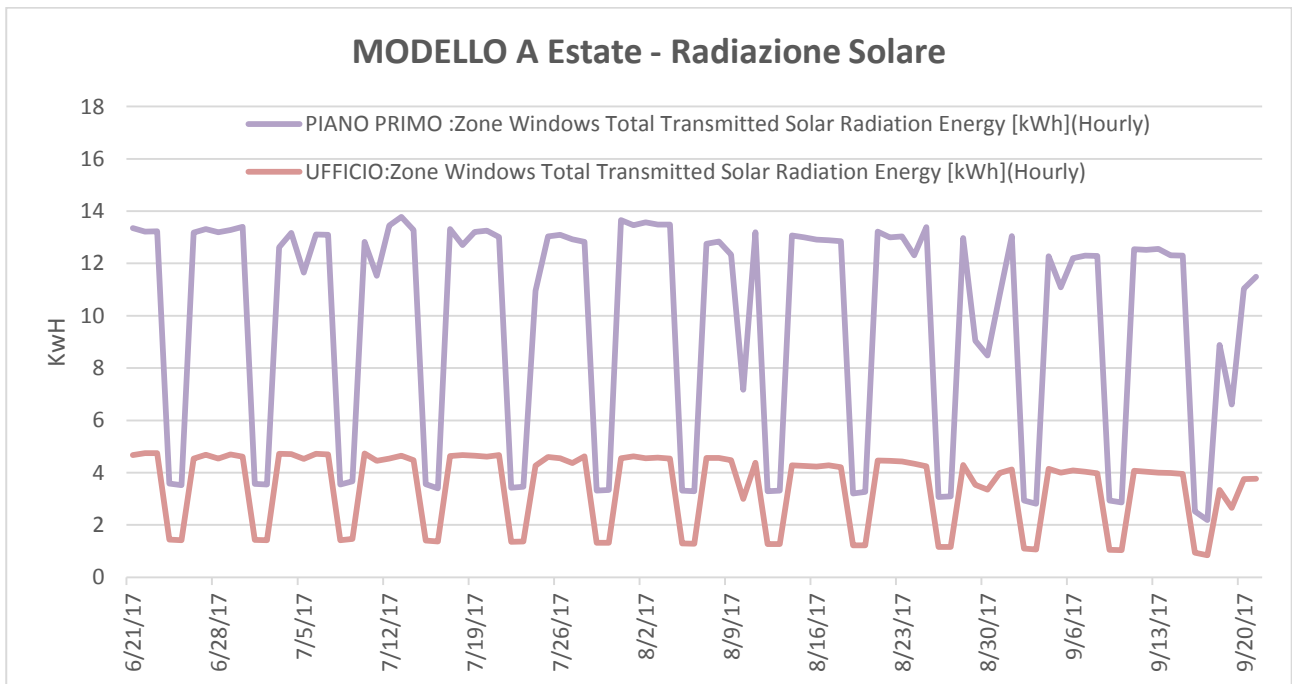


Grafico 2 MODELLO A Radiazione solare Totale in Estate

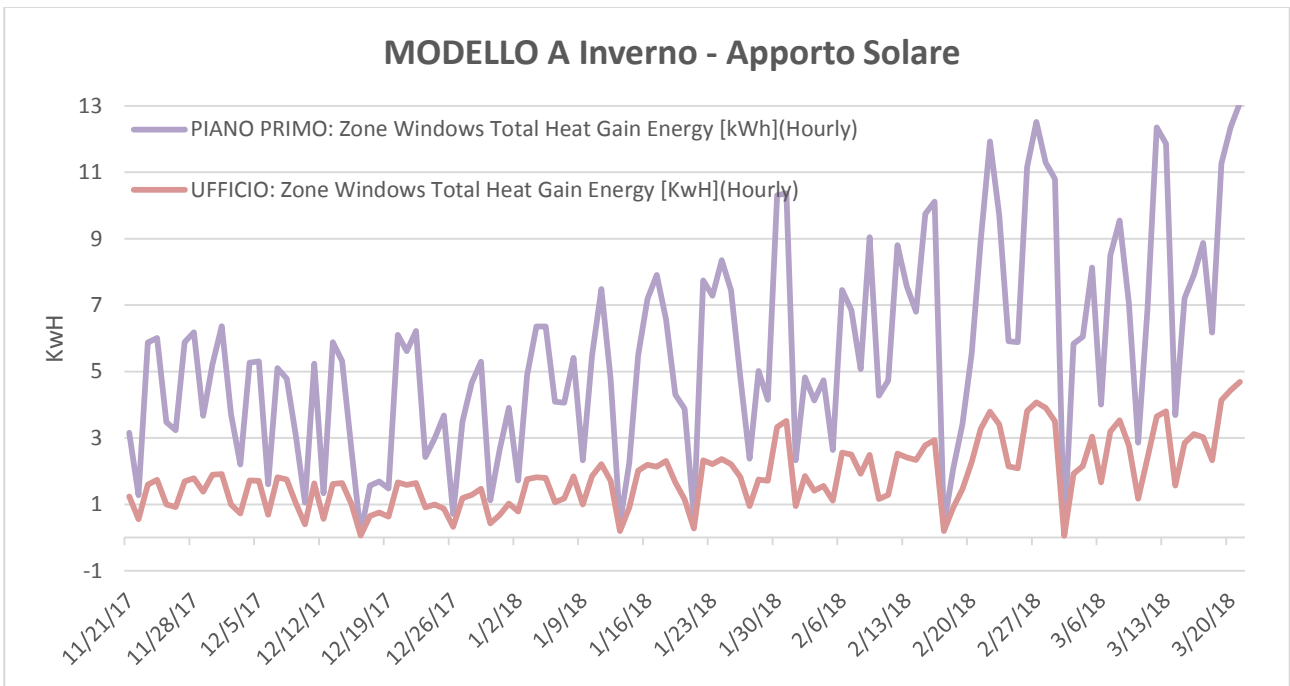


Grafico 3 MODELLO A Apporto solare Totale in Inverno

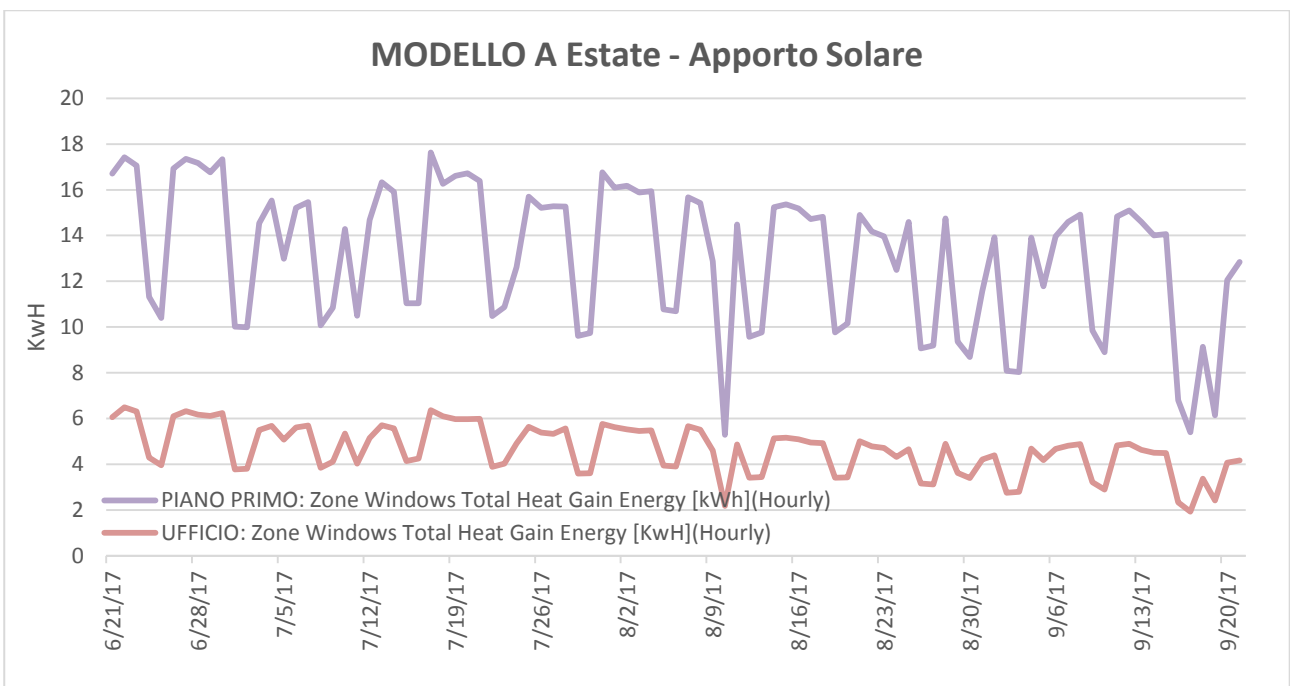


Grafico 4 MODELLO A Apporto solare Totale in estate

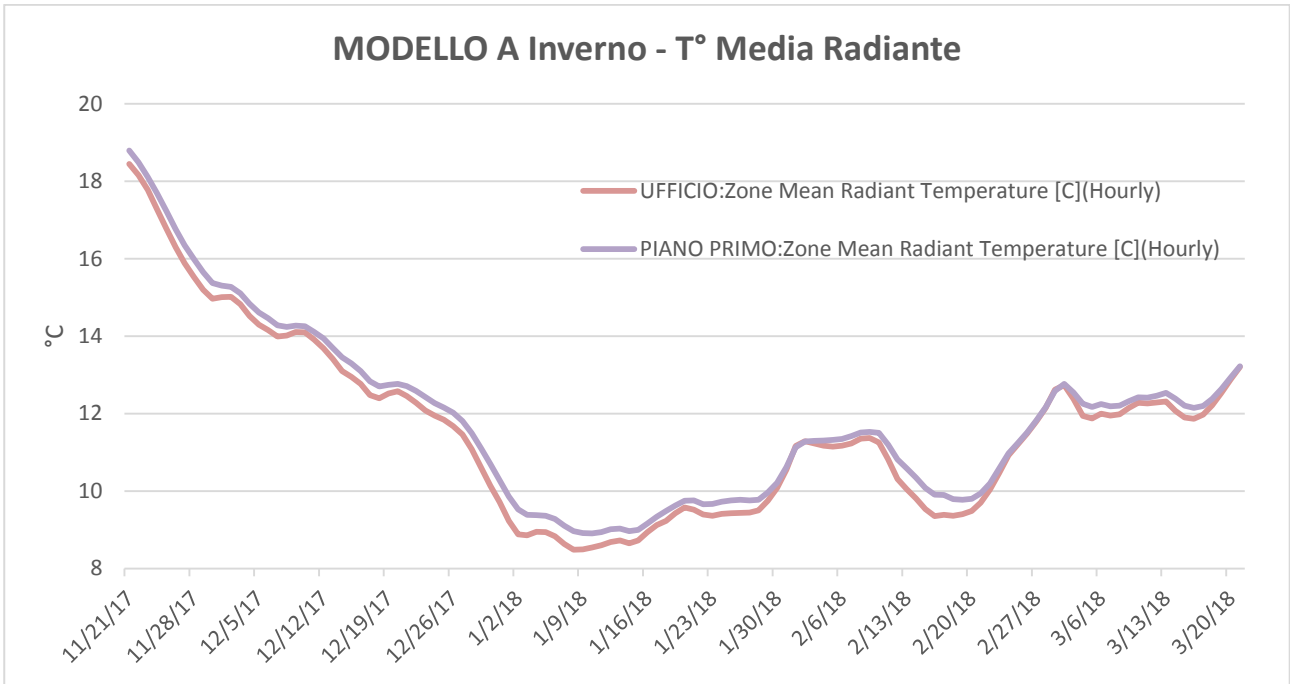


Grafico 5 MODELLO A Temperatura media radiante in Inverno

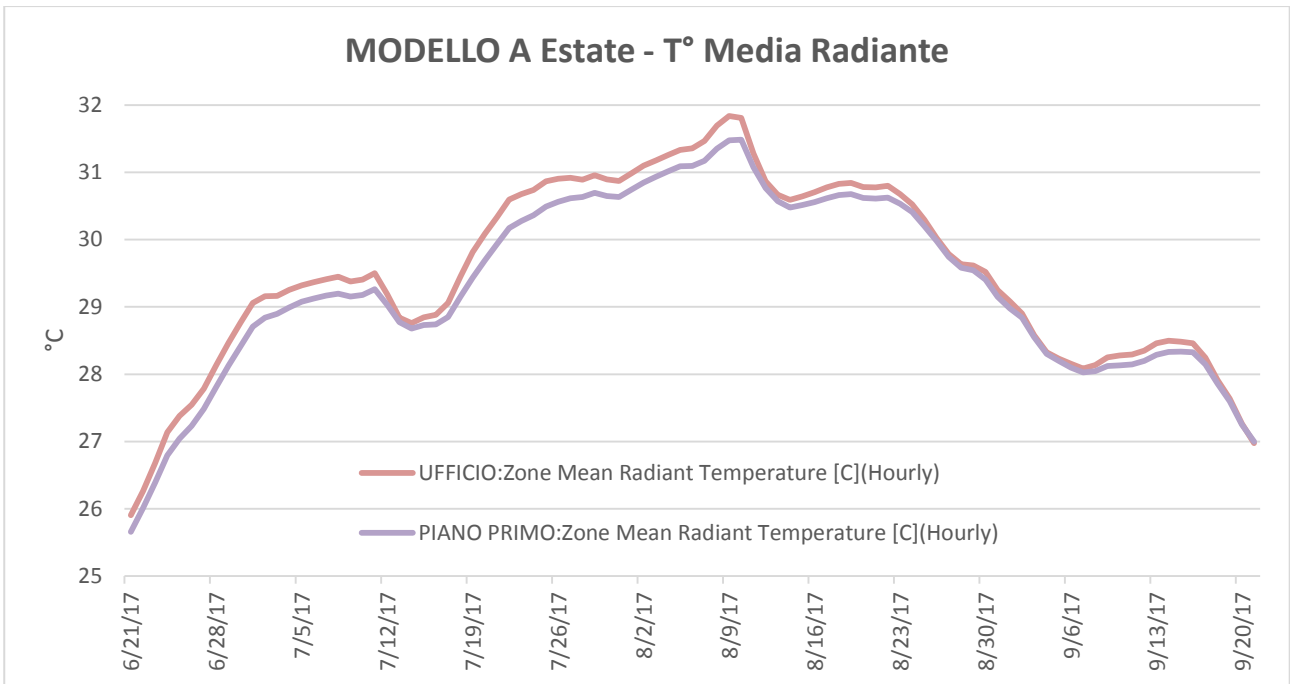


Grafico 6 MODELLO A Temperatura media radiante in Estate

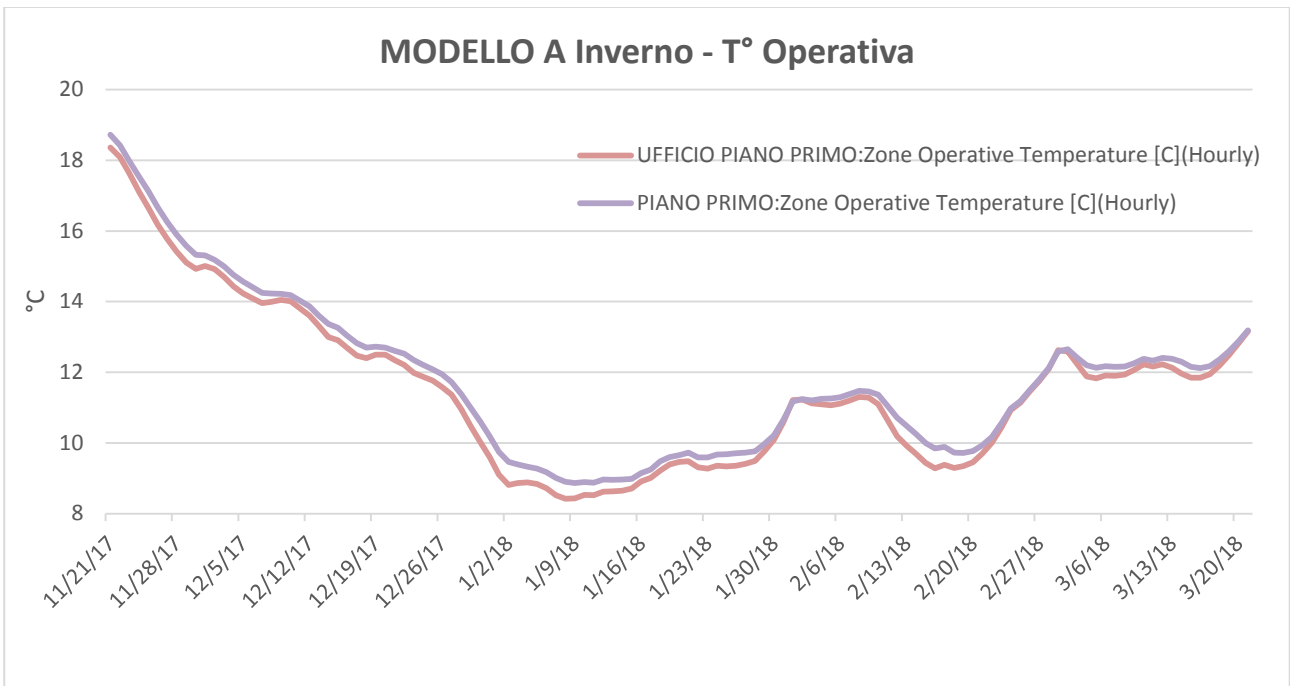


Grafico 7 MODELLO A Temperatura Operativa in Inverno

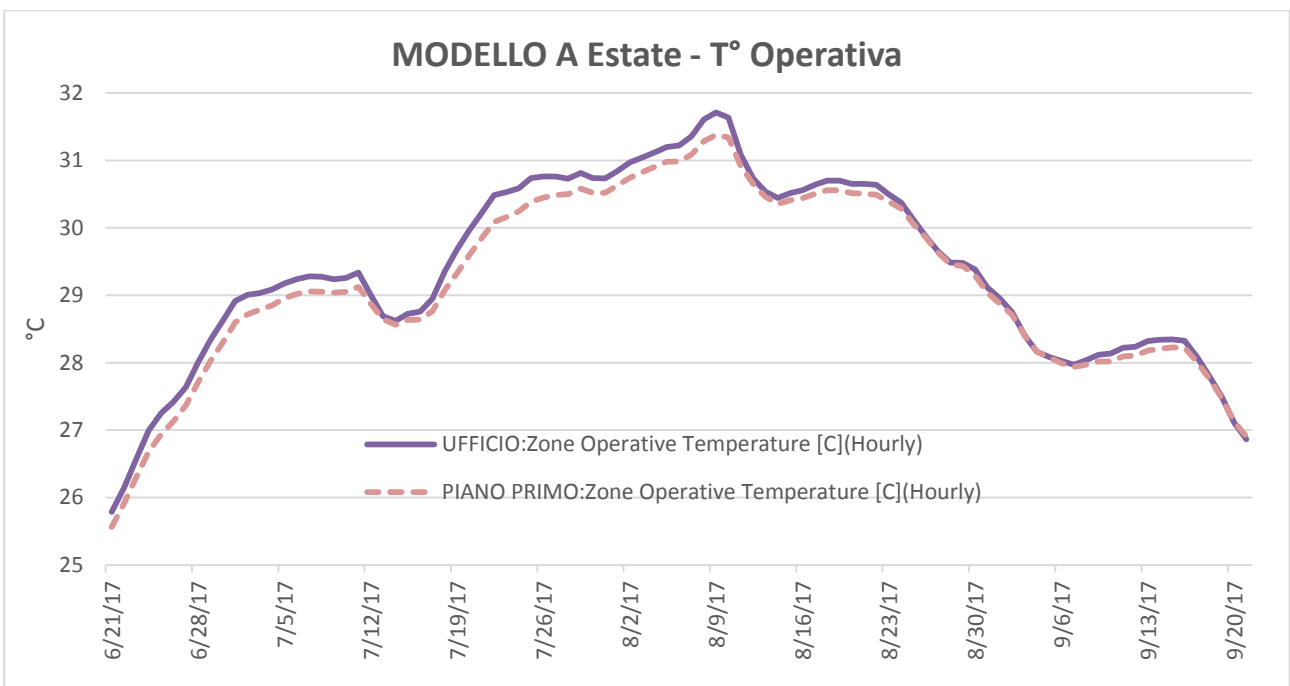


Grafico 8 MODELLO A Temperatura Operativa in Estate

Nel Modello B, la zona termica denominata UFFICIO corrisponde all'area colorata in blu della planimetria di Figura 16, la zona termica SERRA, corrisponde all'area colorata in verde.

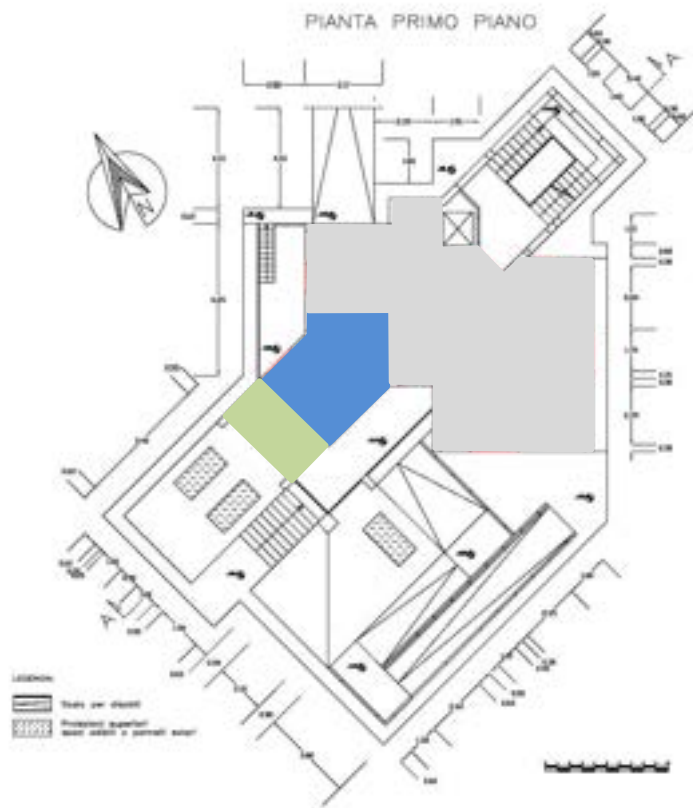


Figura 14 MODELLO B Individuazione delle Zone Termiche di analisi

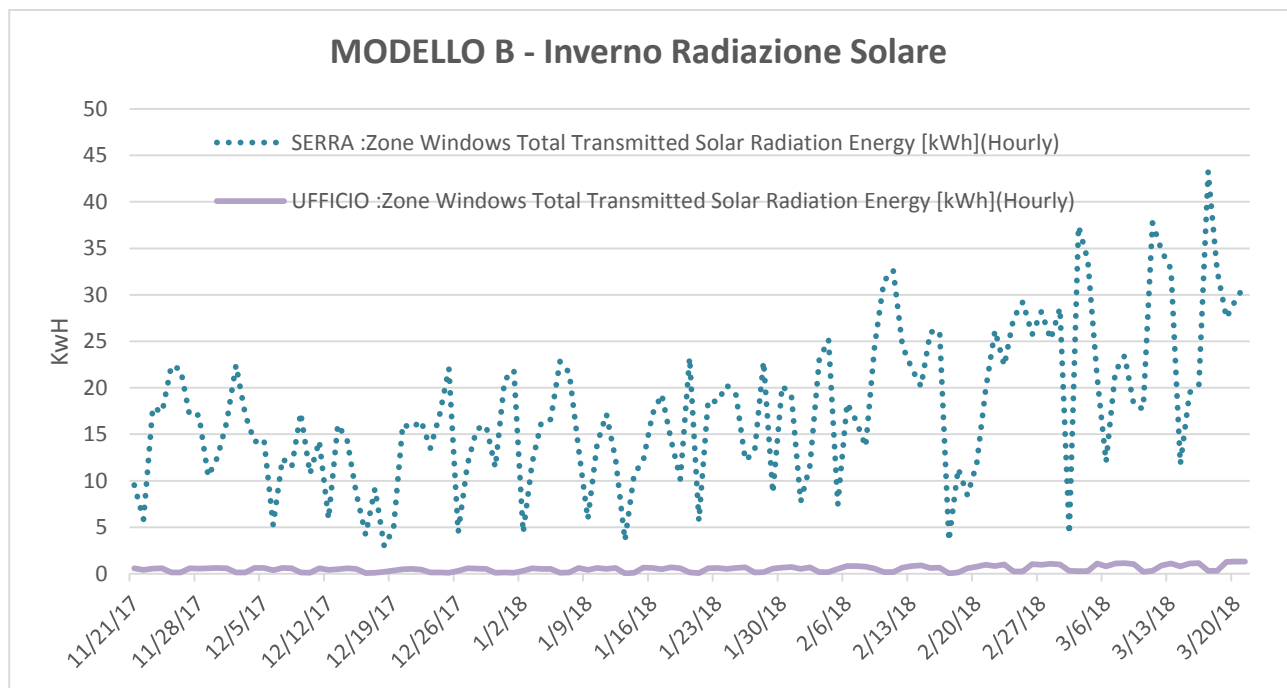


Grafico 9 MODELLO B Radiazione Solare in Inverno

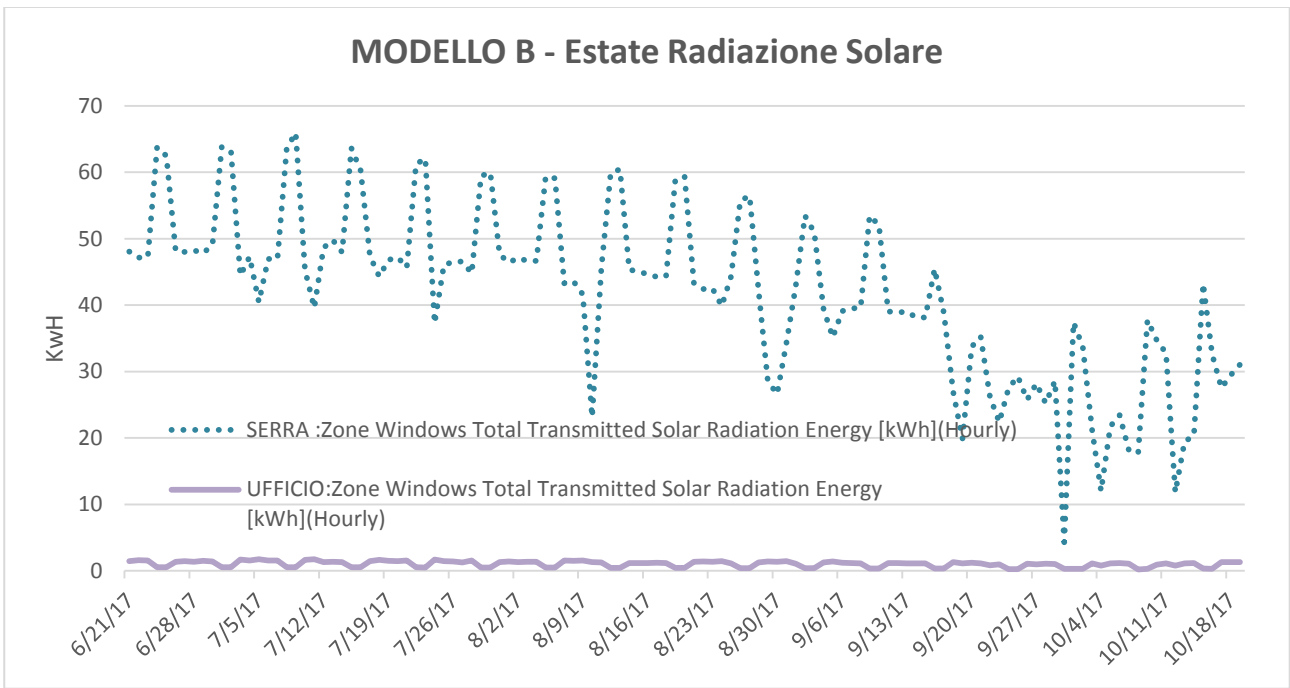


Grafico 10 MODELLO B Radiazione Solare in Estate

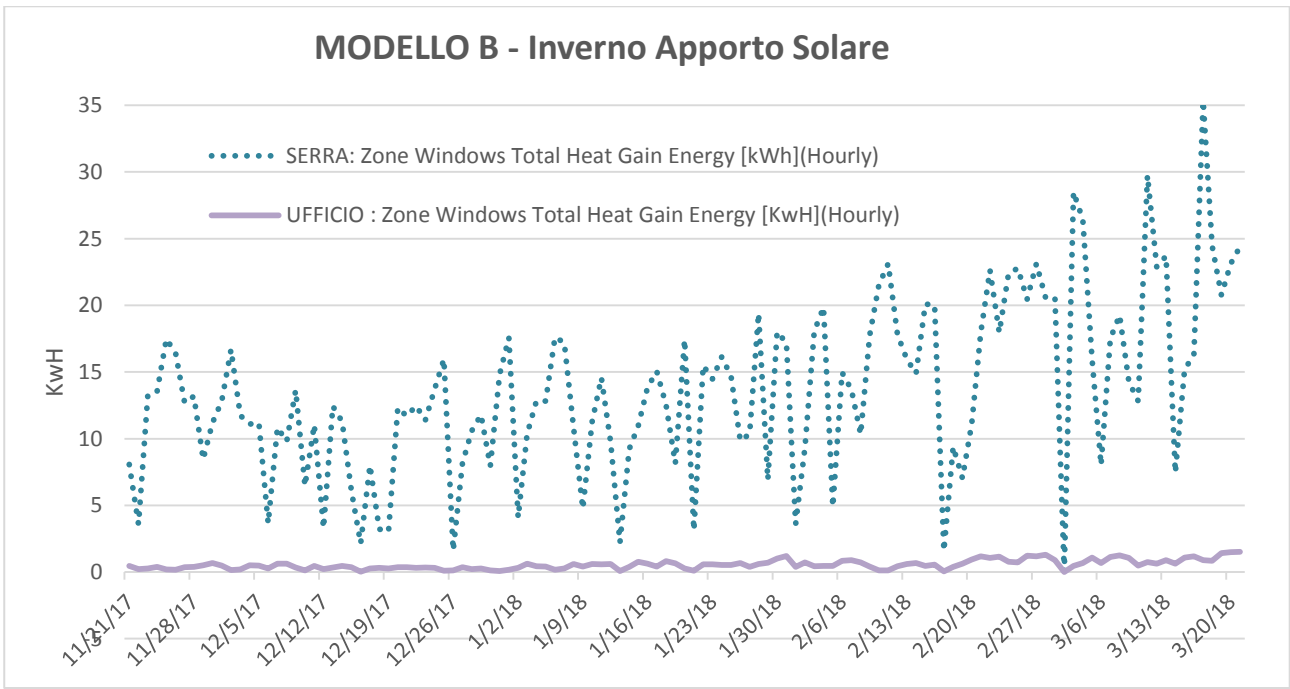


Grafico 11 MODELLO B Apporto Solare Gratuito in Inverno

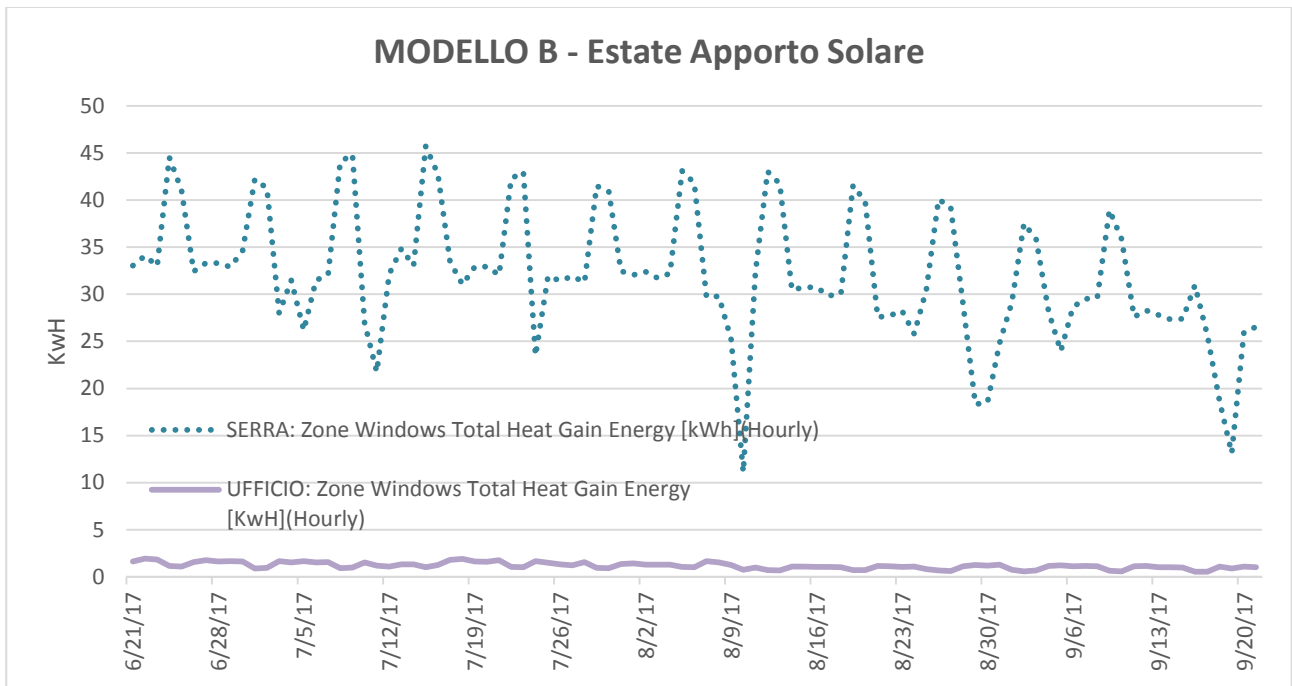


Grafico 12 MODELLO B Apporto Solare Gratuito in Estate

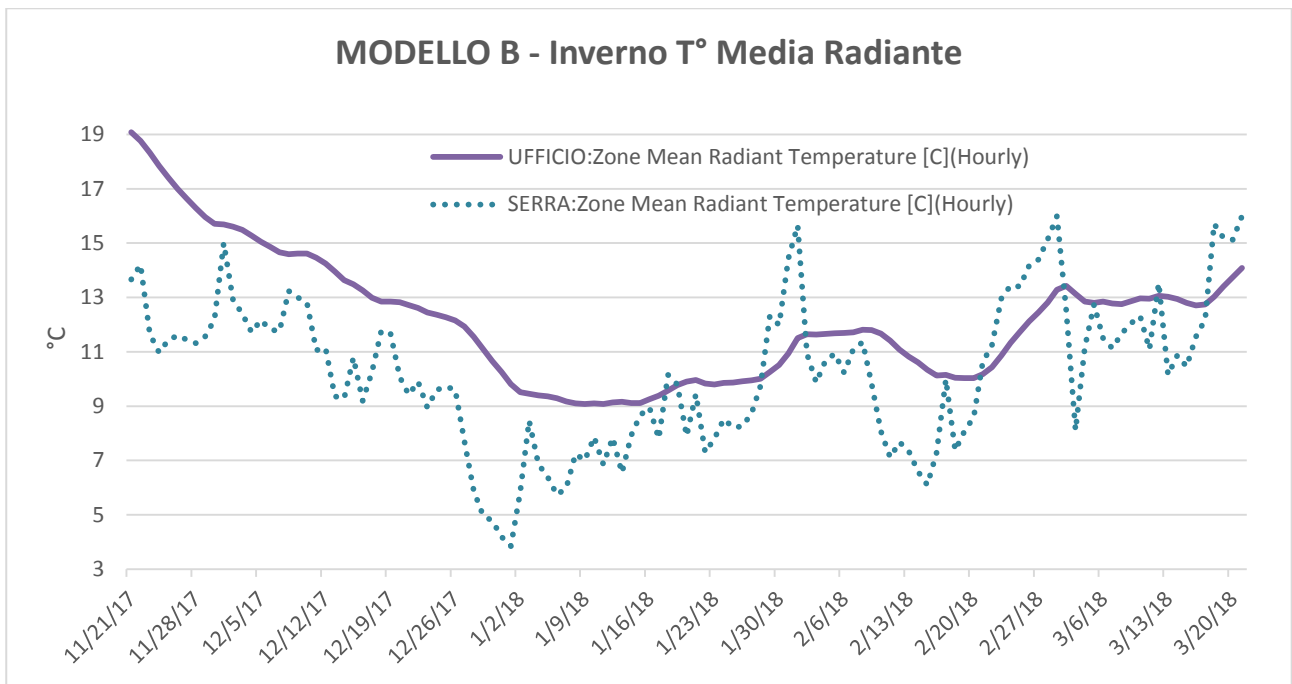


Grafico 13 MODELLO B Temperatura media radiante in Inverno

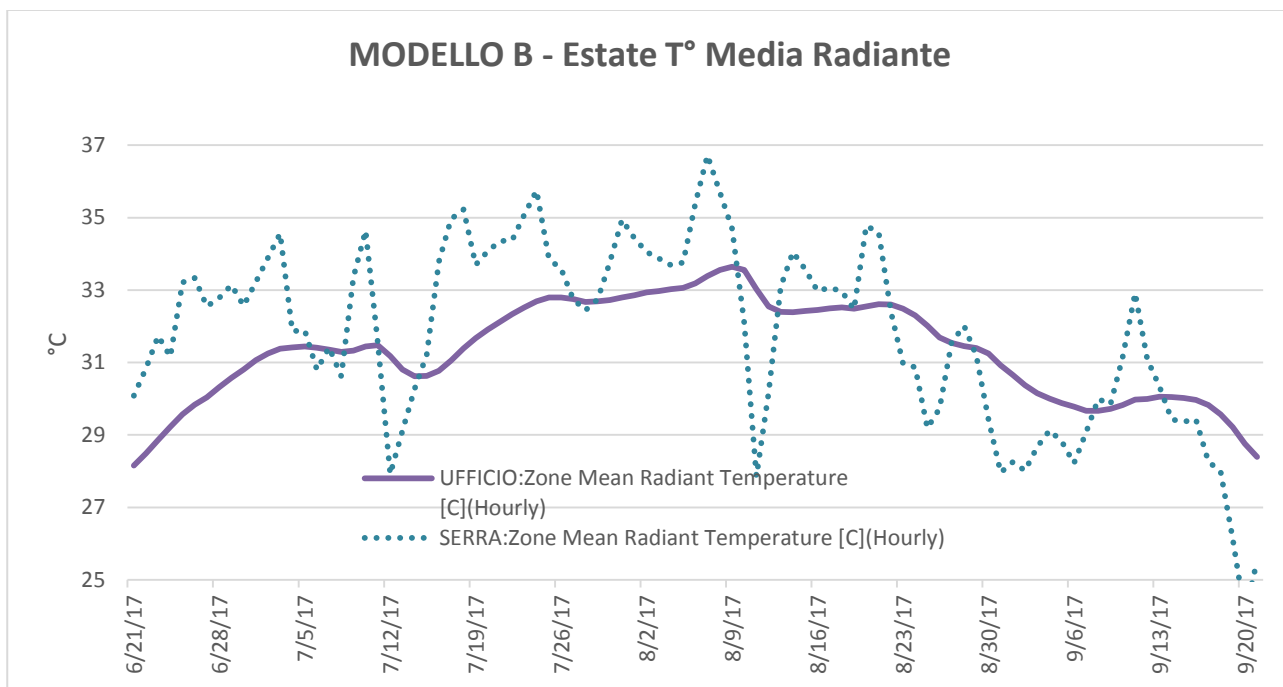


Grafico 14 MODELLO B Temperatura media radiante in Estate

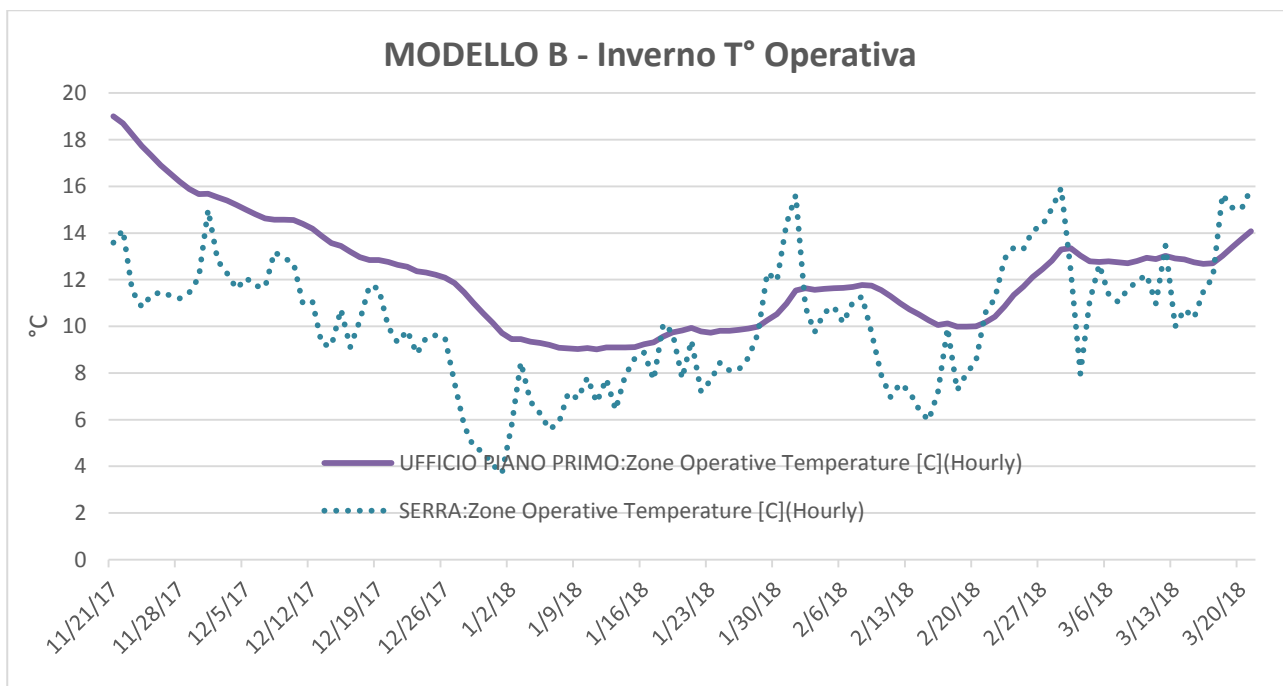


Grafico 15 MODELLO B Temperatura operativa in Inverno

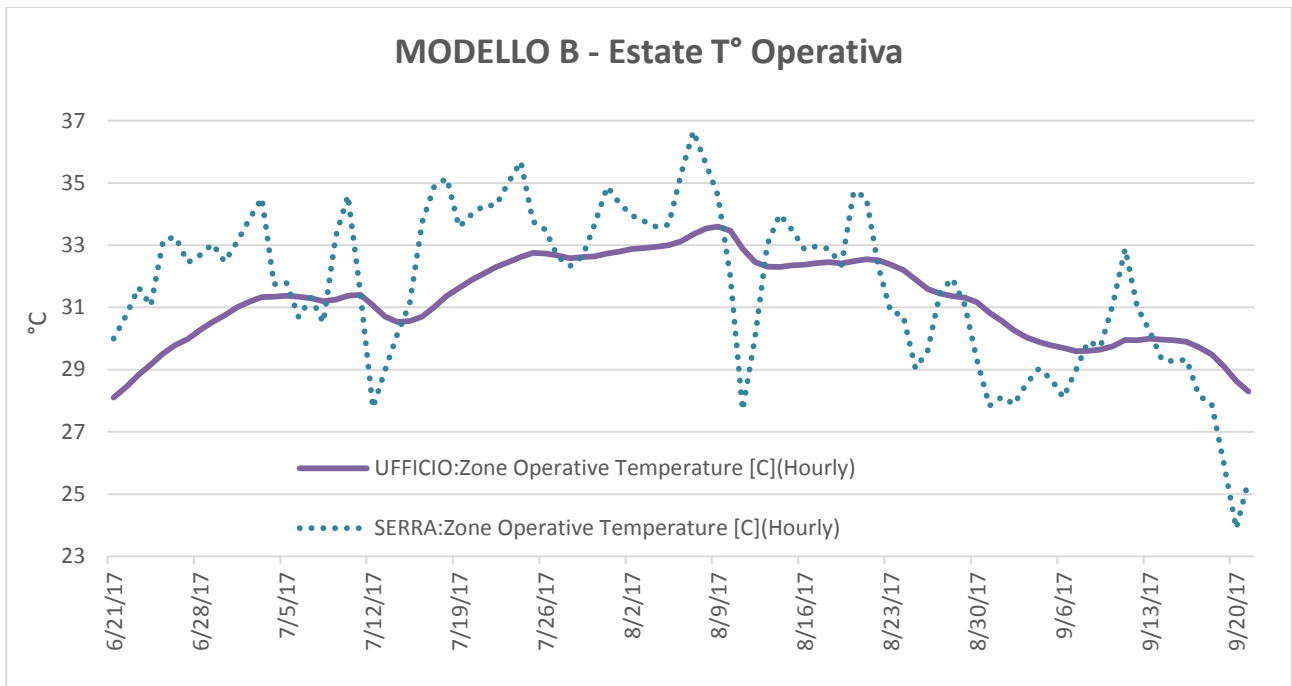


Grafico 16 MODELLO B Temperatura operativa in Estate

Nel Modello C, la zona termica denominata UFFICIO&SERRA corrisponde all'area colorata in azzurro della planimetria di Figura 17 e corrisponde alla unione delle precedenti zone termiche SERRA e UFFICIO PIANO PRIMO dopo la demolizione della parete divisoria.

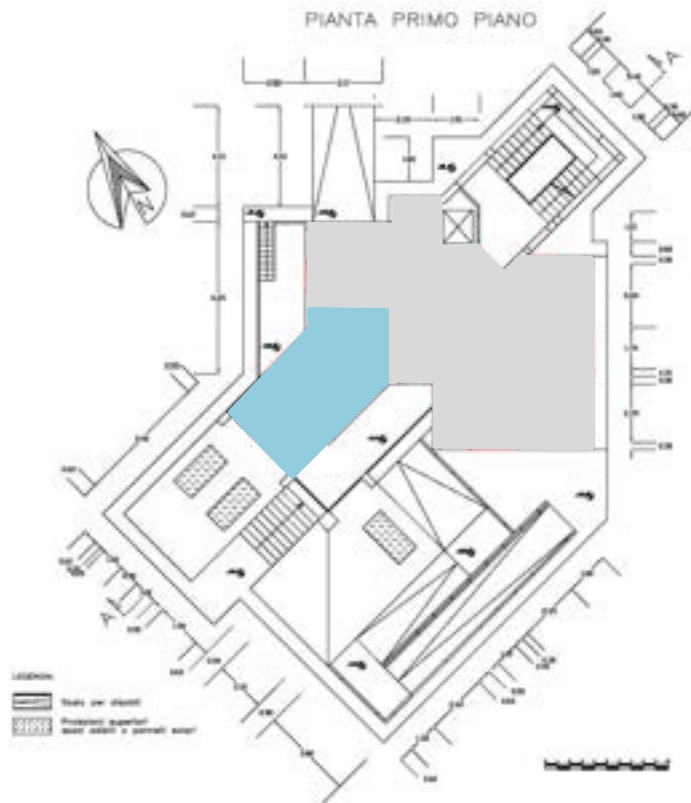


Figura 15 MODELLO C Individuazione delle Zone Termiche di analisi

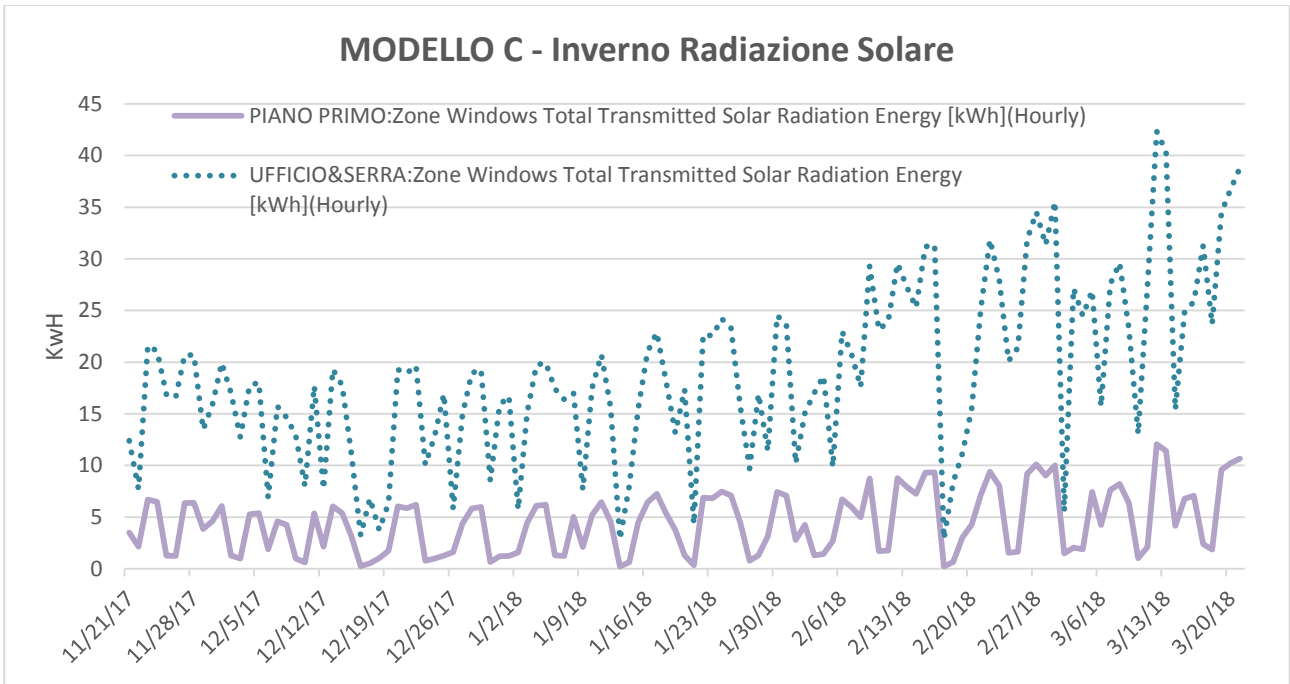


Grafico 17 MODELLO C Radiazione Solare in Inverno

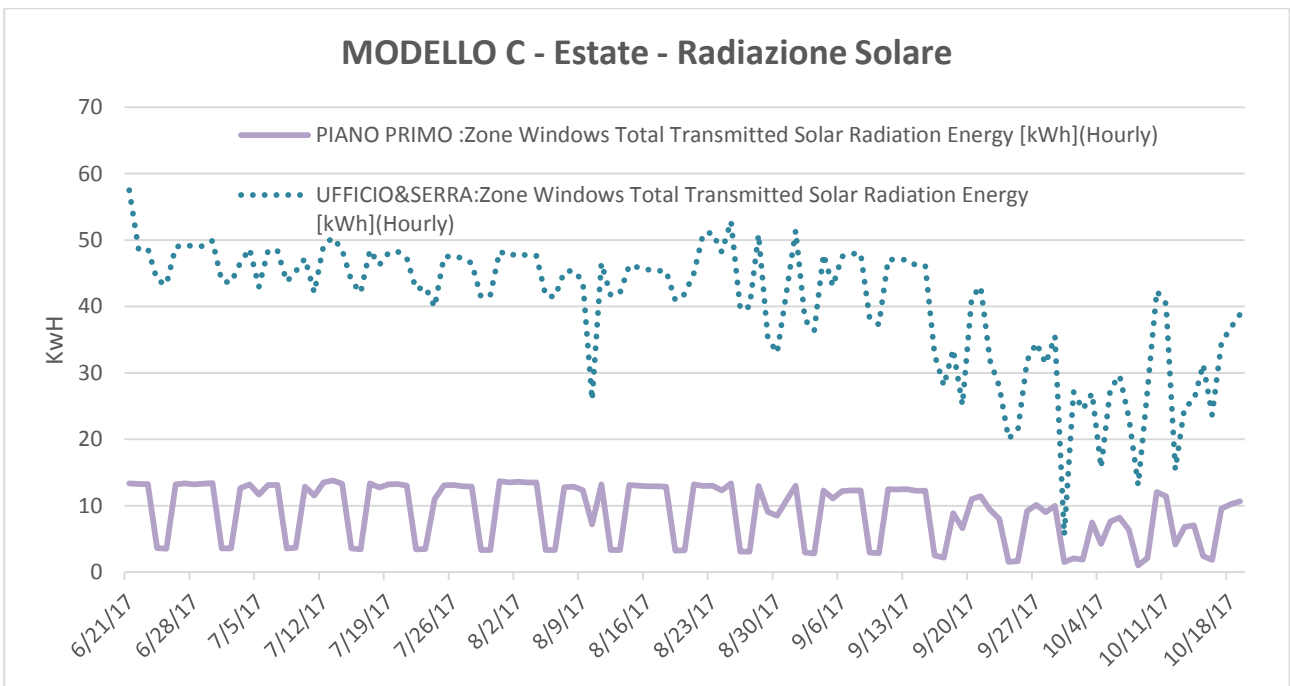


Grafico 18 MODELLO C Radiazione Solare in Estate

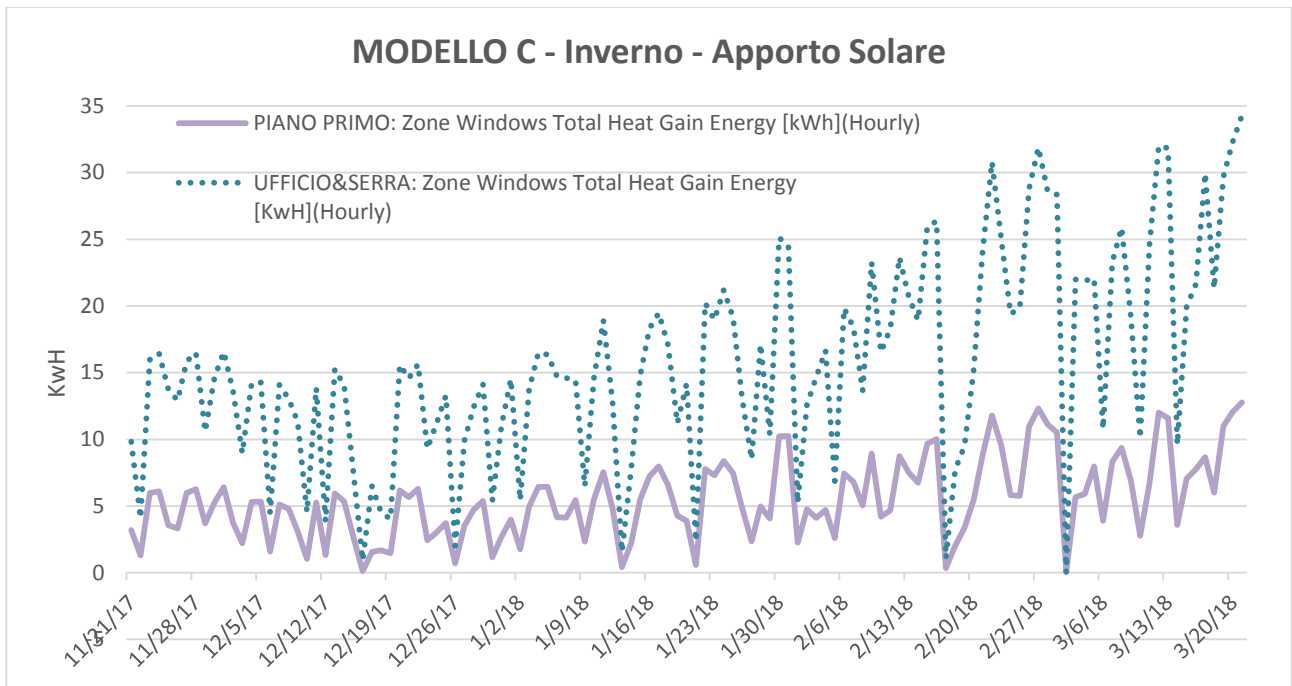


Grafico 19 MODELLO C Apporto Solare Gratuito in Inverno

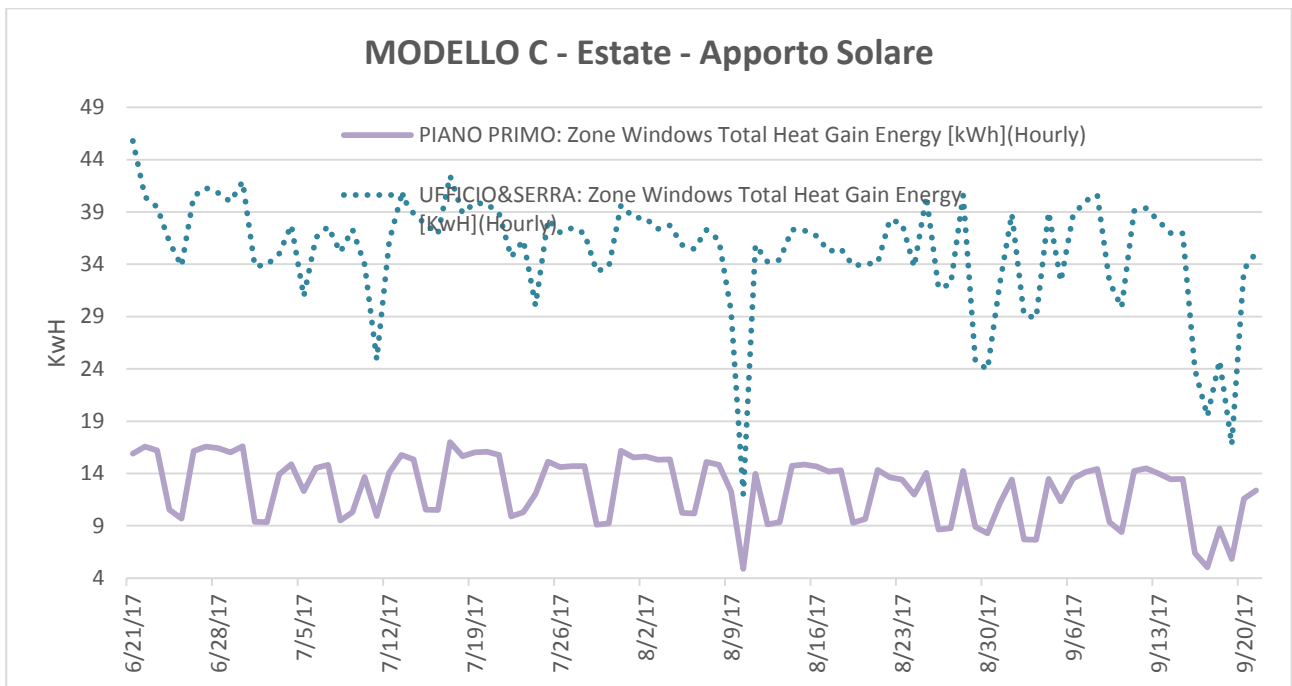


Grafico 20 MODELLO C Apporto Solare Gratuito in Estate

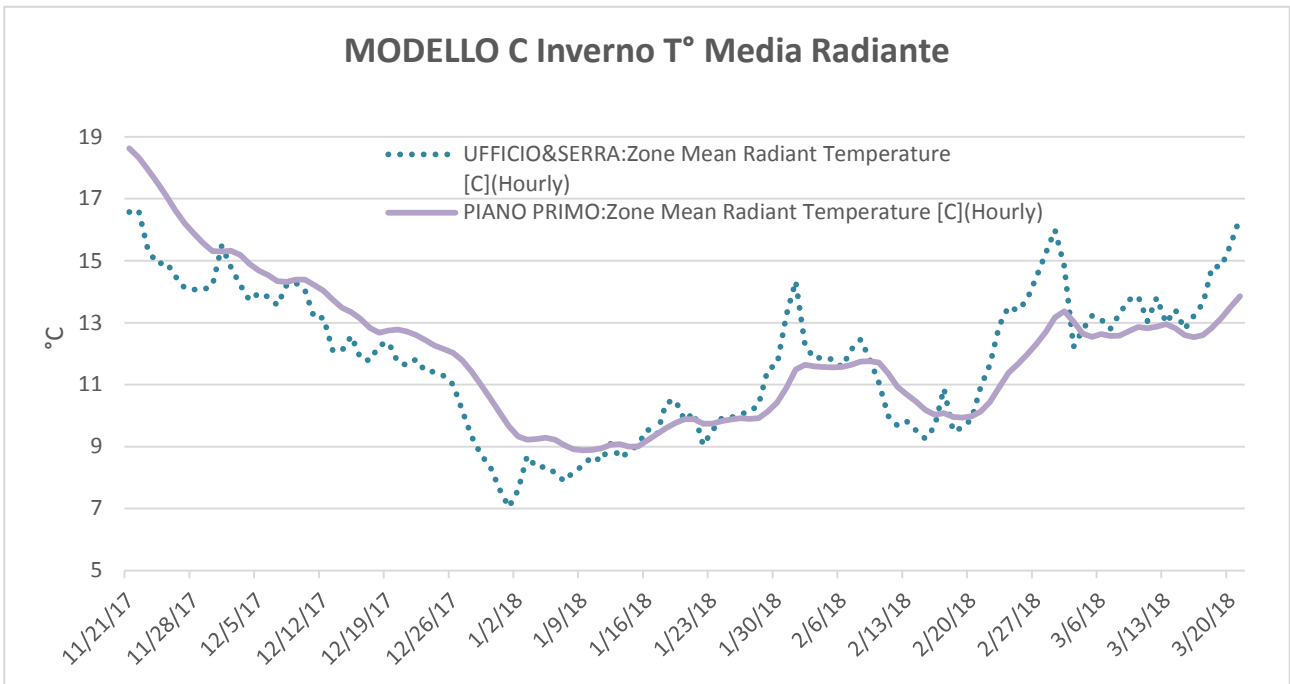


Grafico 21 MODELLO C Temperatura media radiante in Inverno

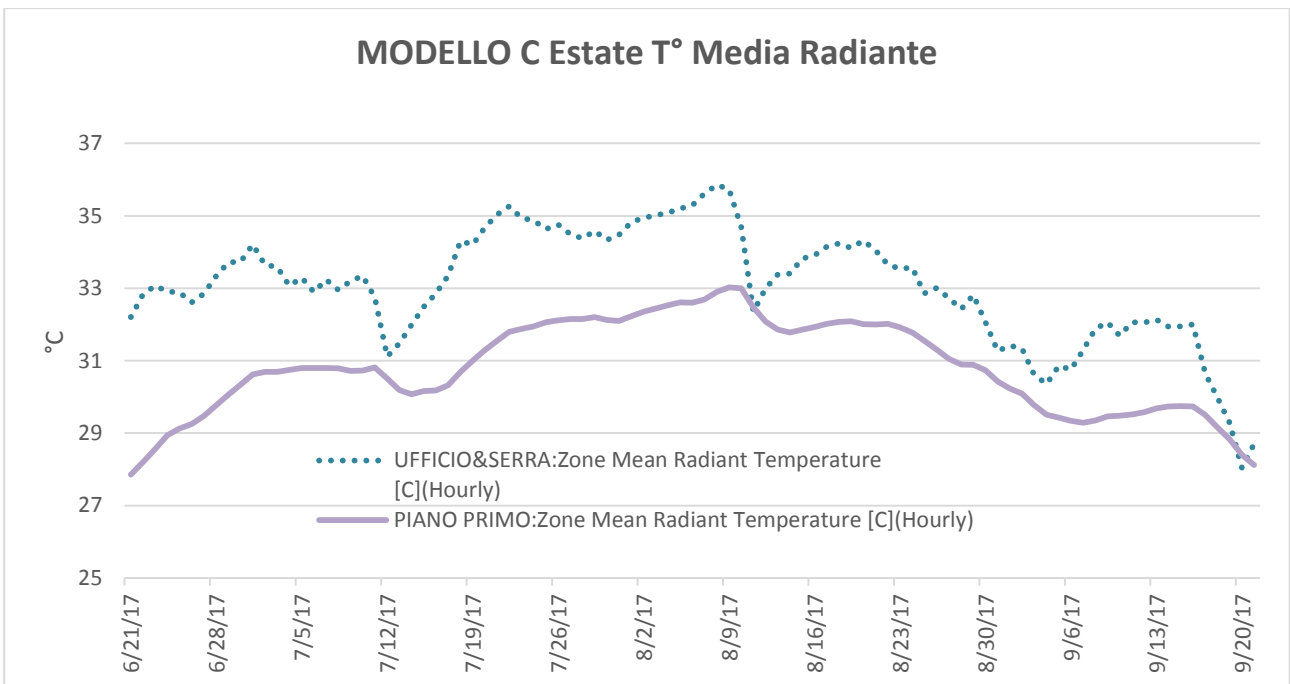


Grafico 22 MODELLO C Temperatura media radiante in Estate

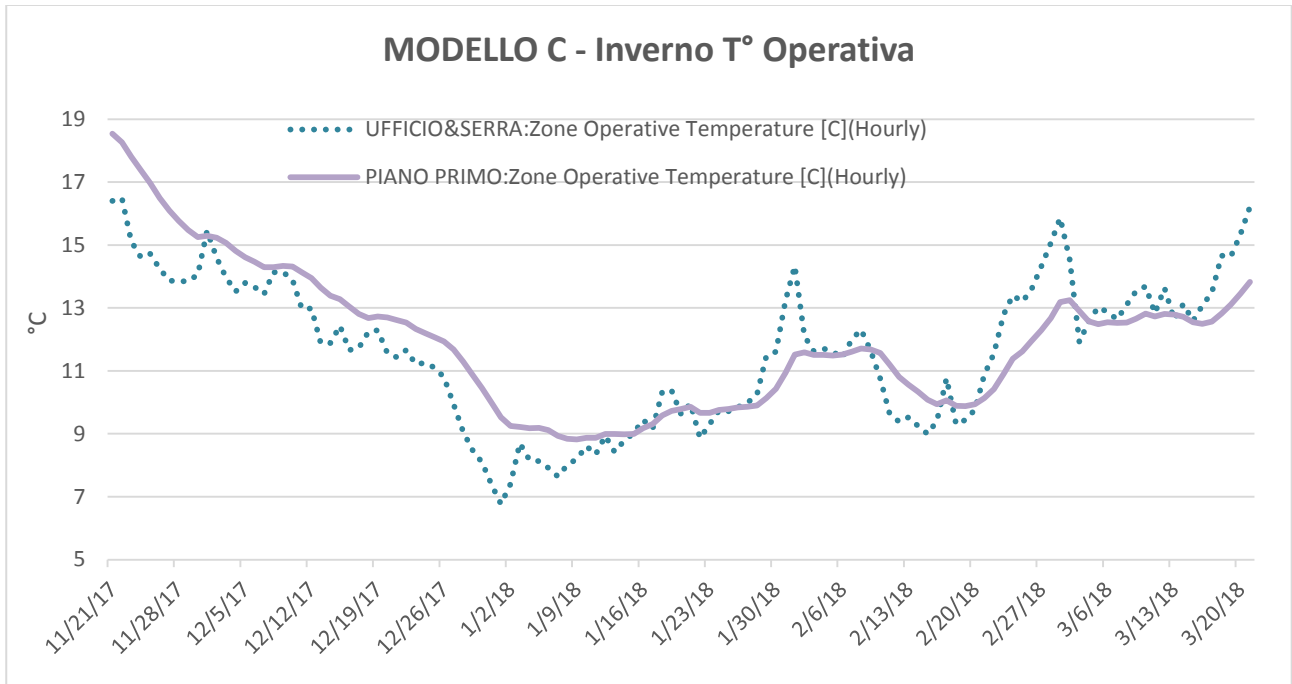


Grafico 23 MODELLO C Temperatura operativa in Inverno

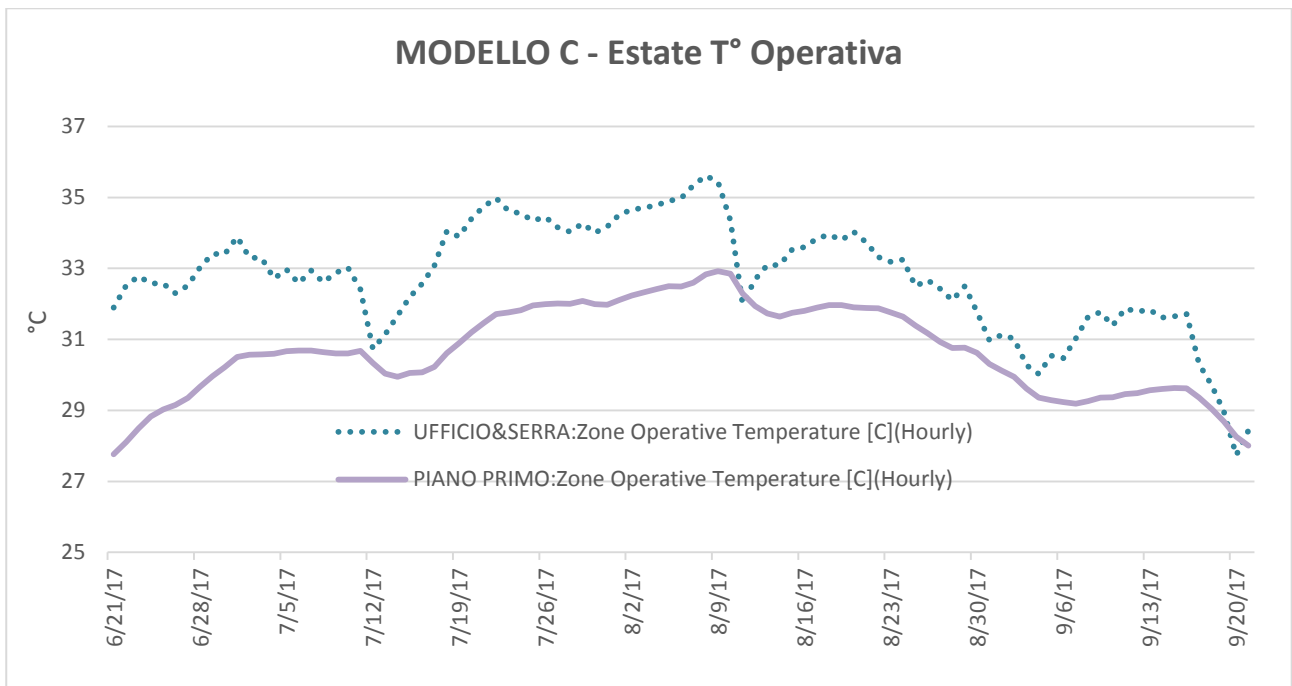


Grafico 24 MODELLO C Temperatura operativa in Estate

Nel modello D, la vetratura di progetto (vetro 5mm per le pareti verticali e policarbonato per la falda inclinata) è stato sostituito con il vetro ad alta efficienza di cui alla Tabella 2. Il modello geometrico è lo stesso del modello C (zona termica estesa).

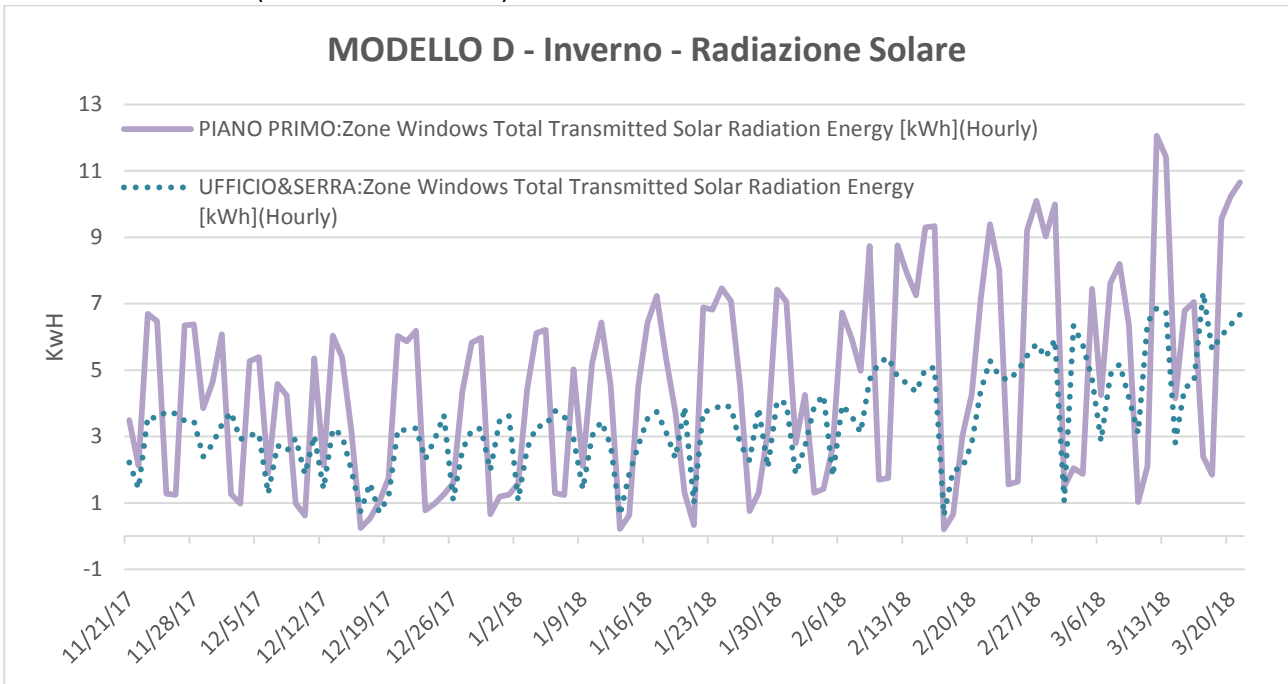


Grafico 25 MODELLO D Radiazione Solare in Inverno

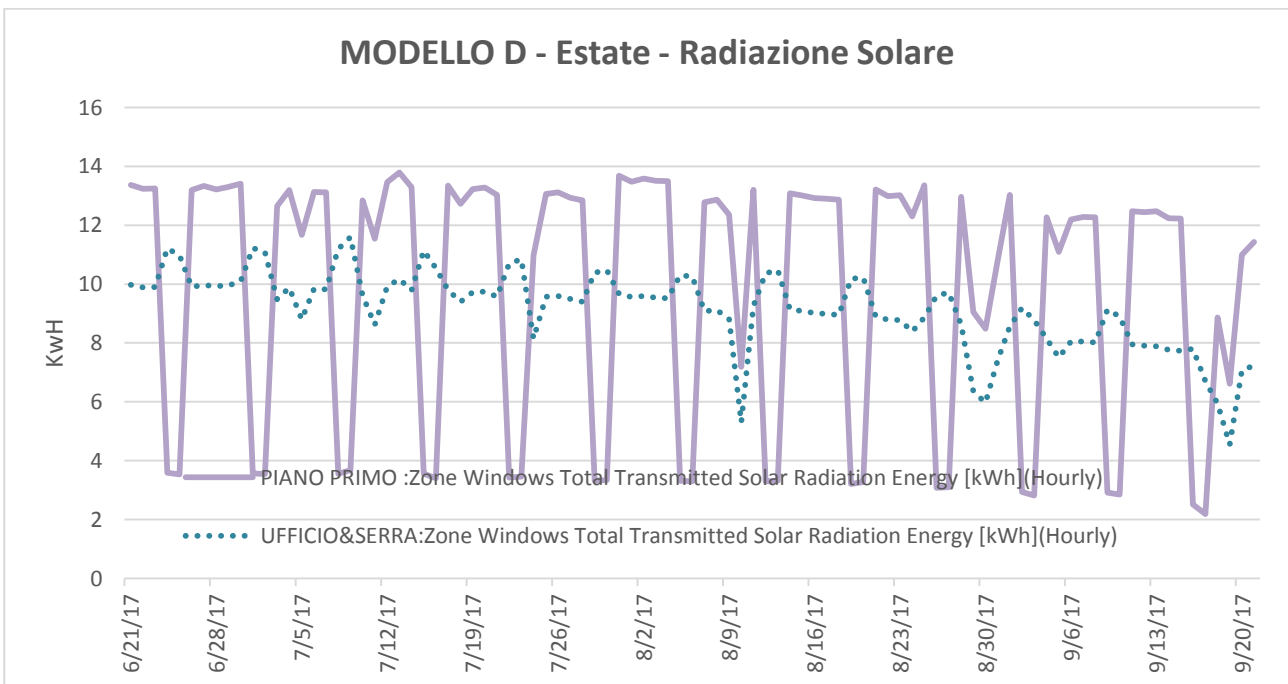


Grafico 26 MODELLO D Radiazione Solare in Estate

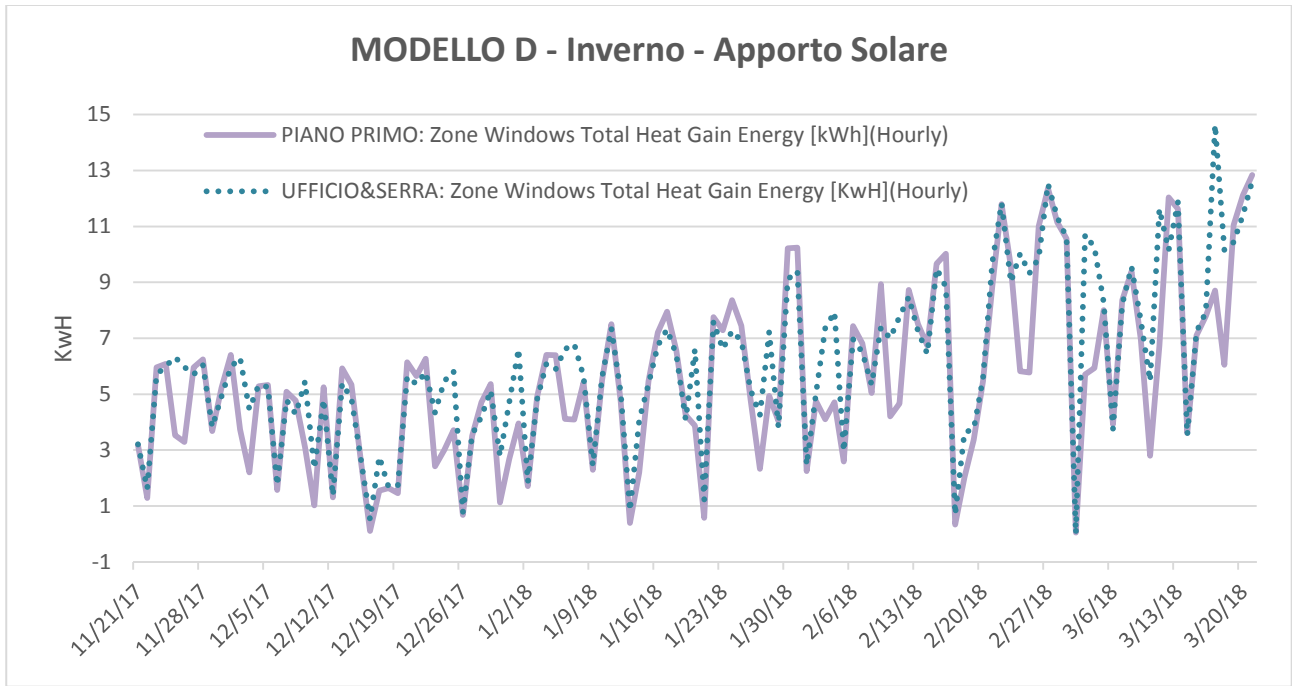


Grafico 27 MODELLO D Apporto Solare Gratuito in Inverno

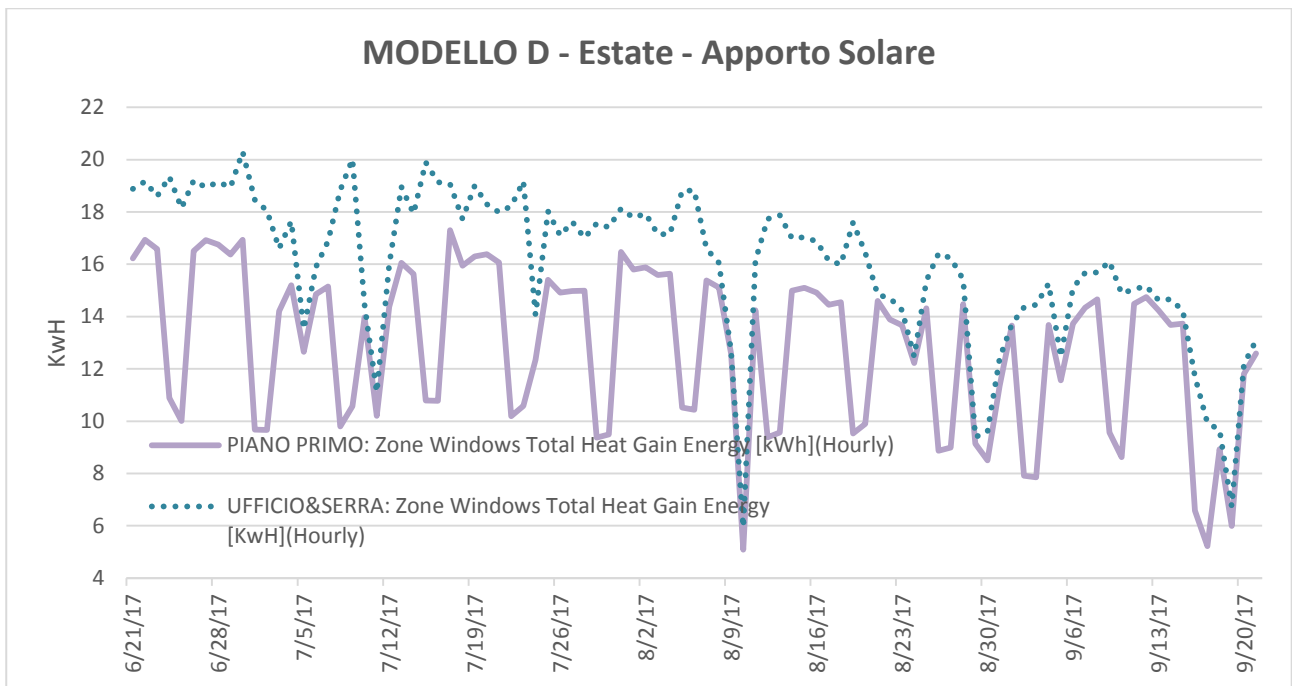


Grafico 28 MODELLO D Apporto Solare Gratuito in Estate

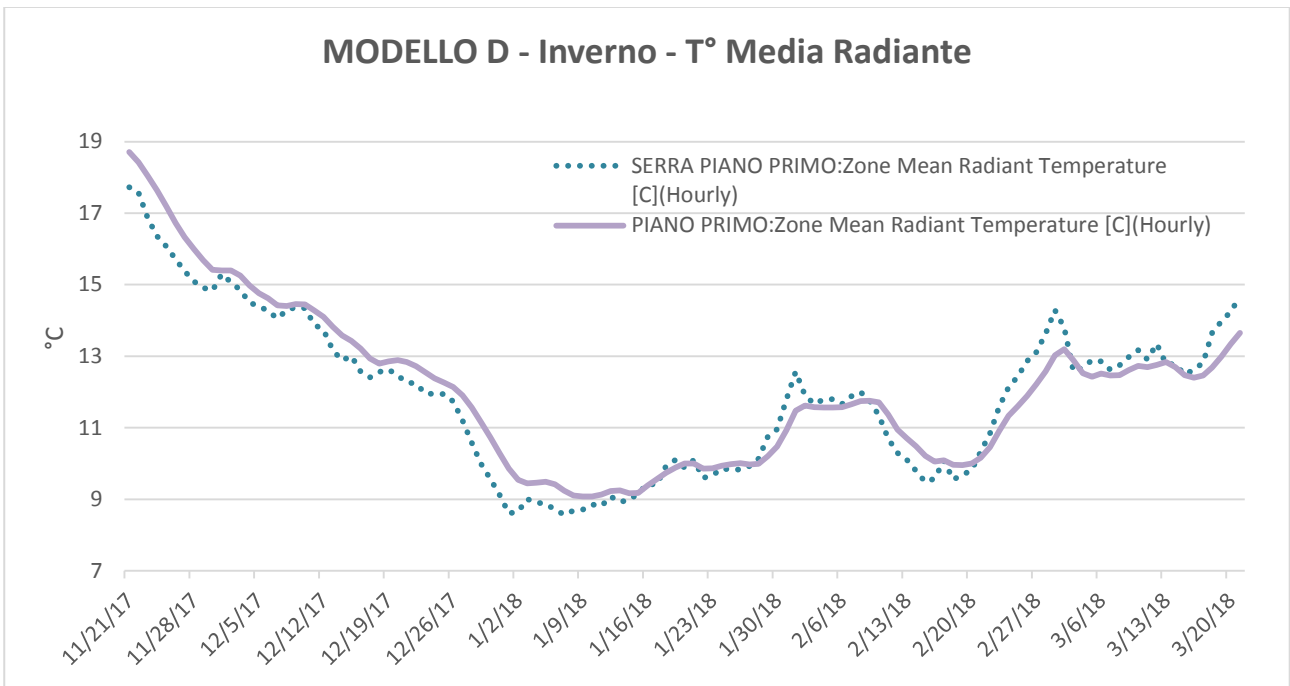


Grafico 29 MODELLO D Temperatura media radiante in Inverno

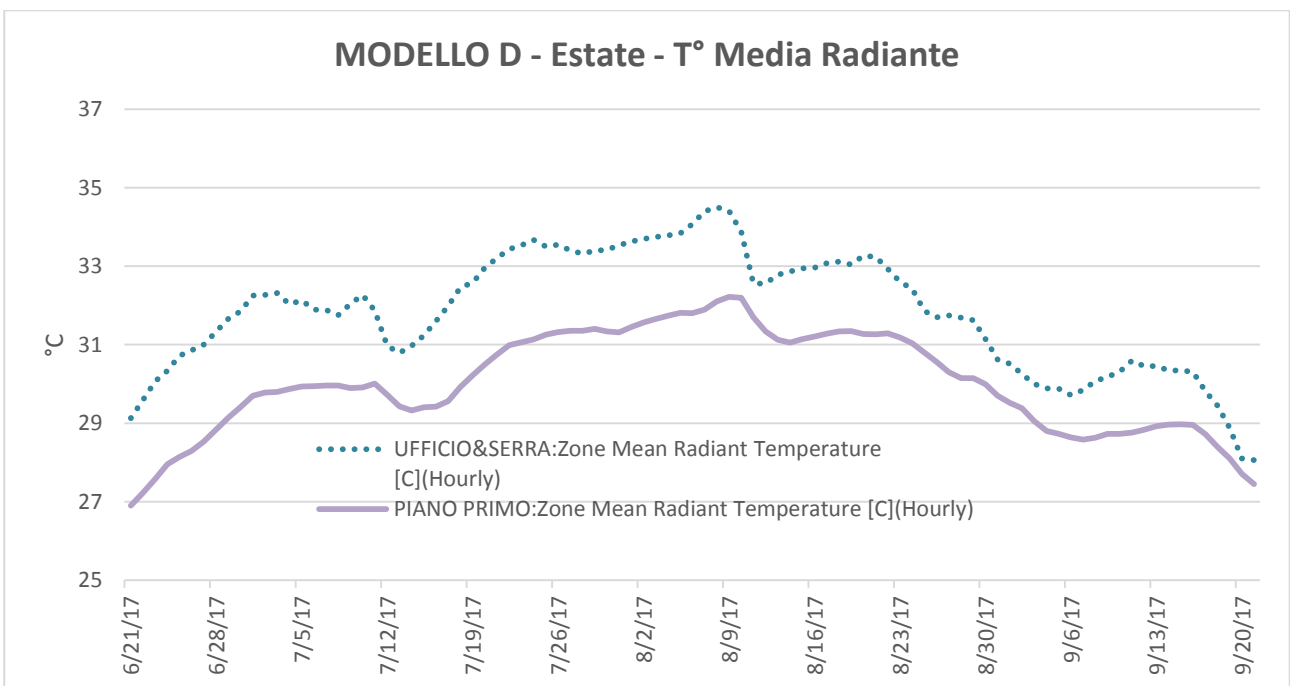


Grafico 30 MODELLO D Temperatura media radiante in Estate

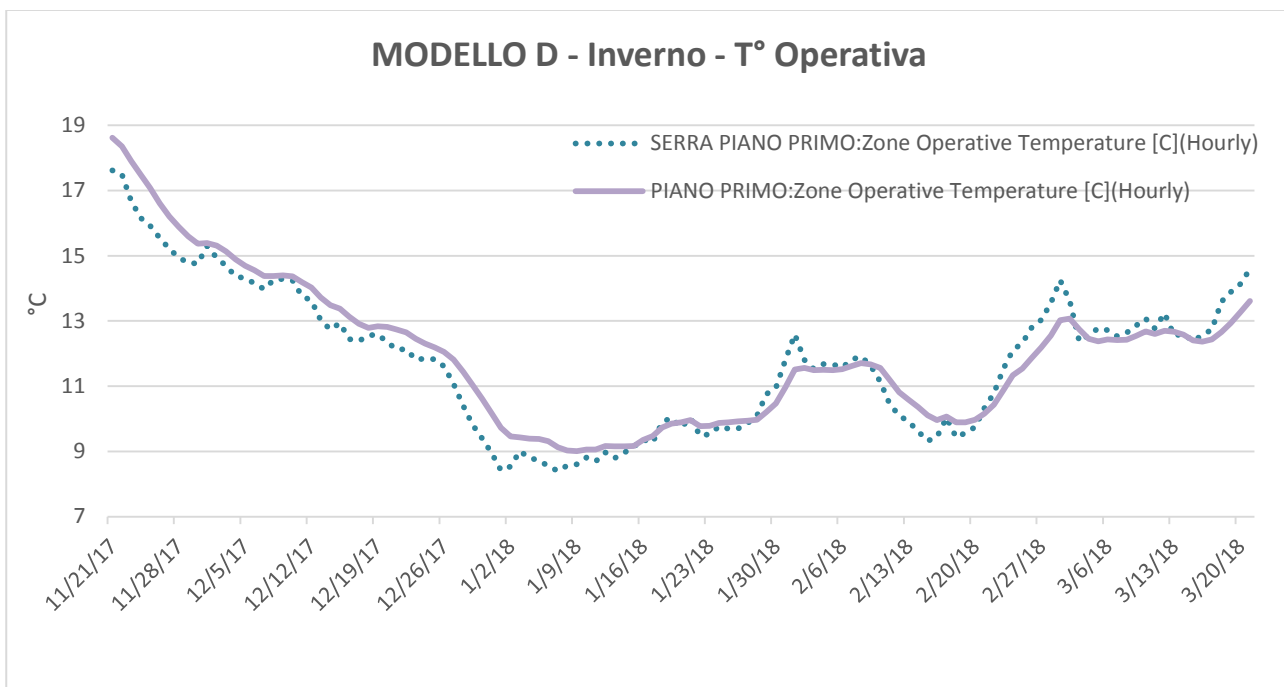


Grafico 31 MODELLO D Temperatura operativa in Inverno

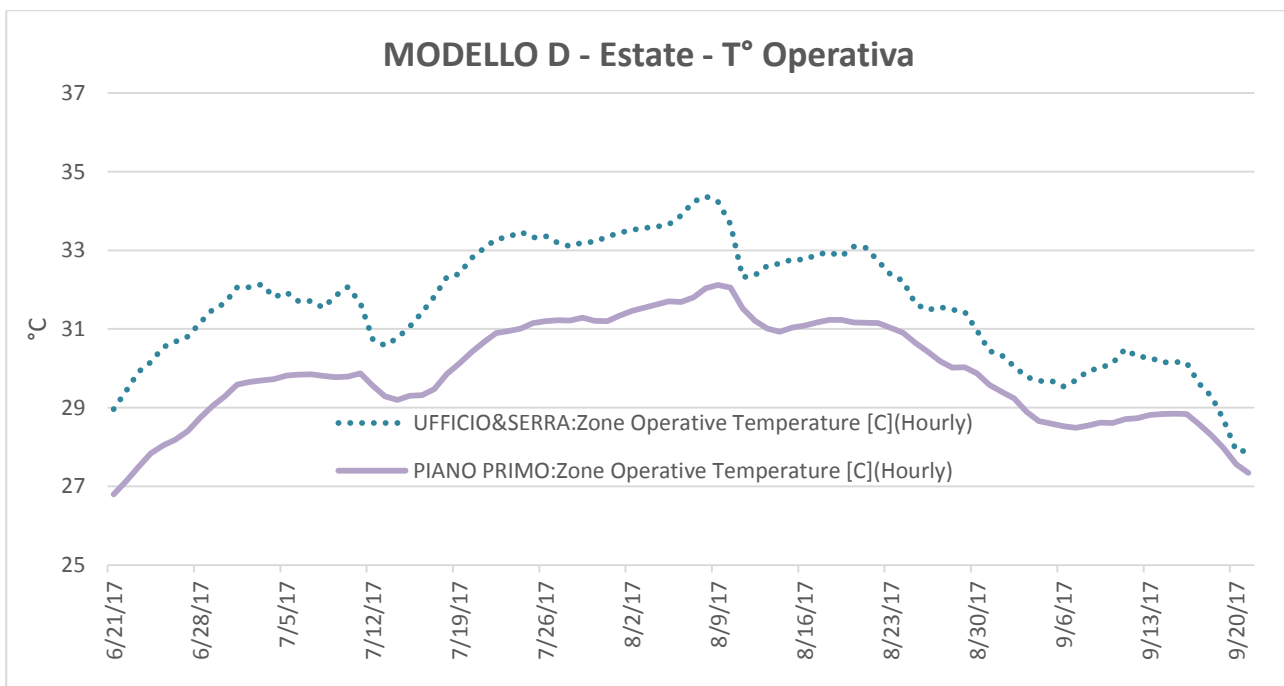


Grafico 32 MODELLO D Temperatura operativa in Estate

I modelli E, F, G ripropongono i modelli geometrico e termoigrometrico di A, B e C con l'aggiunta dei soli carichi interni.

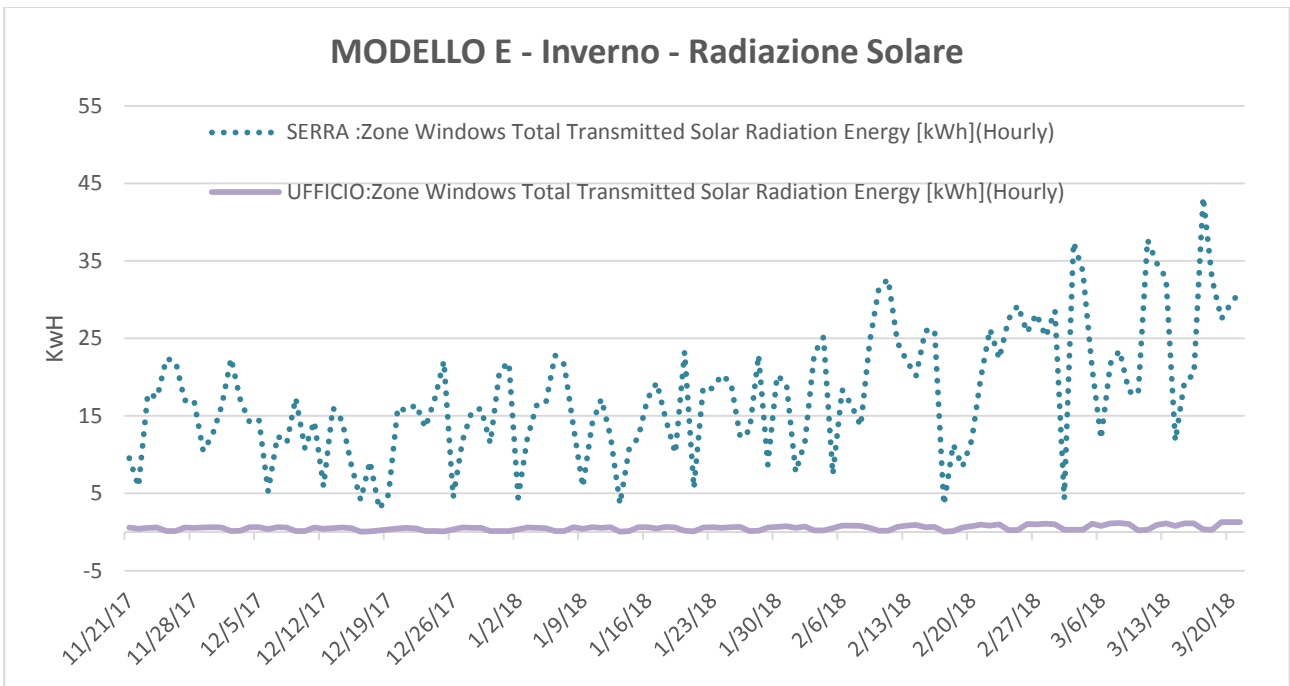


Grafico 33 MODELLO E Radiazione solare in Inverno

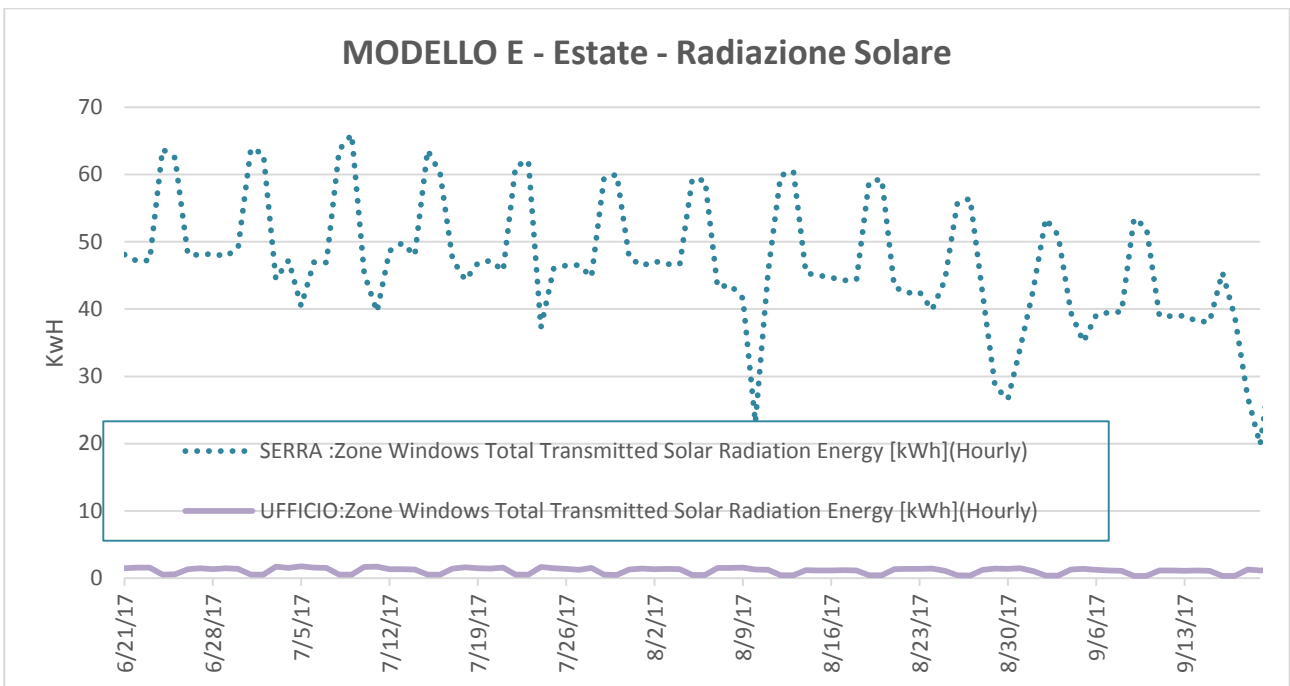


Grafico 34 MODELLO E Radiazione solare in Estate

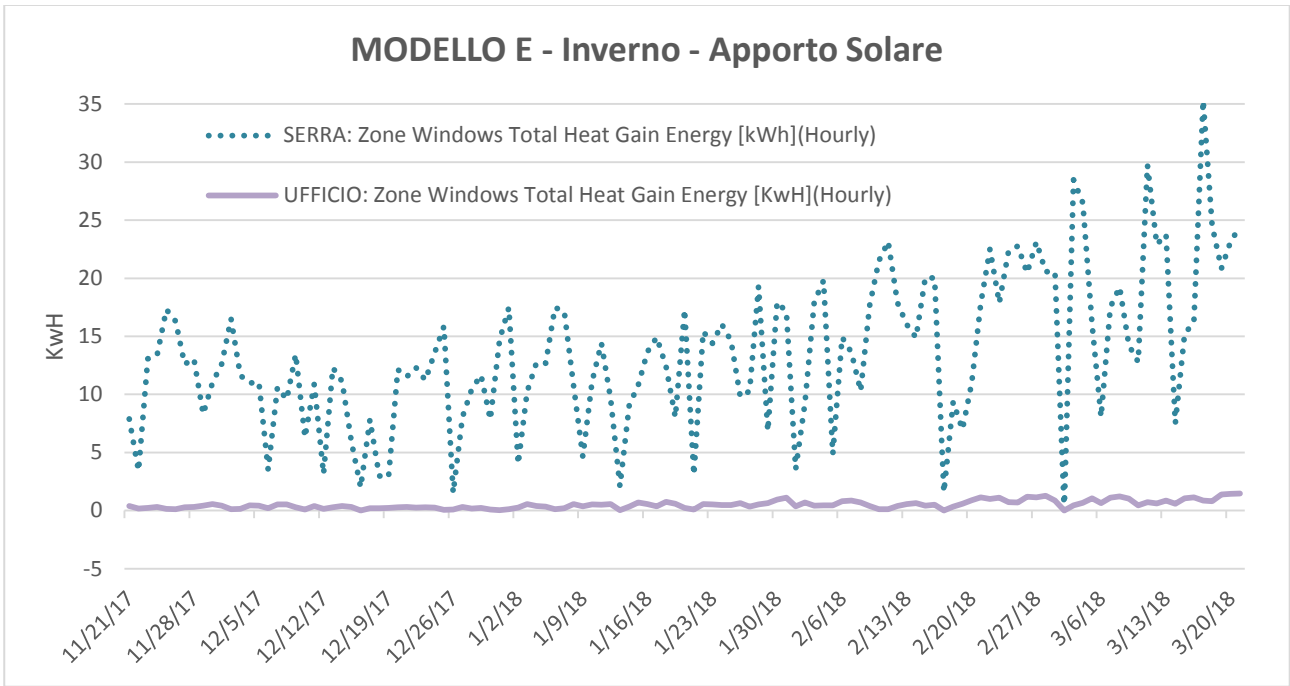


Grafico 35 MODELLO E Apporto Solare Gratuito in Inverno

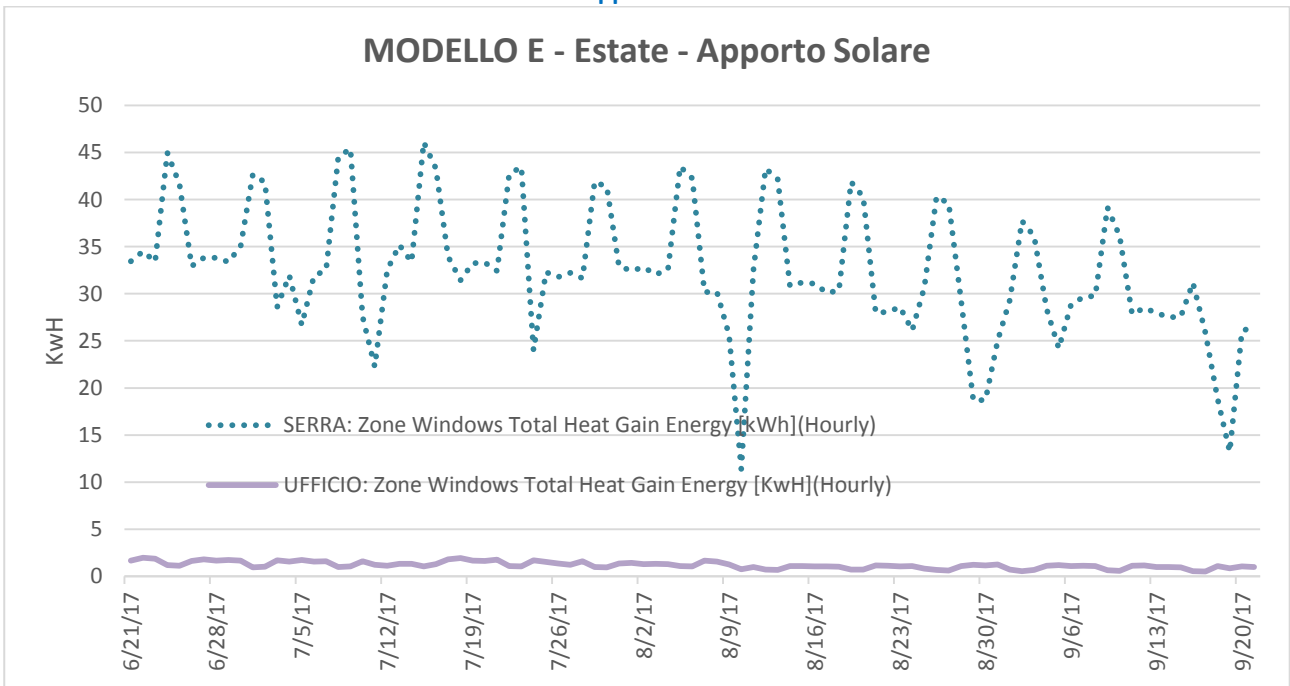


Grafico 36 MODELLO E Apporto Solare Gratuito in Estate

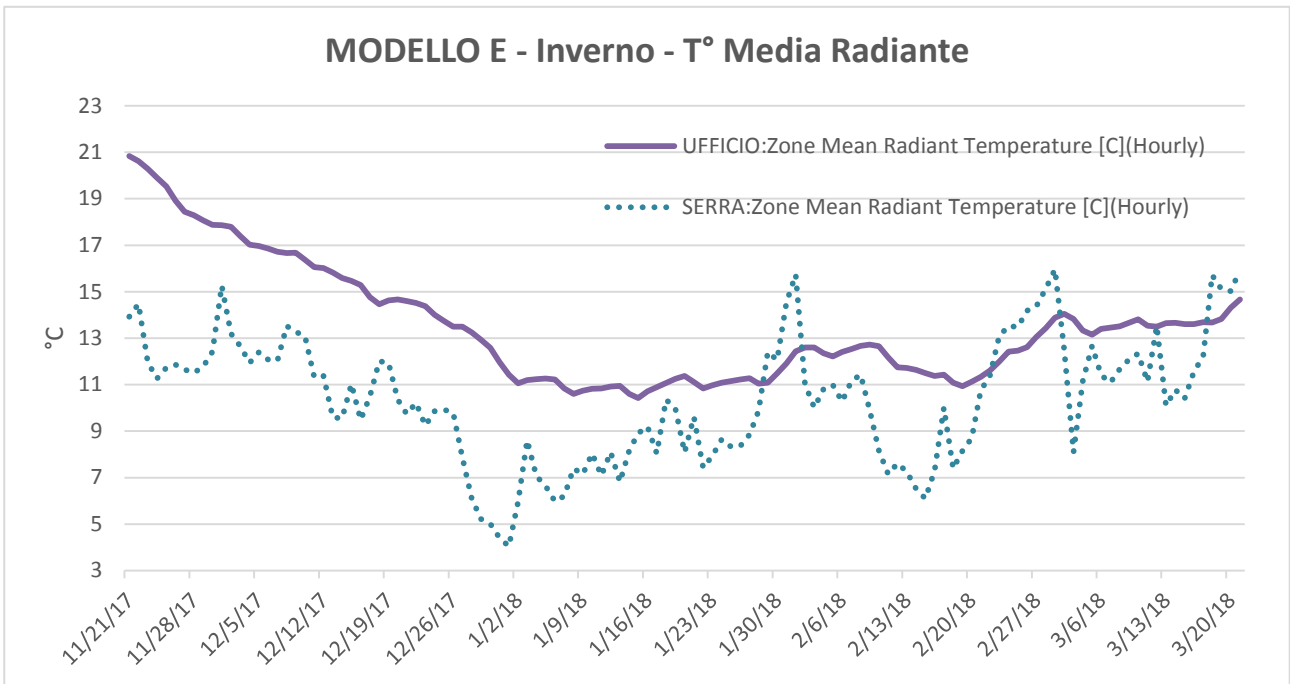


Grafico 37 MODELLO E Temperatura media radiante in Inverno

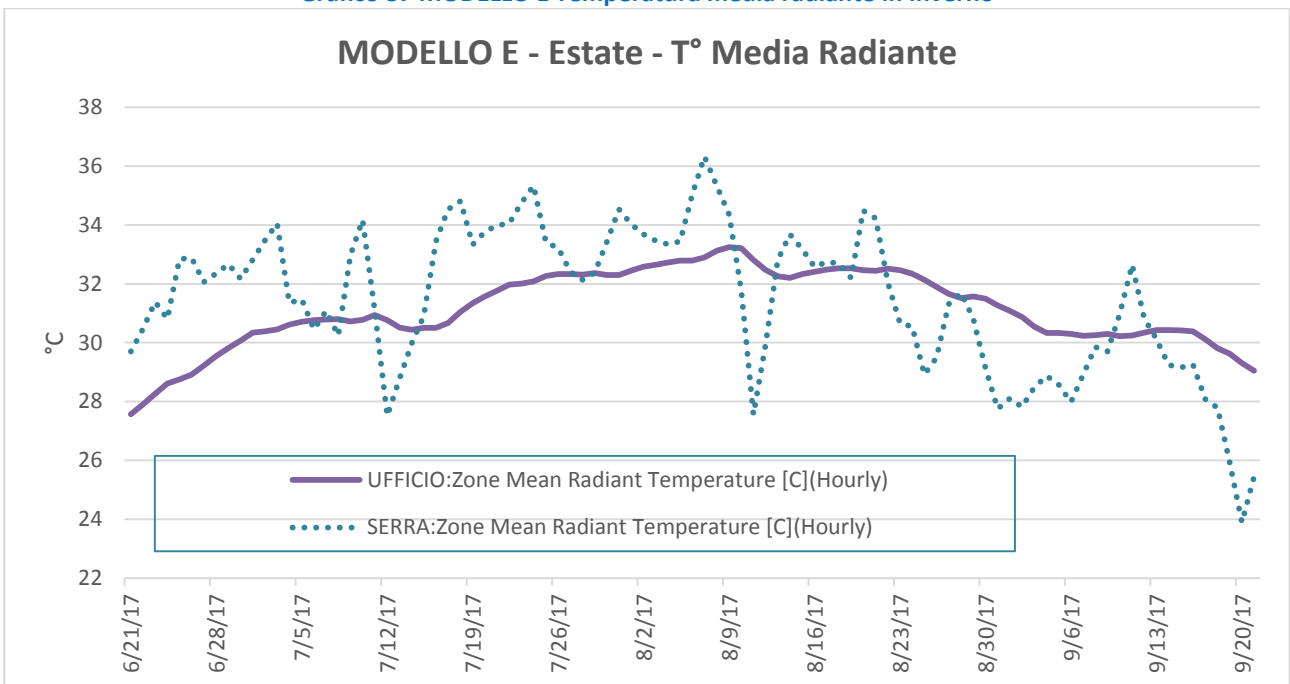


Grafico 38 MODELLO E Temperatura media radiante in Estate

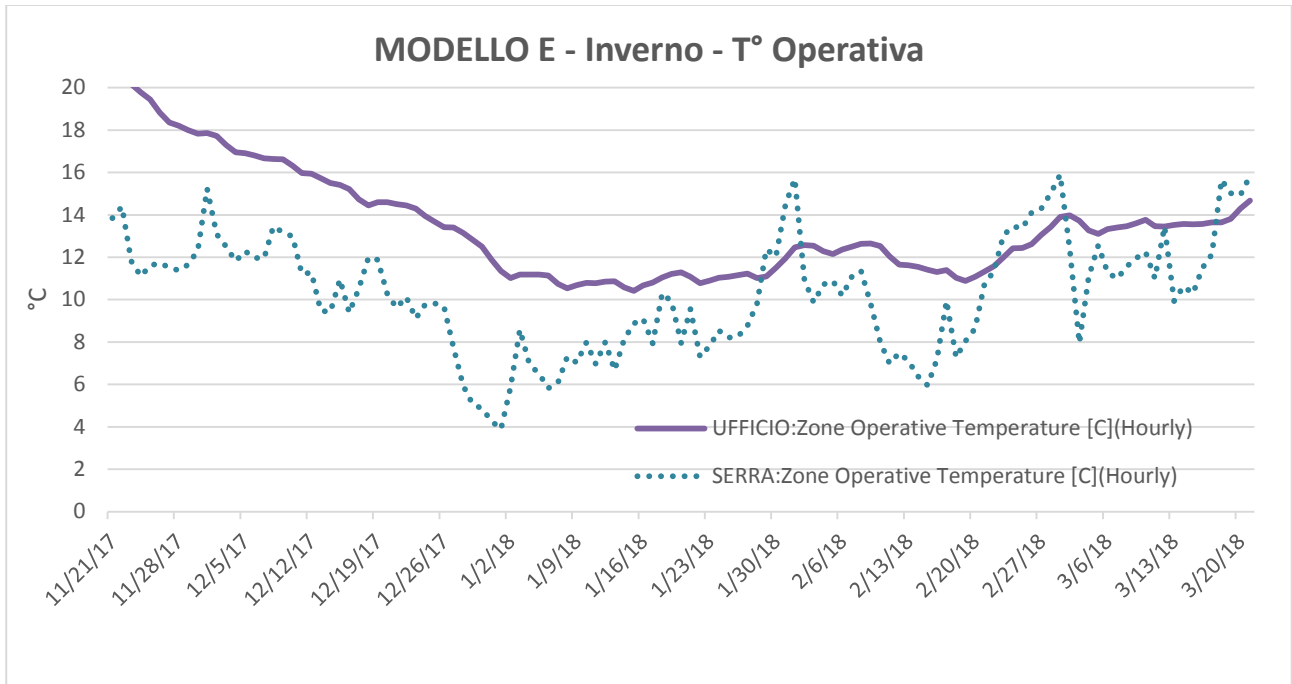


Grafico 39 Modello E Temperatura operativa in Inverno

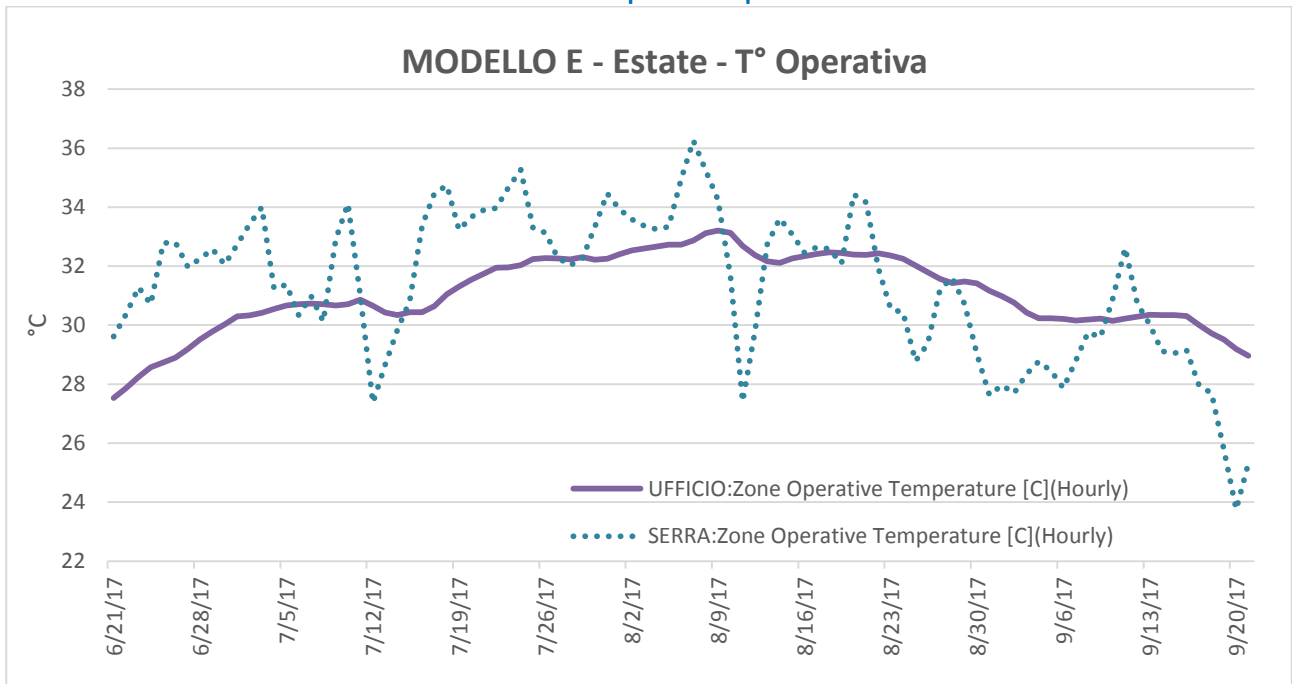


Grafico 40 MODELLO E Temperatura operativa in Estate

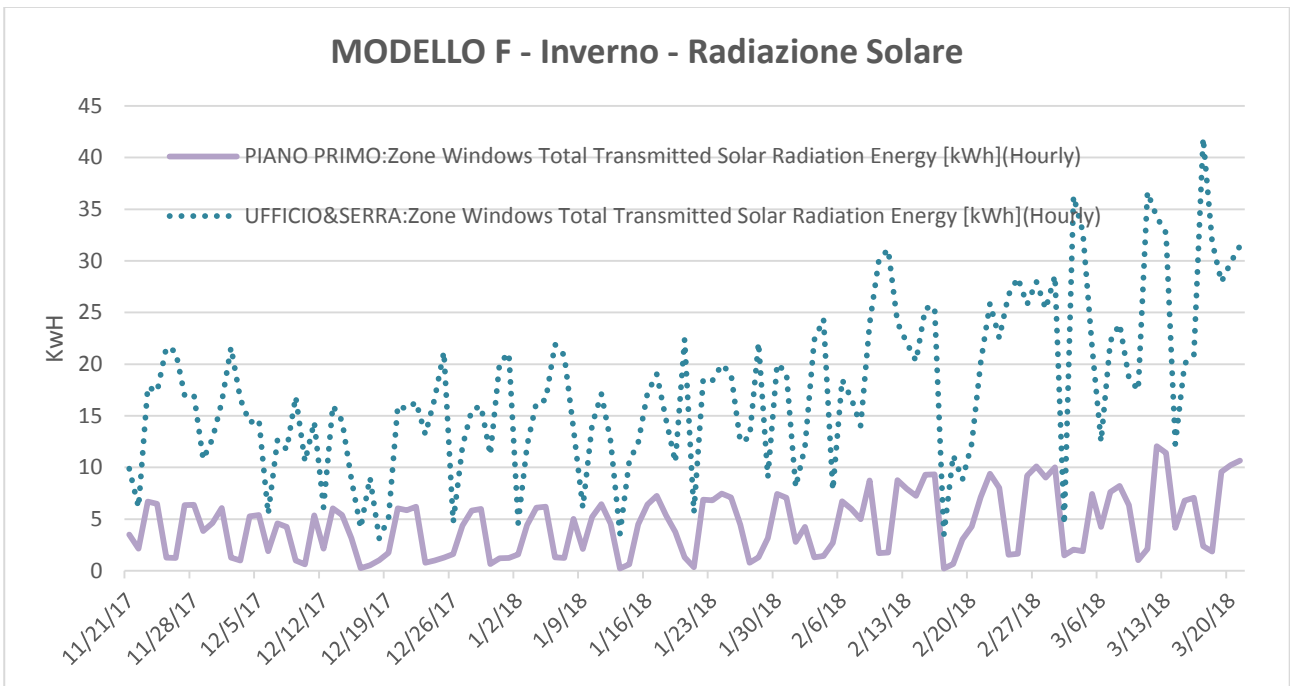


Grafico 41 MODELLO F Radiazione Solare in Inverno

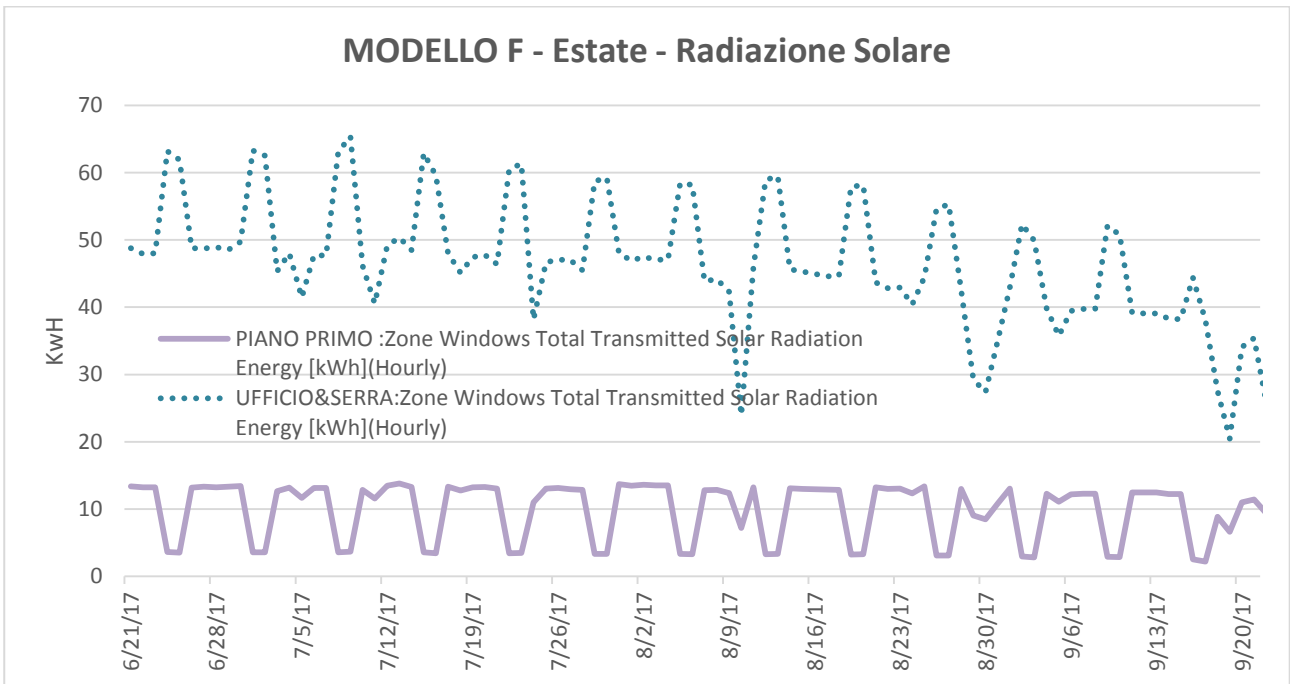


Grafico 42 MODELLO F Radiazione Solare in Estate

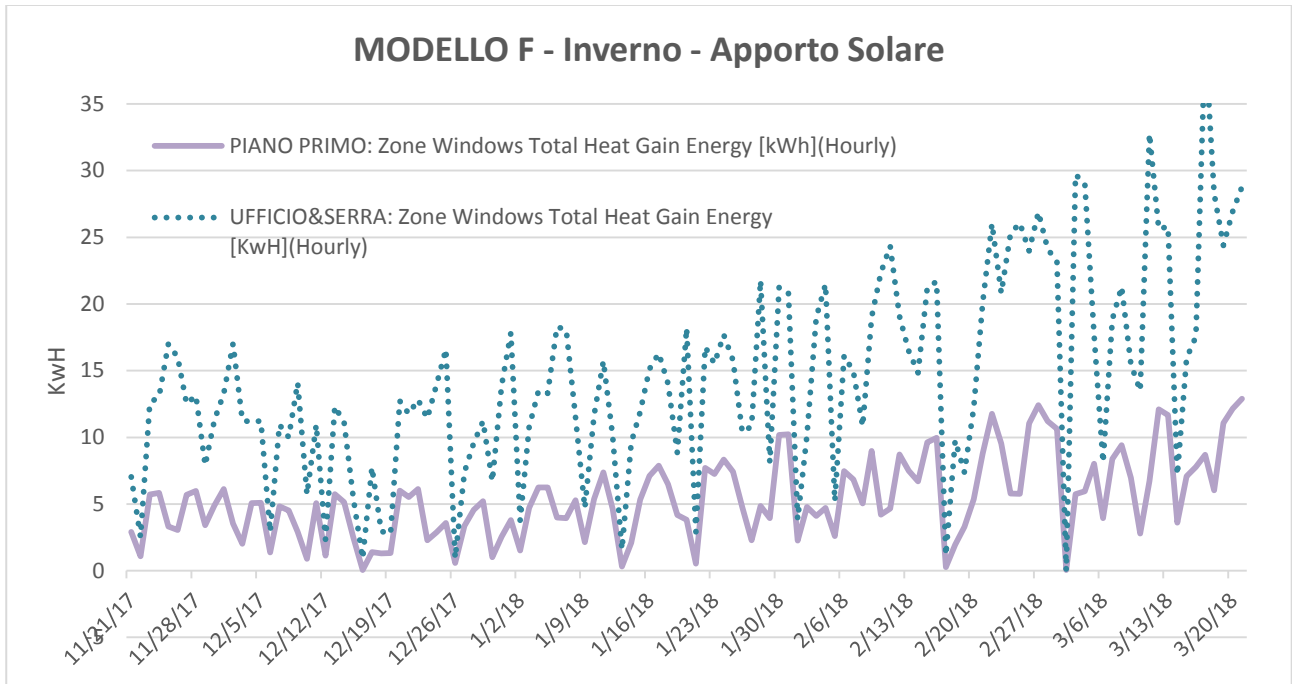


Grafico 43 MODELLO F Apporto solare gratuito in Inverno

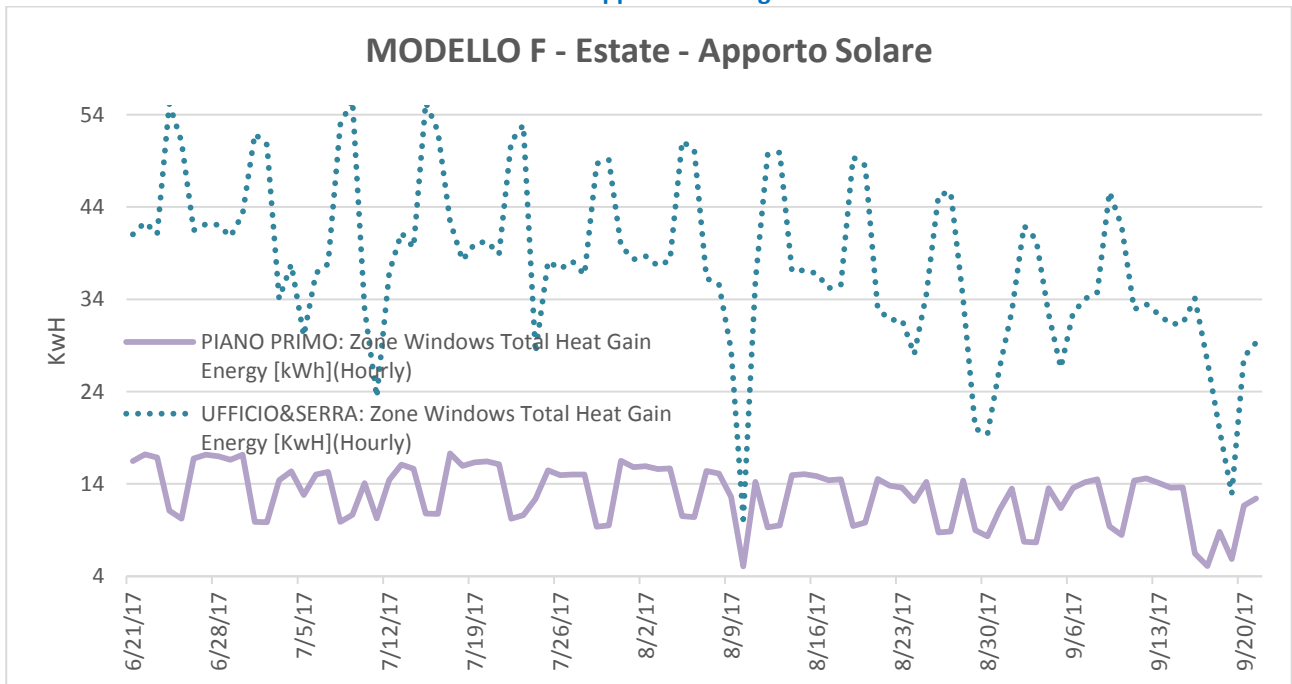


Grafico 44 MODELLO F Apporto solare gratuito in Estate

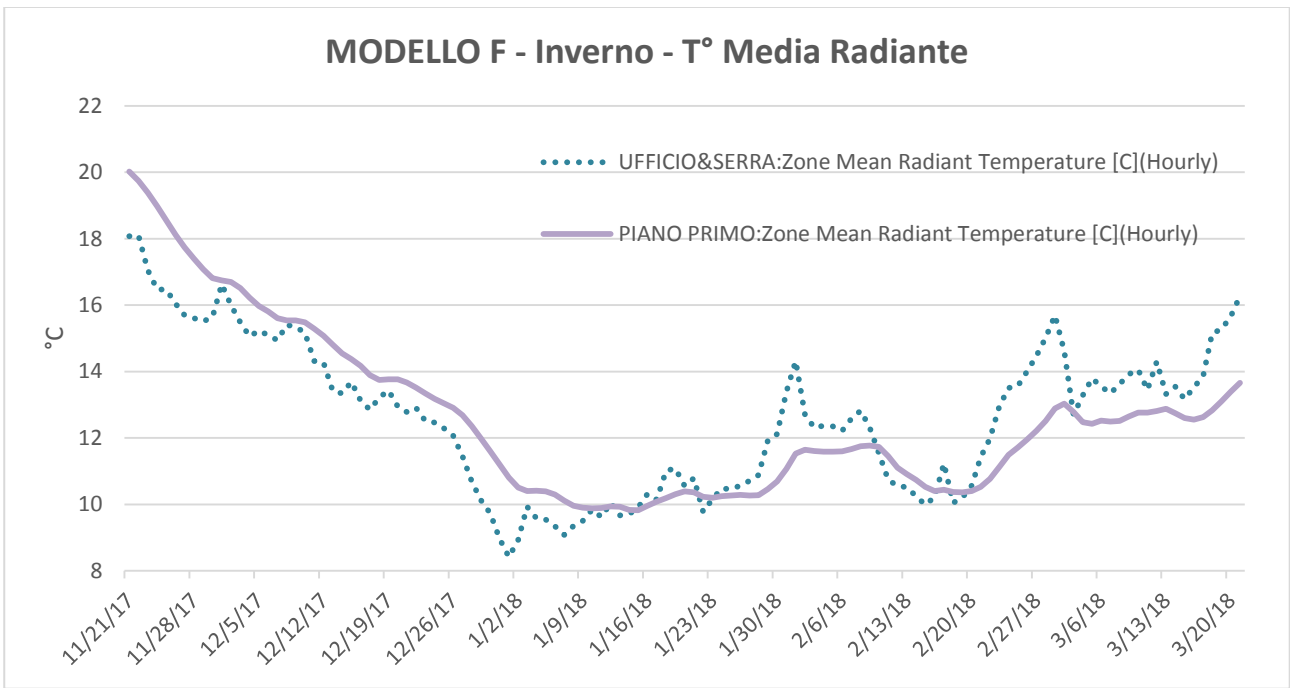


Grafico 45 MODELLO F Temperatura media radiante in Inverno

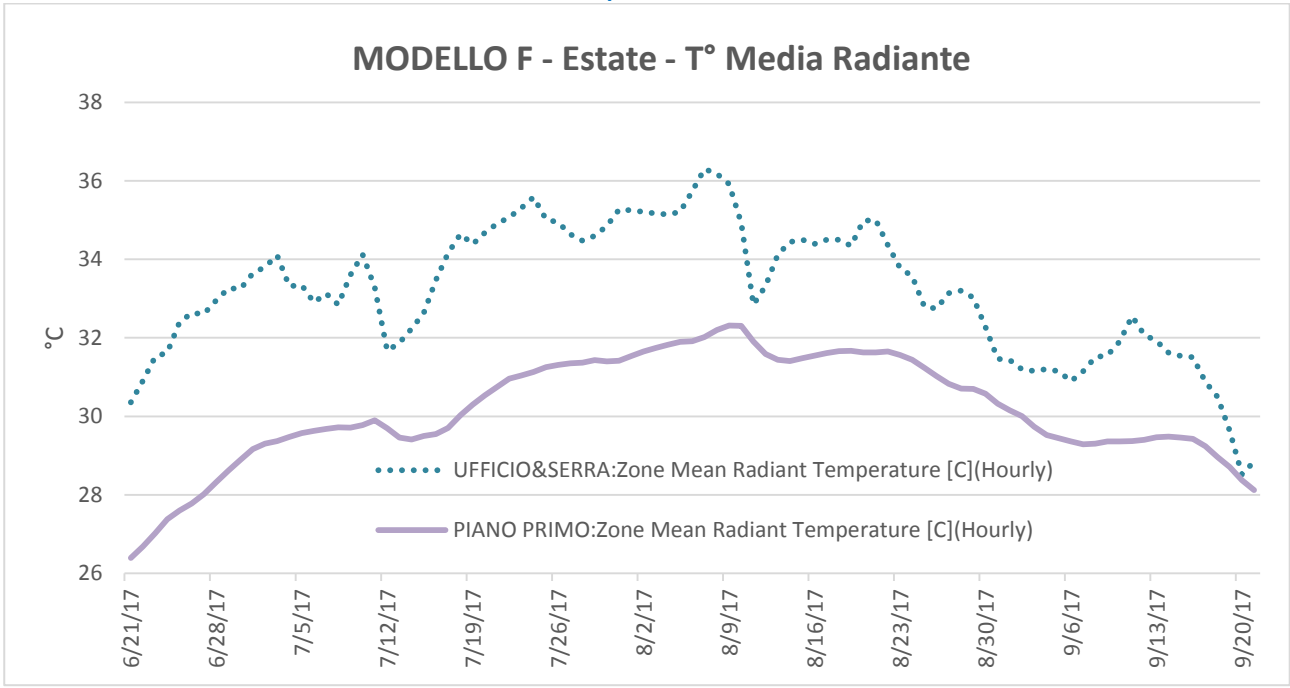


Grafico 46 MODELLO F Temperatura media radiante in Estate

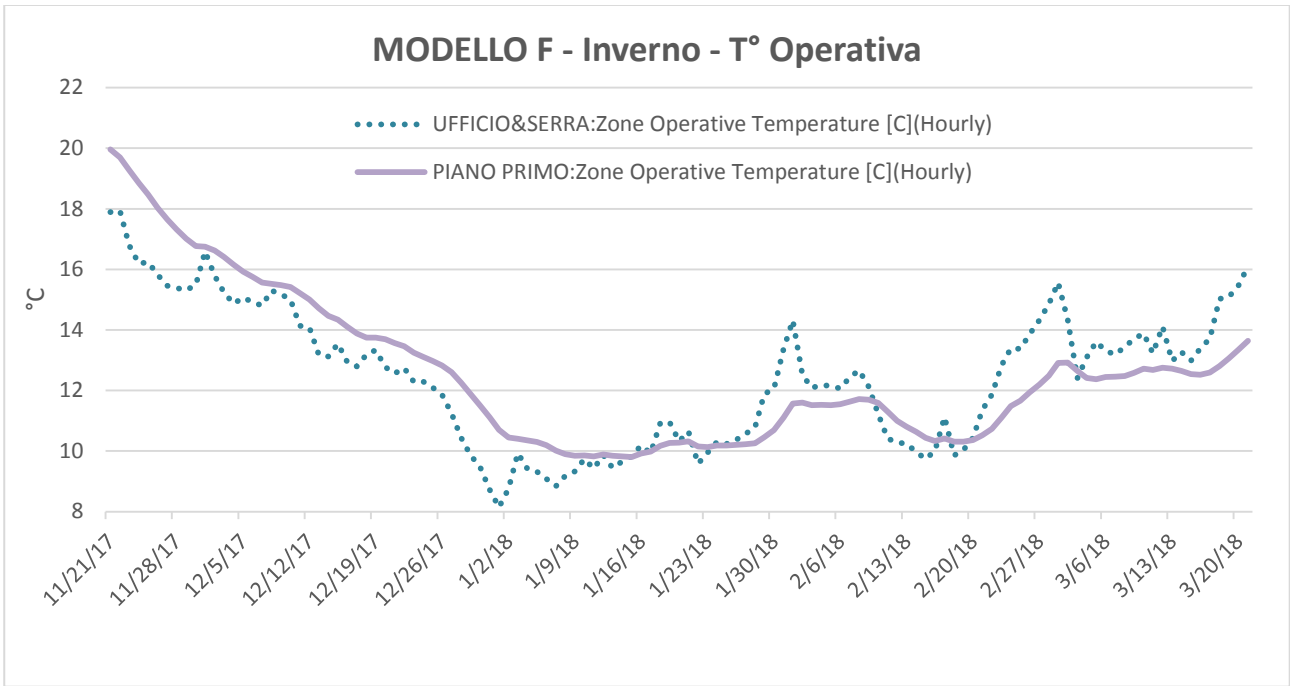


Grafico 47 MODELLO F Temperatura operativa in Inverno

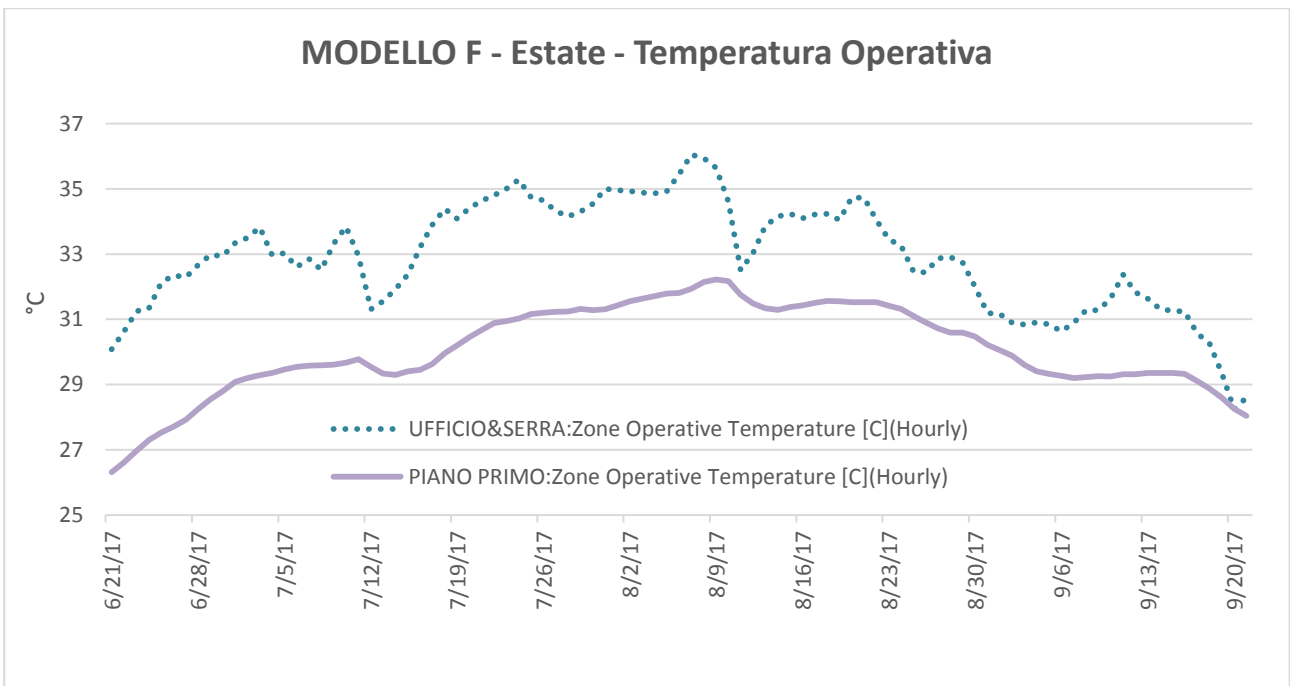


Grafico 48 MODELLO F Temperatura operativa in Estate

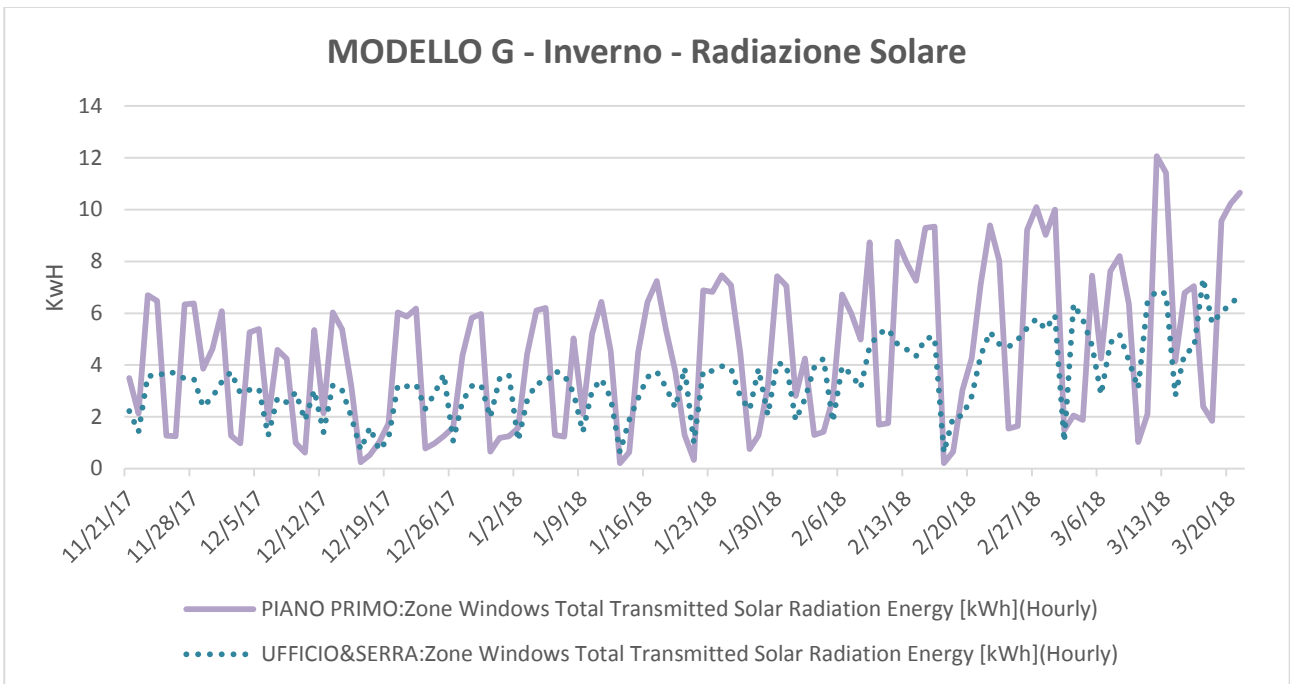


Grafico 49 MODELLO G Radiazione solare totale in Inverno

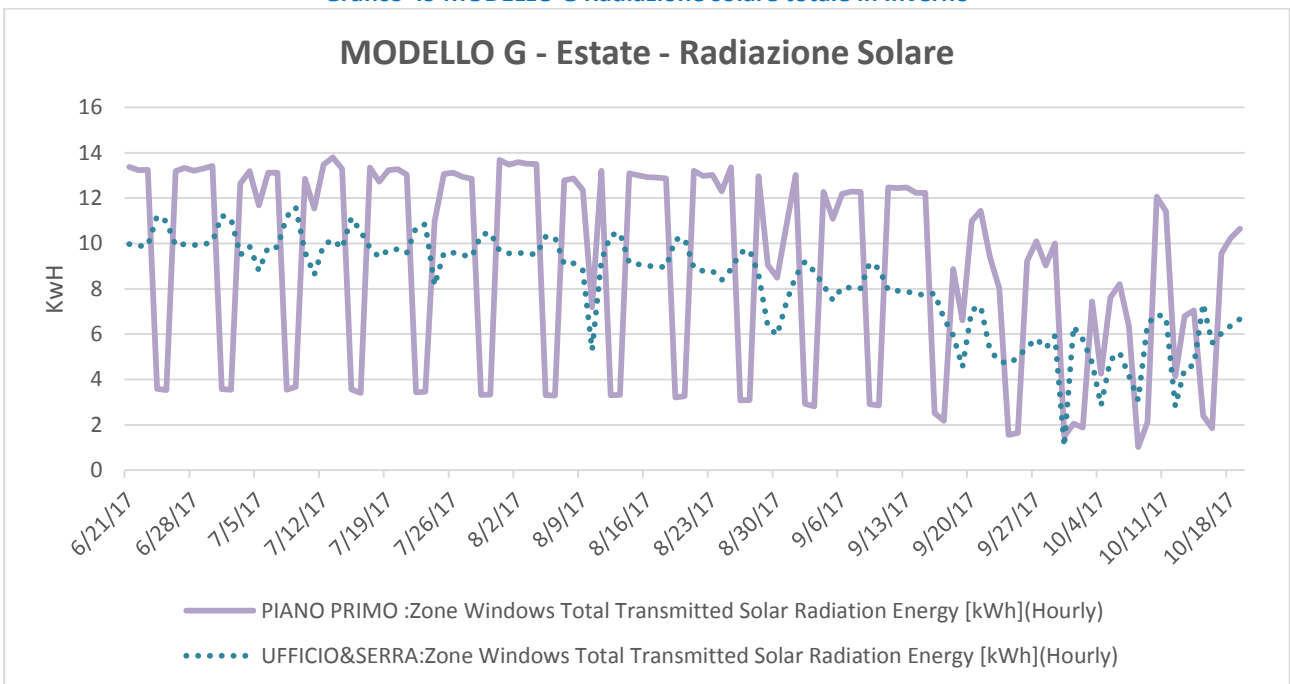


Grafico 50 MODELLO G Radiazione solare totale in Estate

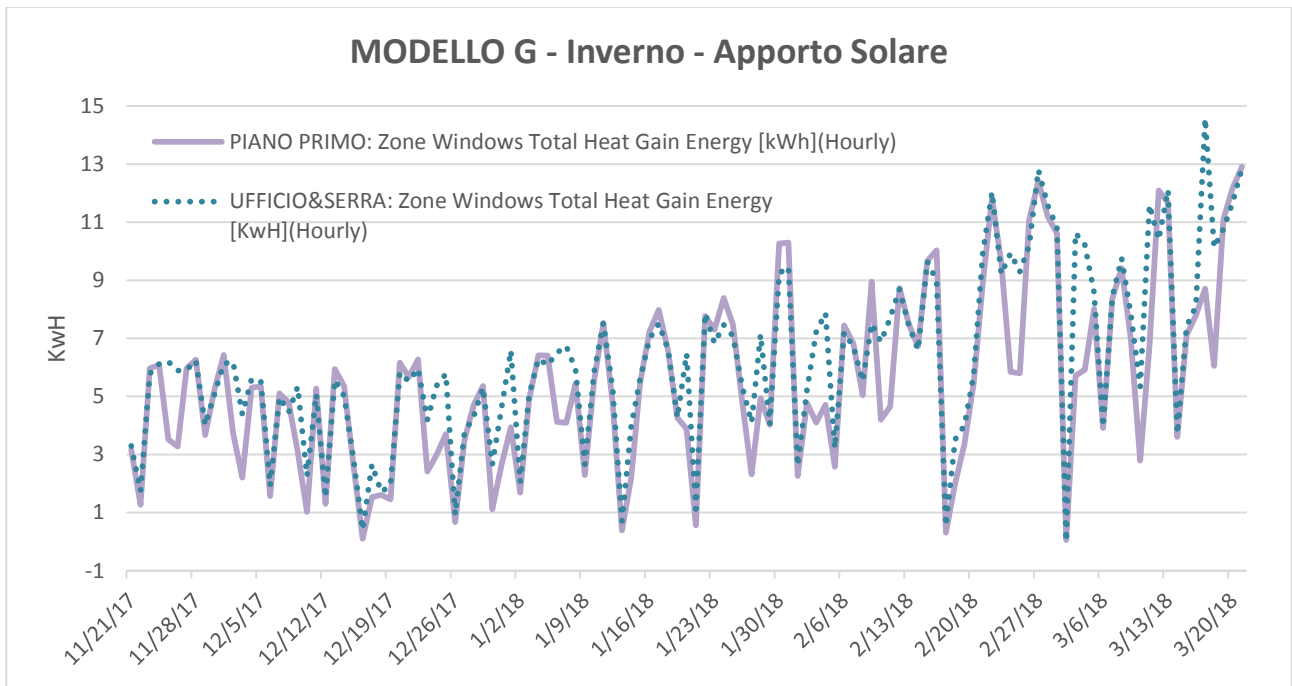


Grafico 51 MODELLO G Apporti solari in Inverno

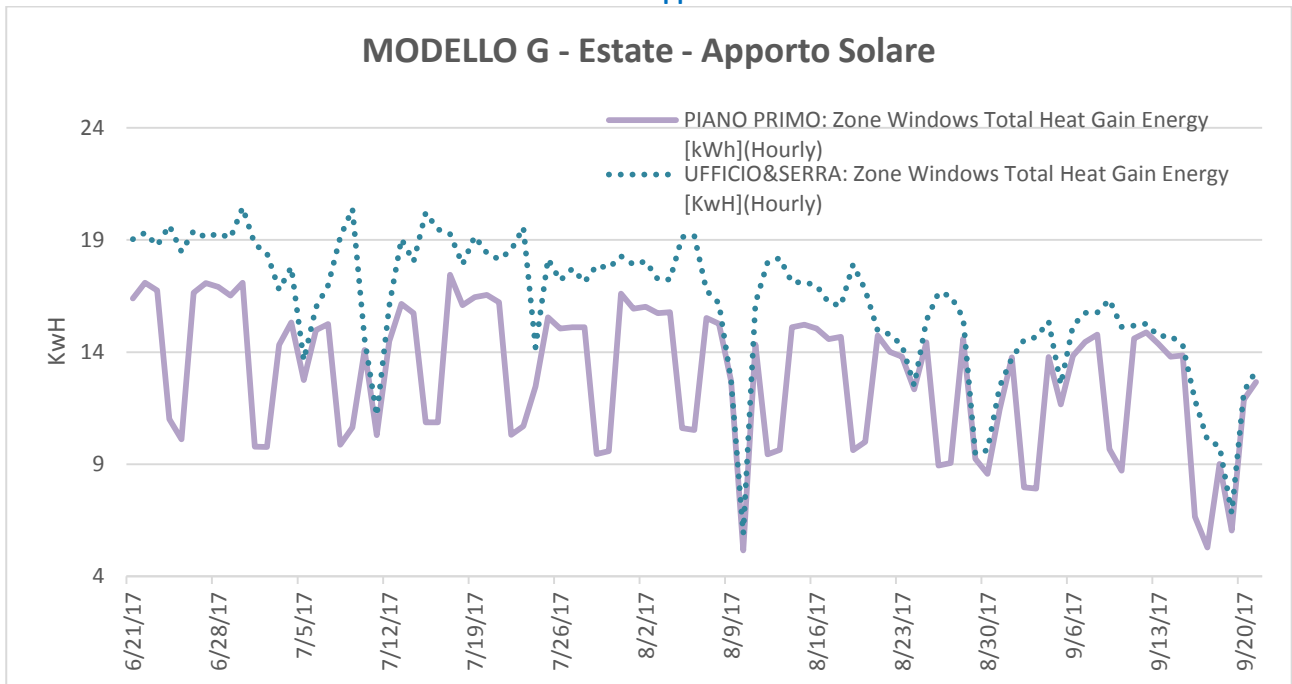


Grafico 52 MODELLO G Apporti solari in Estate

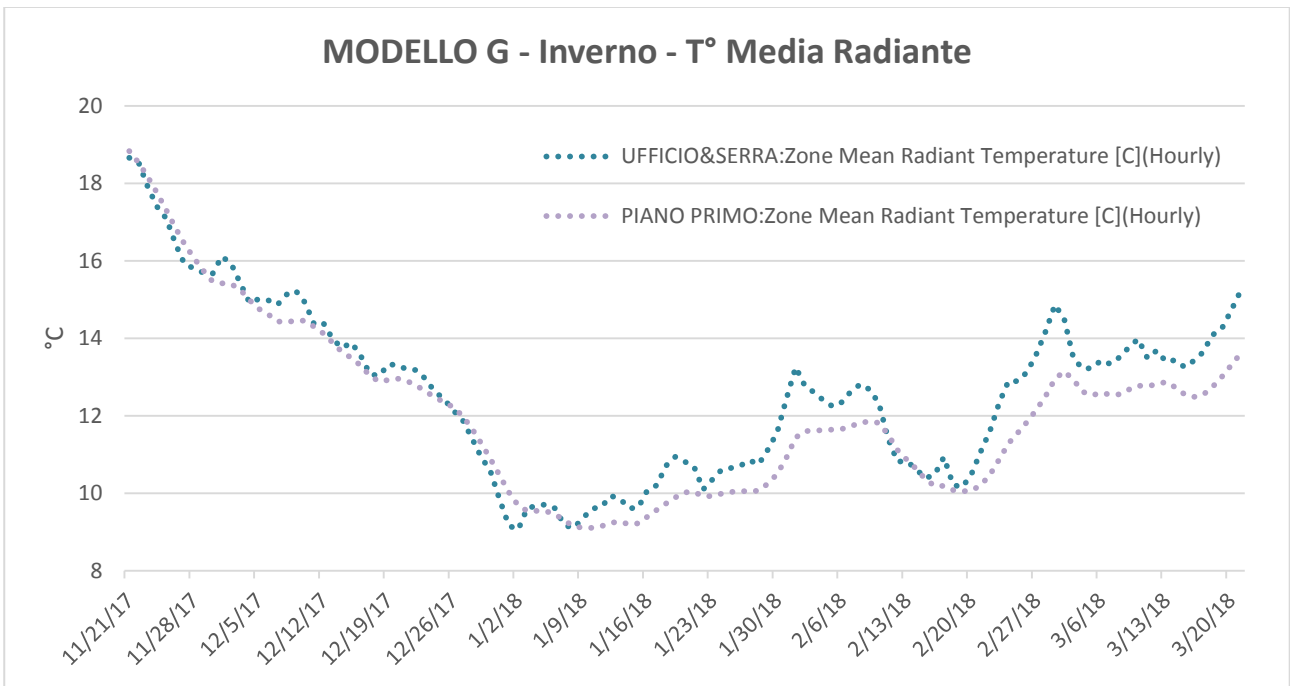


Grafico 53 MODELLO G Temperatura media radiante in Inverno

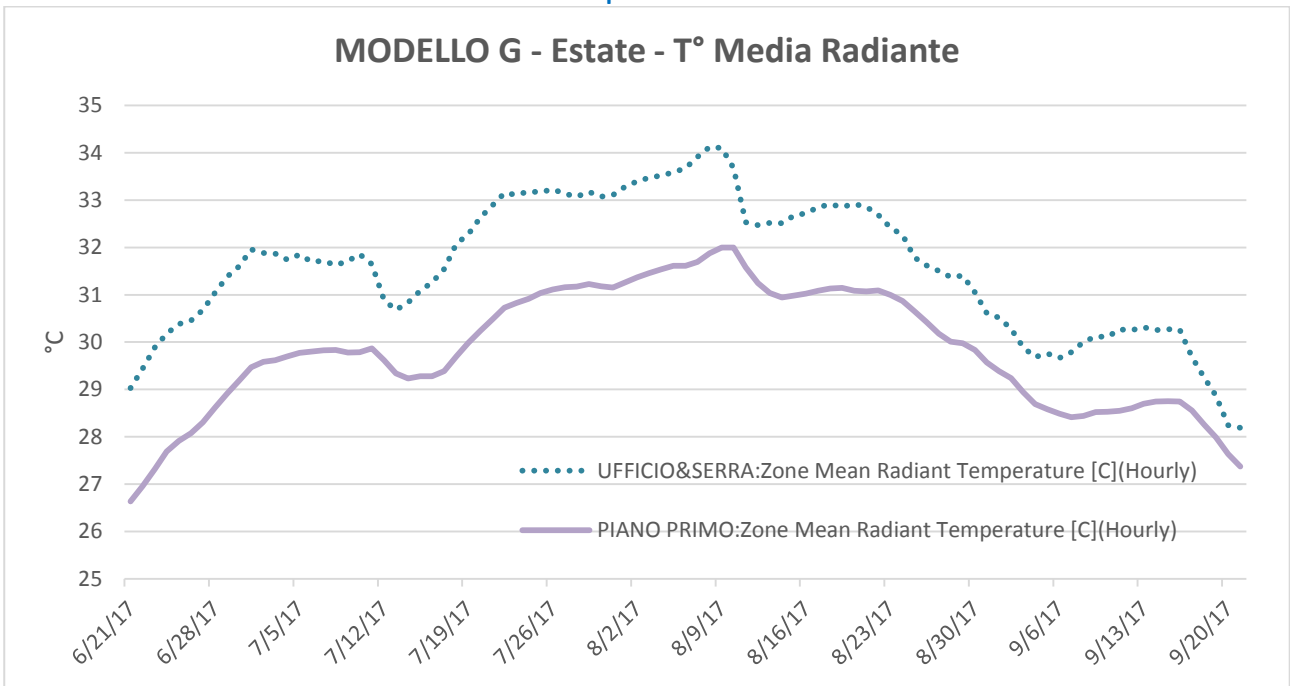


Grafico 54 MODELLO G Temperatura media radiante in Estate

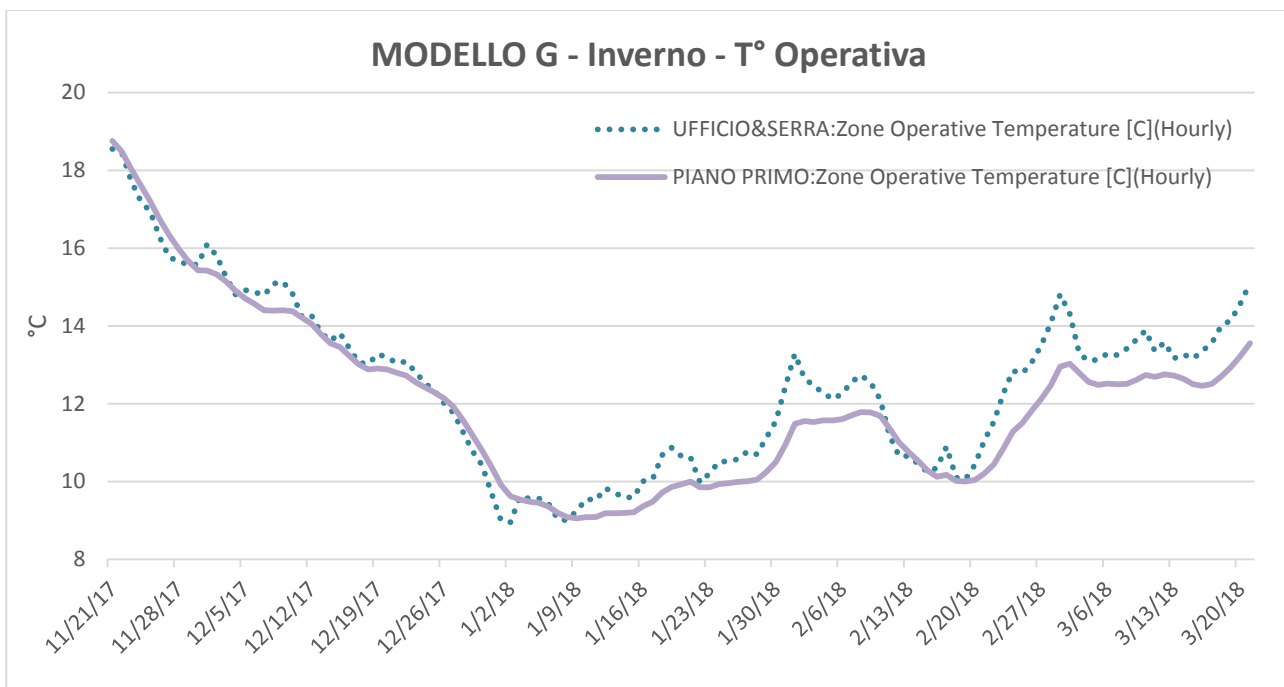


Grafico 55 MODELLO G Temperatura operativa in Inverno

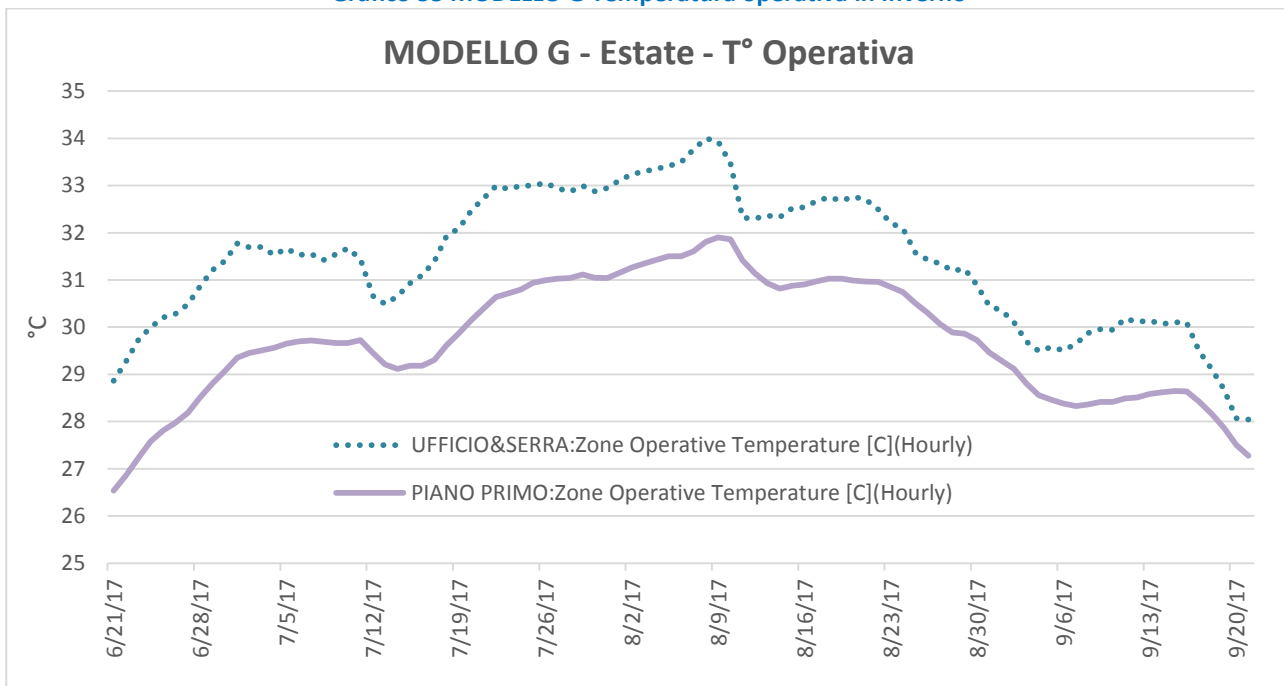


Grafico 56 MODELLO G Temperatura operativa in Estate

Il **MODELLO H** costituisce variante rispetto al modello B dovuto alla sostituzione delle lastre in policarbonato e del vetro semplice con un vetro doppio, basso emissivo dotato di pellicola solare.

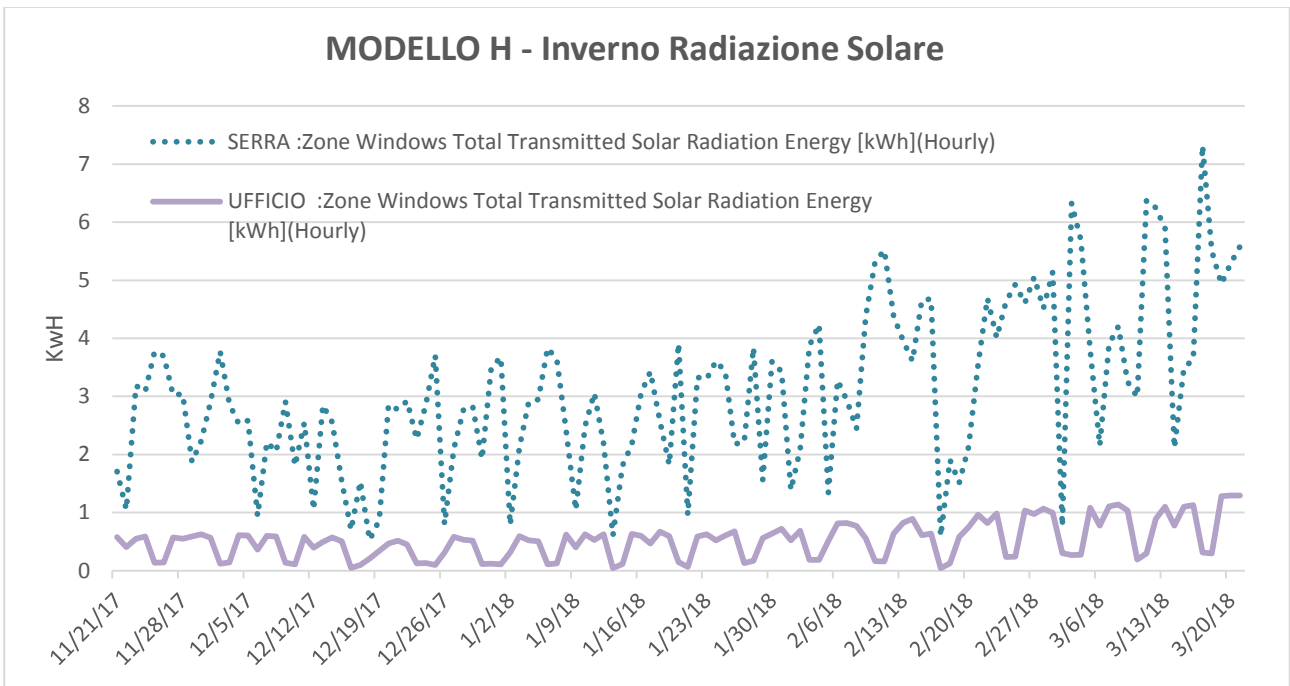


Grafico 57 MODELLO H Radiazione Solare in Inverno

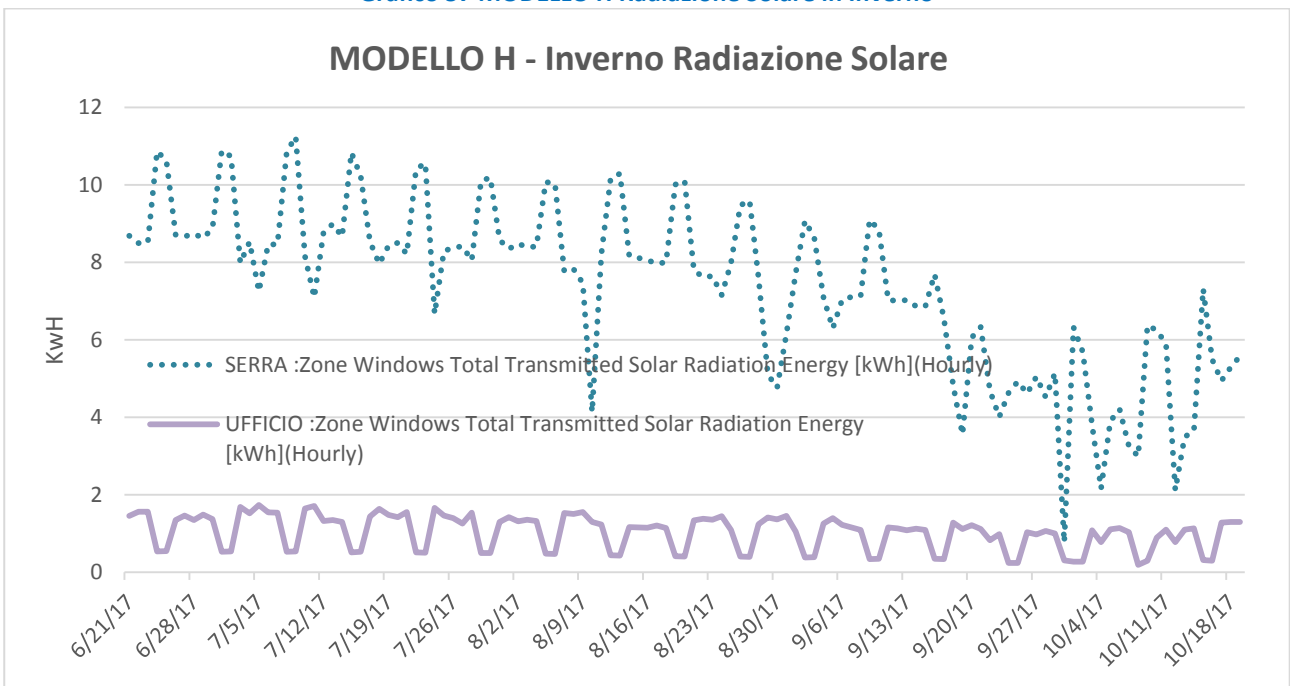


Grafico 58 MODELLO H Radiazione Solare in Estate

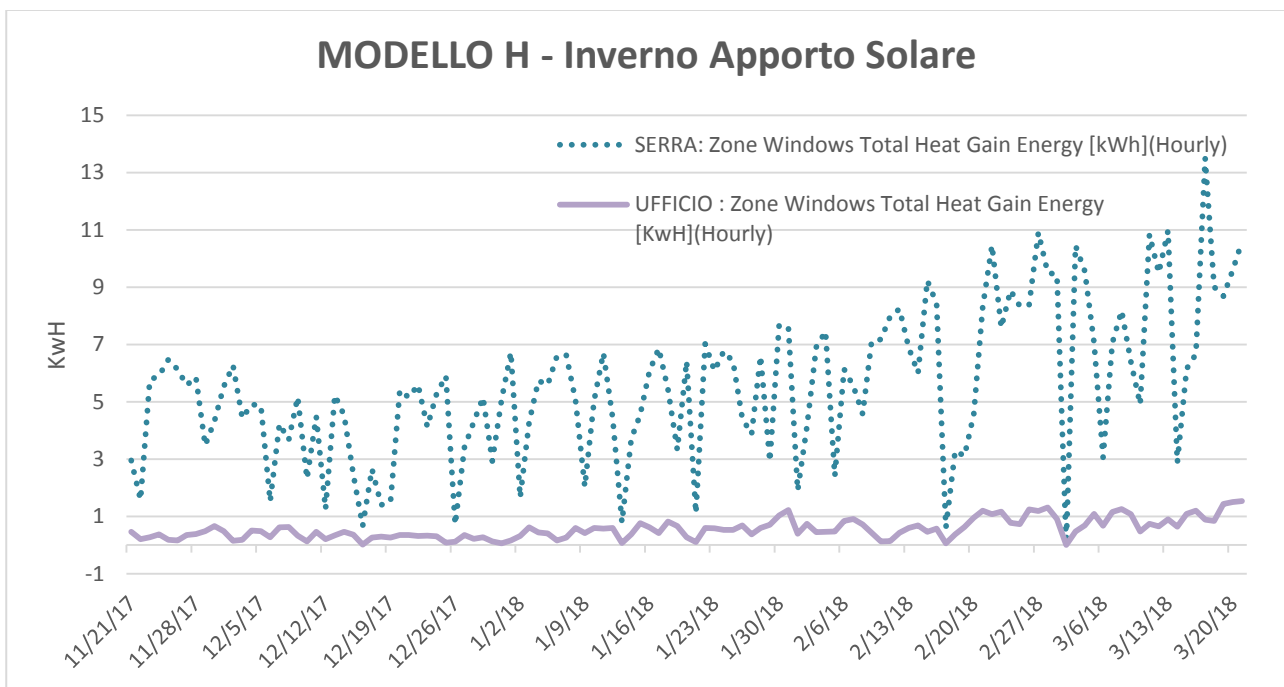


Grafico 59 MODELLO H Apporto Solare Gratuito in Inverno

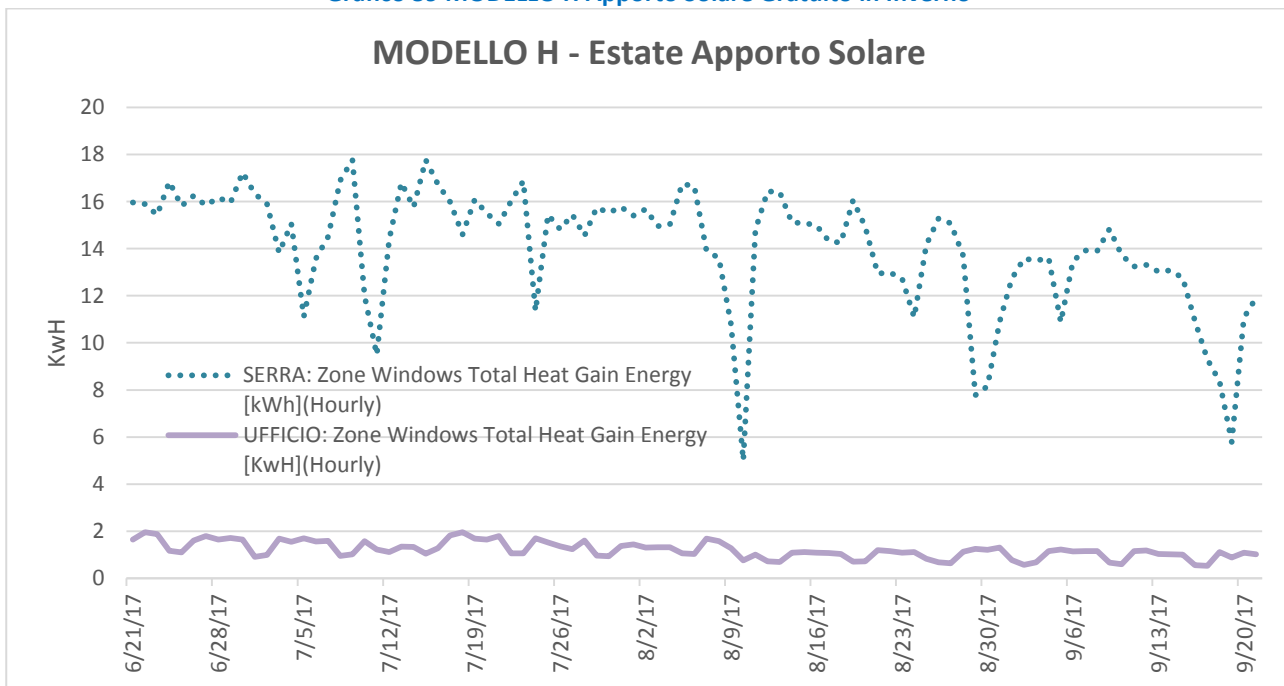


Grafico 60 MODELLO H Apporto Solare Gratuito in Estate

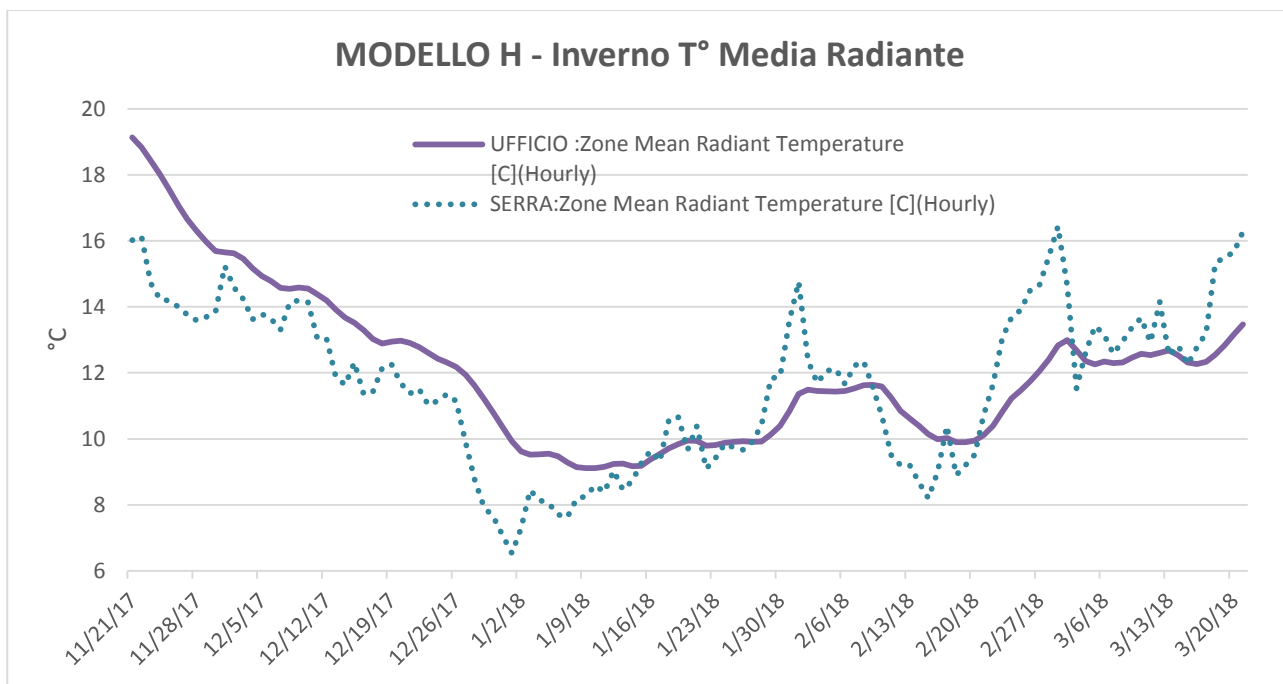


Grafico 61 MODELLO H Temperatura media radiante in Inverno

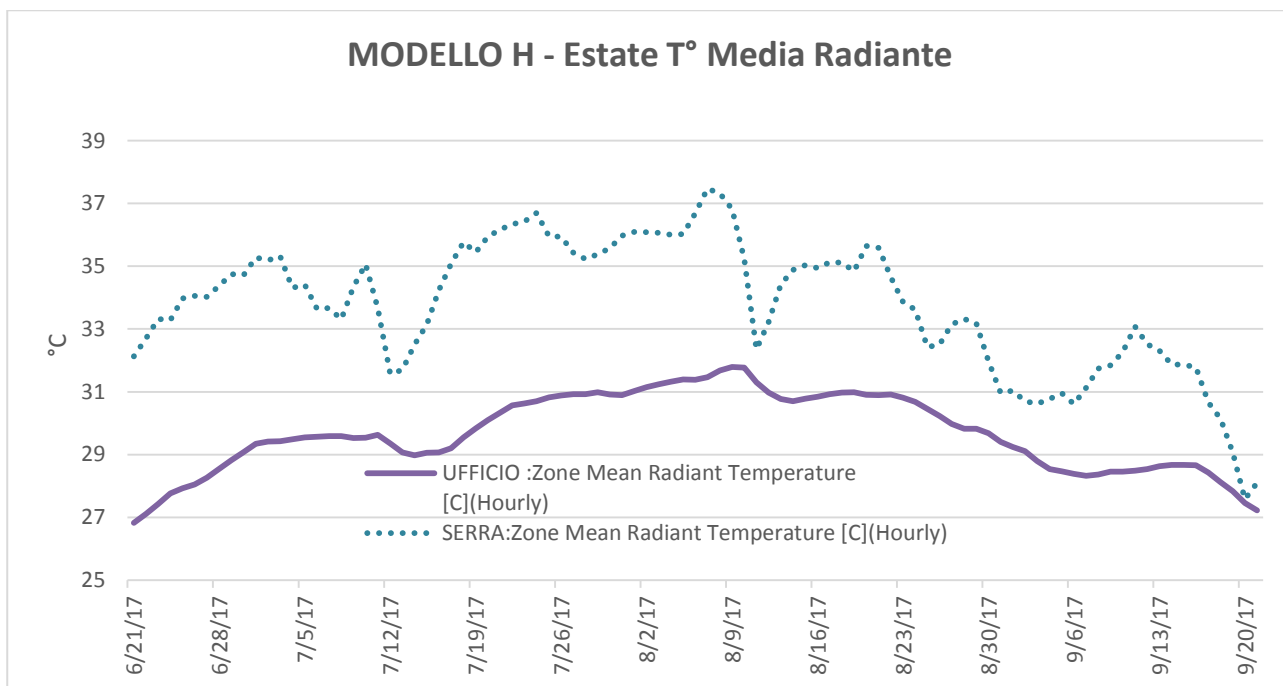


Grafico 62 MODELLO H Temperatura media radiante in Estate

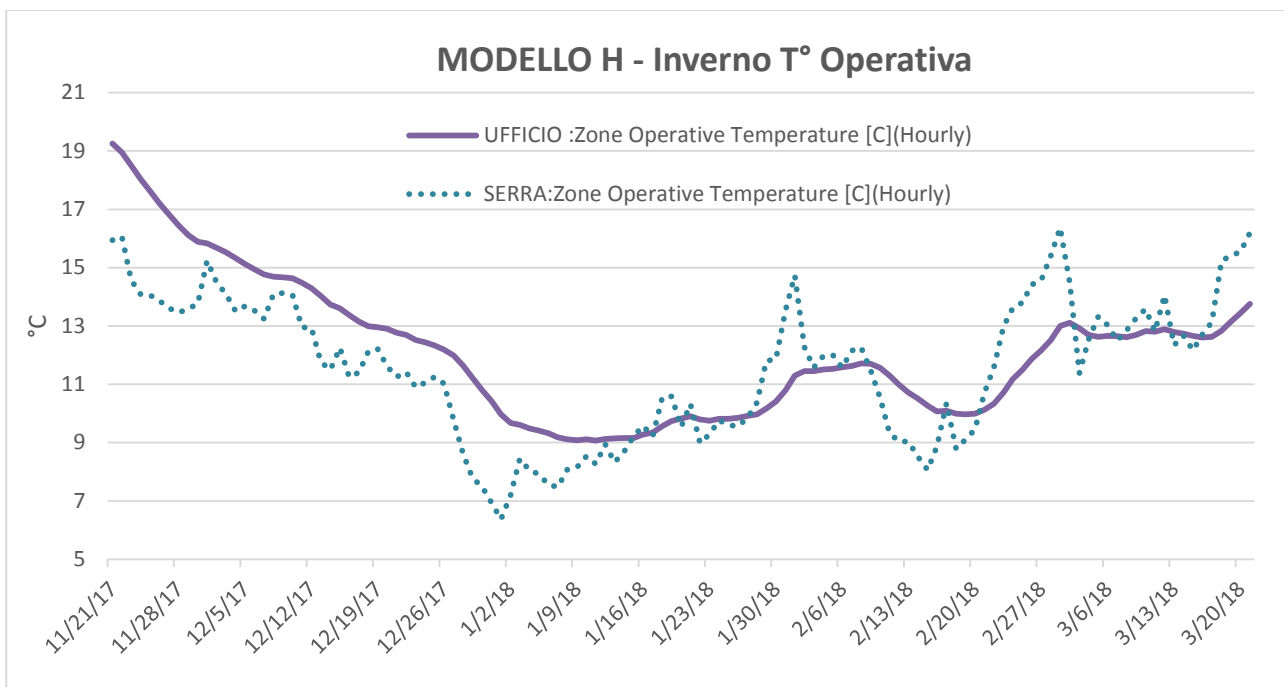


Grafico 63 MODELLO H Temperatura Operativa in Inverno

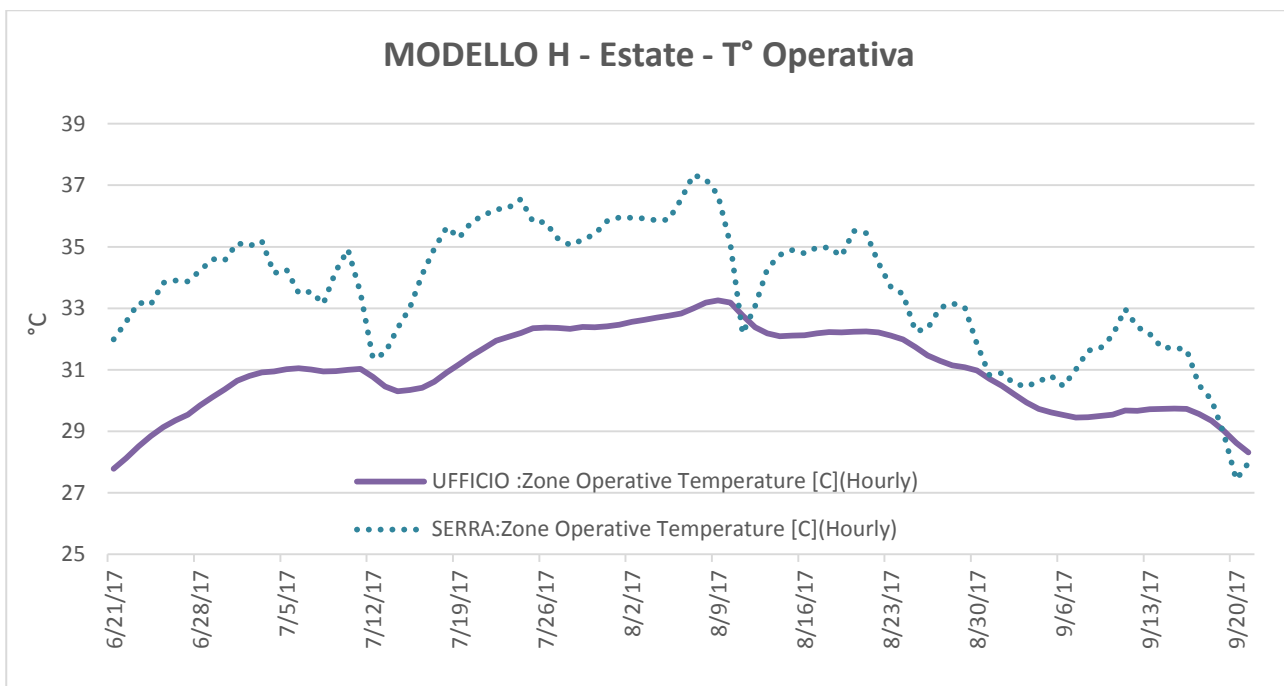


Grafico 64 MODELLO H Temperatura Operativa in Estate

2.7 Simulazione del comportamento energetico del fabbricato a confronto tra i vari modelli comportamentali

2.7.1 Confronto modelli A e B

I grafici di seguito riportati mettono a confronto i due modelli A e B ossia il comportamento dell'edificio Scuola delle Energie allo stato attuale e nello stato di progetto dopo la realizzazione della serra bioclimatica.

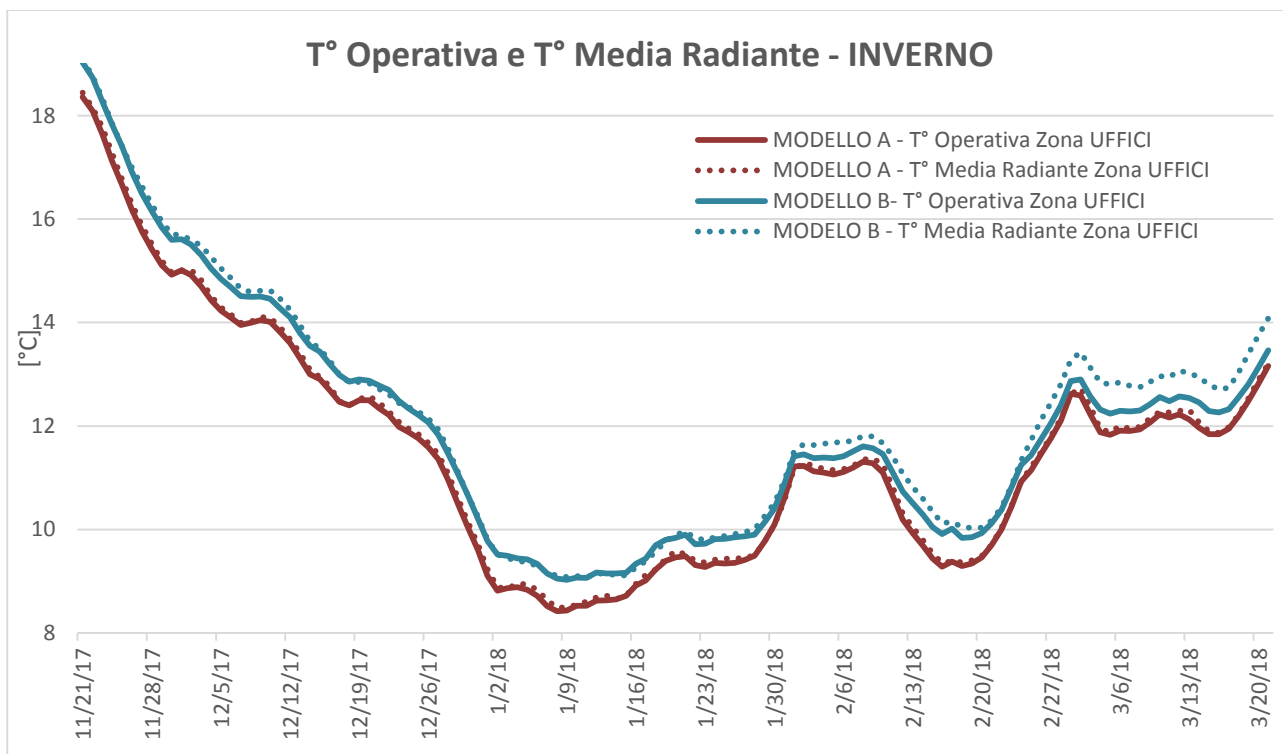


Grafico 65 MODELLO A e B a confronto in Inverno T° Operativa e T° MR

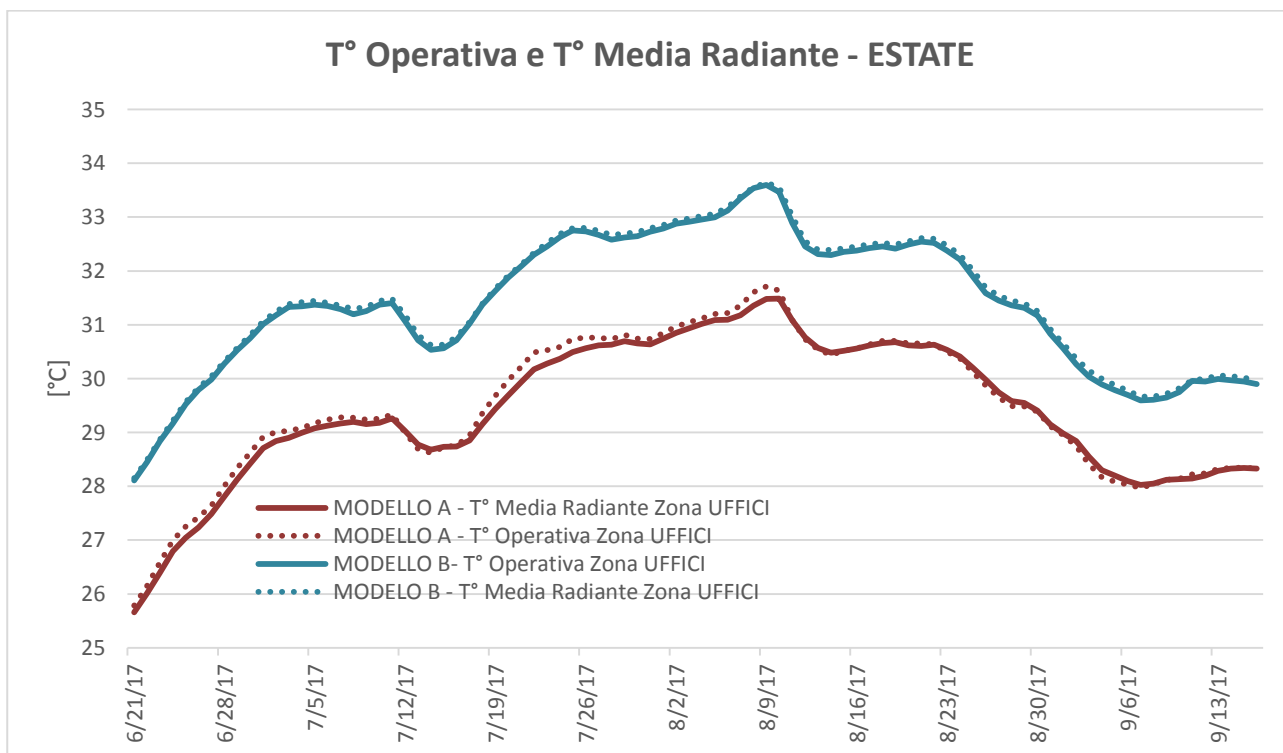


Grafico 66 MODELLO A e B a confronto in Estate T° Operativa e T° MR

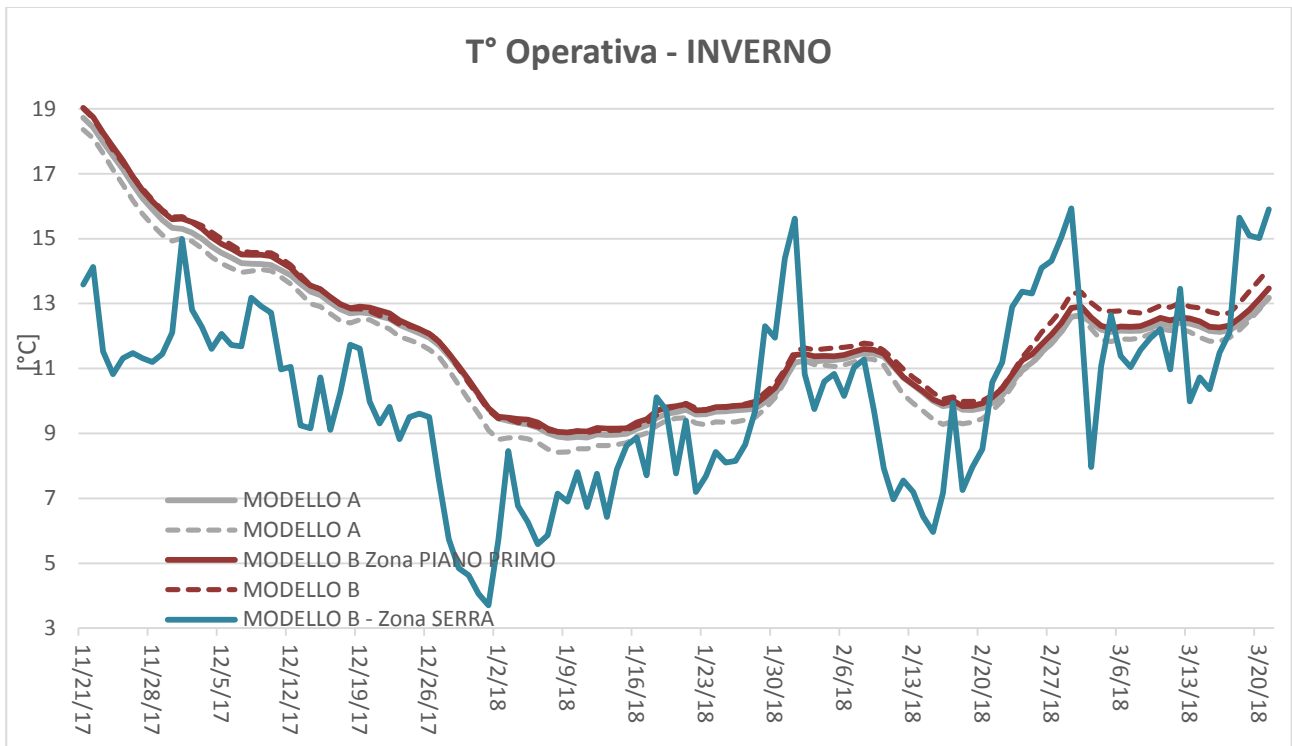


Grafico 67 MODELLO A e B a confronto in Inverno T° Operativa in inverno

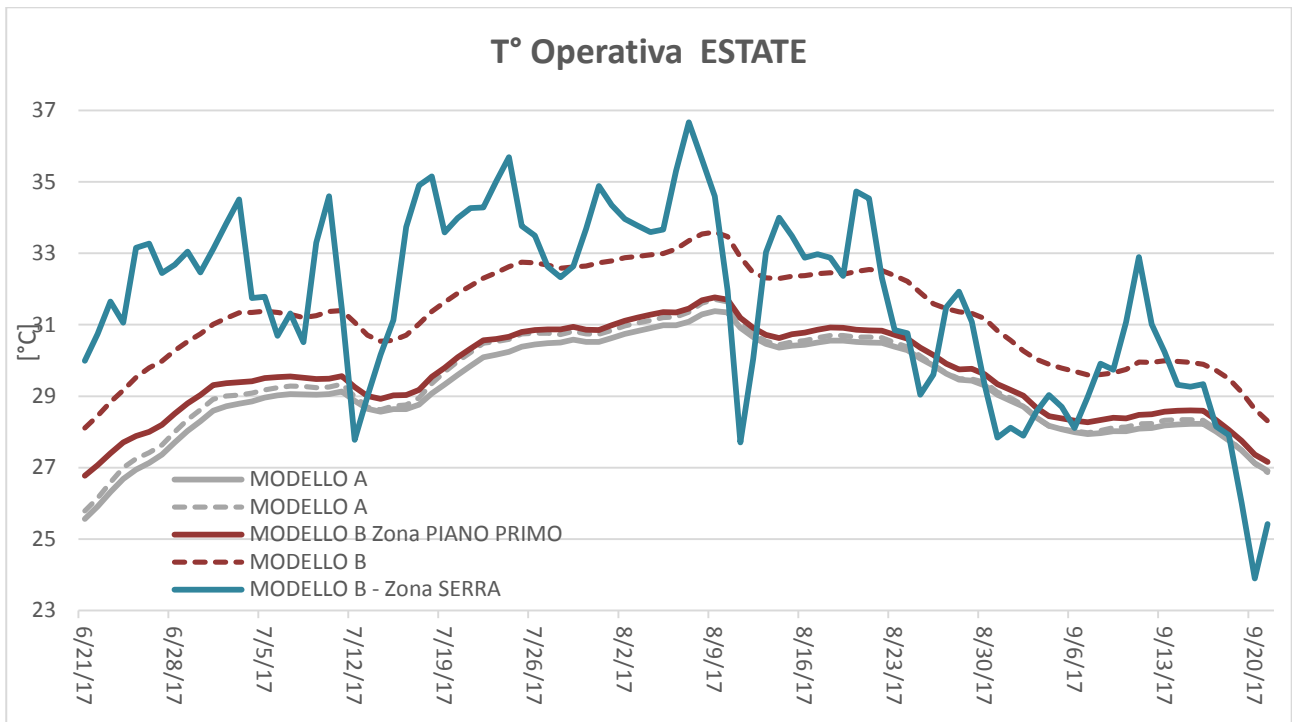


Grafico 68 MODELLO A e B a confronto in Inverno T° Operativa in estate

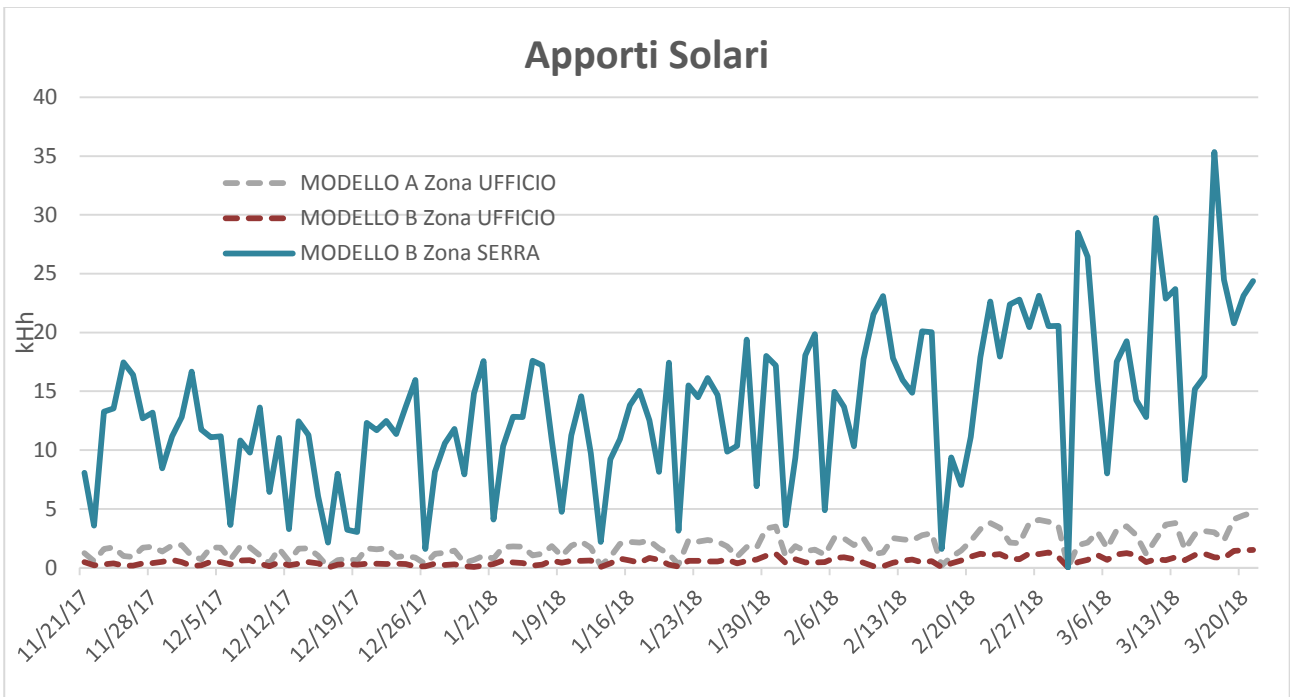


Grafico 69 MODELLO A e B a confronto in Inverno Apporti Solari

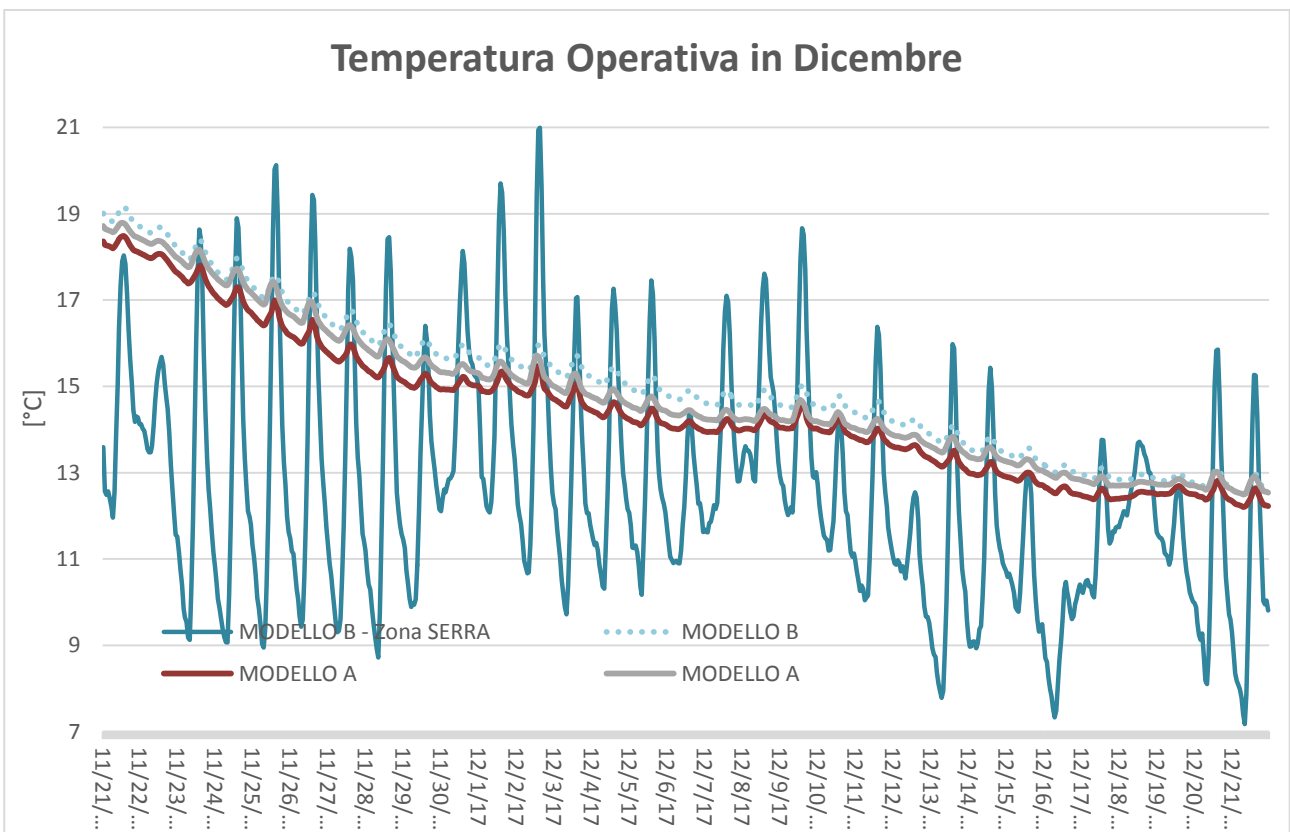


Grafico 70 MODELLI A e B a confronto. ΔT° Zona UFFICI: 0,608°C

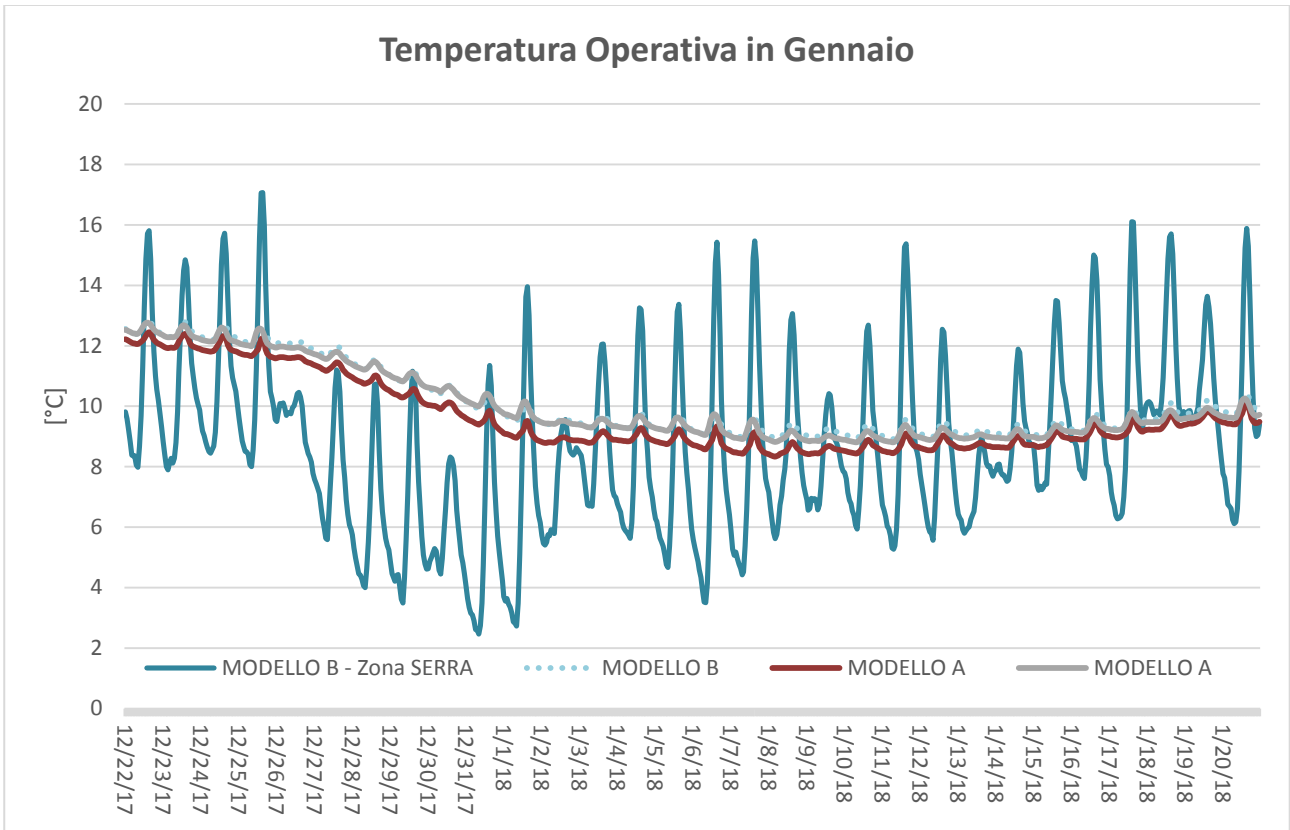


Grafico 71 MODELLI A e B a confronto - ΔT° Zona UFFICI: 0,470°C

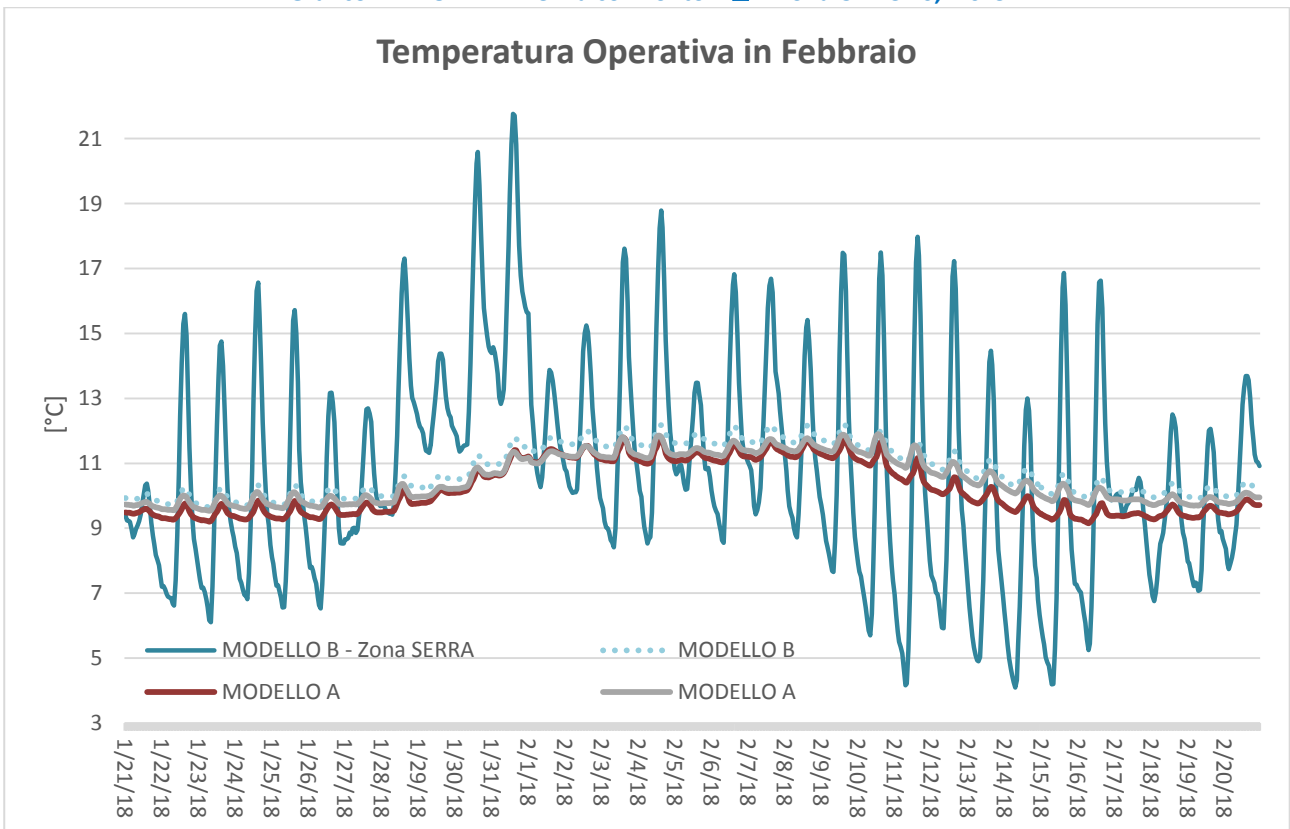


Grafico 72 MODELLI A e B a confronto - ΔT° Zona UFFICI: 0,550°C

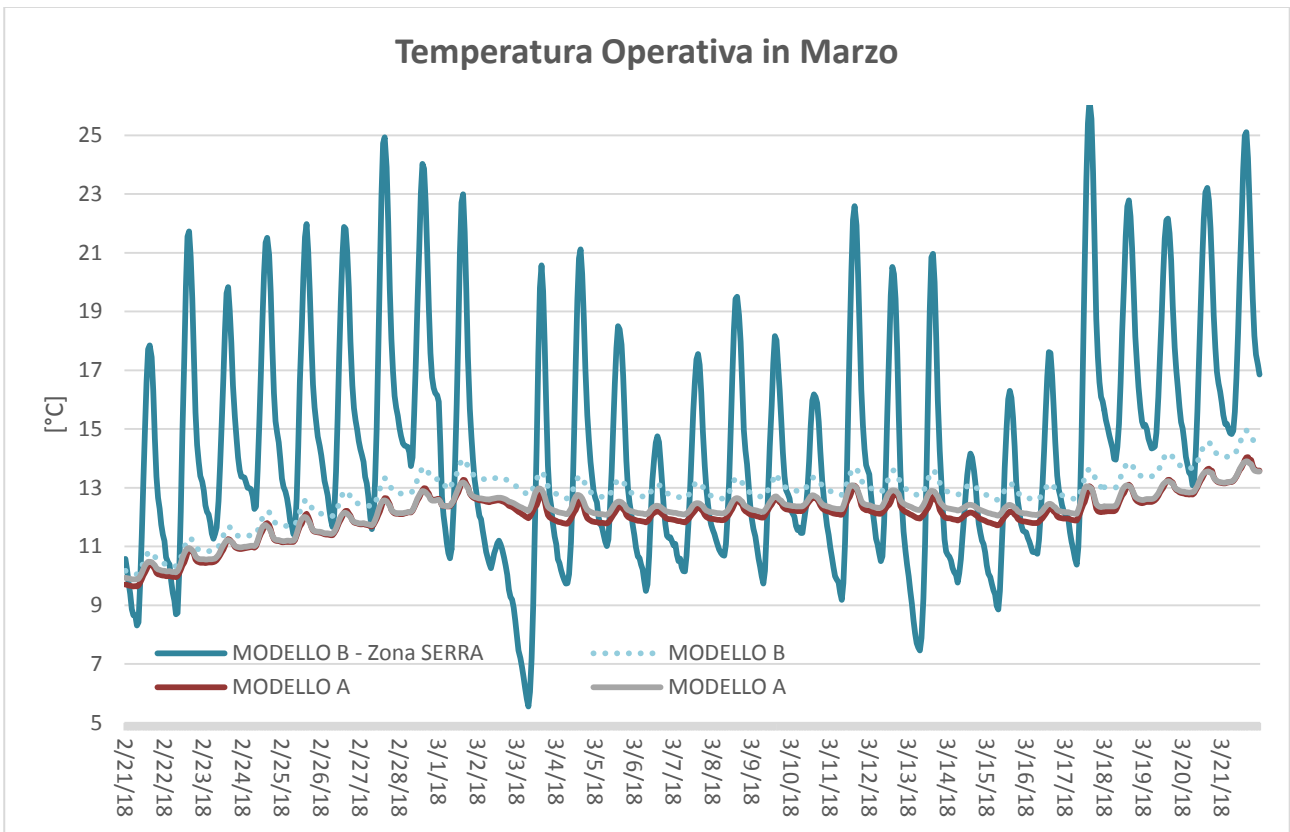


Grafico 73 MODELLI A e B a confronto - ΔT° Zona UFFICI: 0,747°C

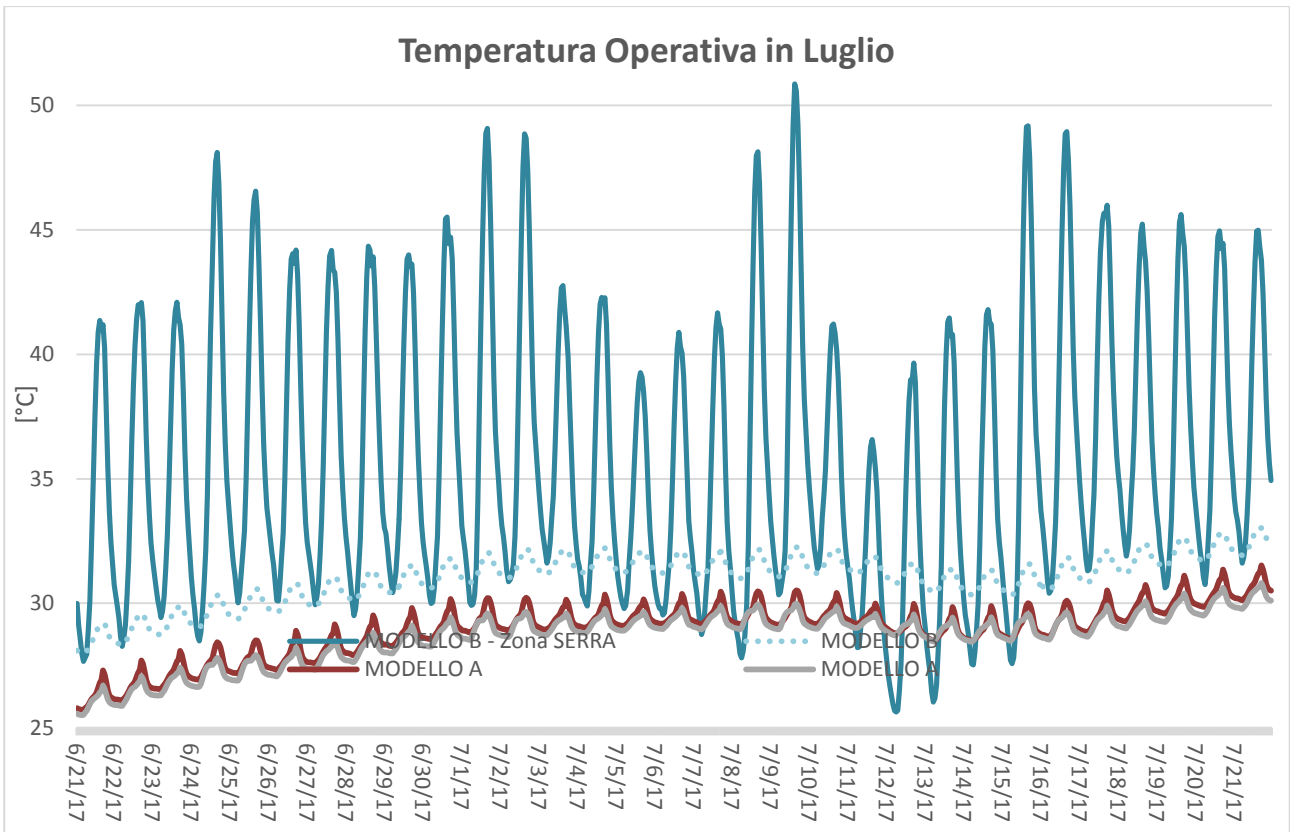


Grafico 74 MODELLI A e B a confronto - ΔT° Zona UFFICI: 2,066°C

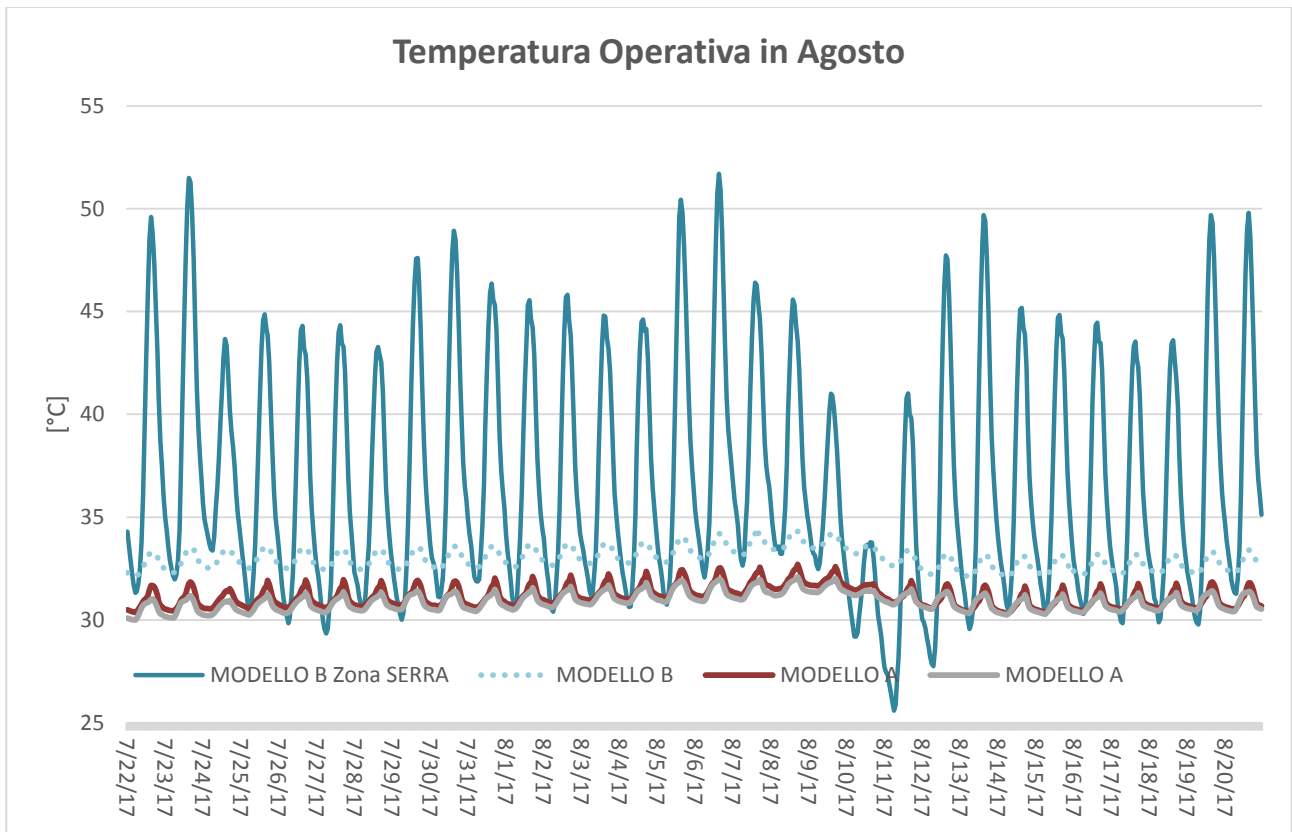


Grafico 75 MODELLI A e B a confronto - ΔT° Zona UFFICI: 1,831°C

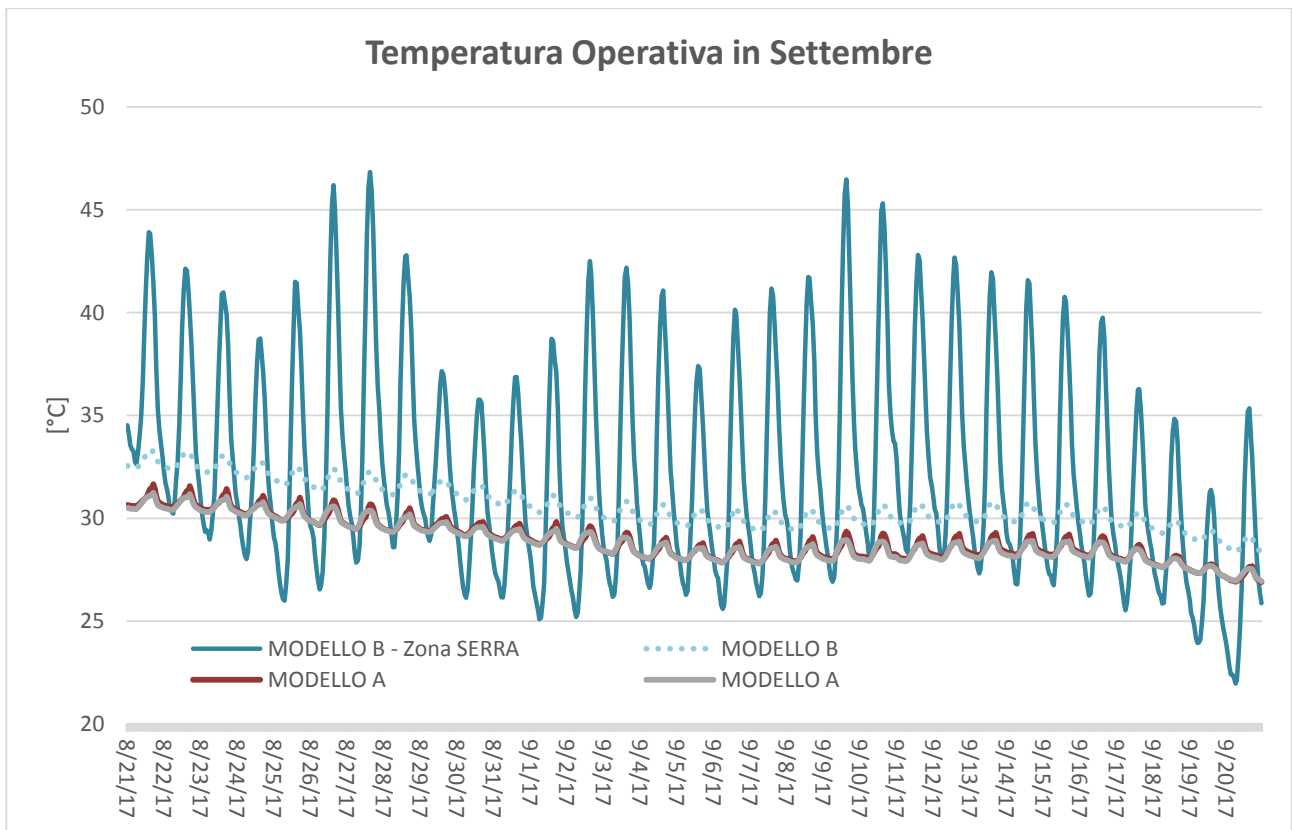


Grafico 76 MODELLI A e B a confronto - ΔT° Zona UFFICI: 1,678°C

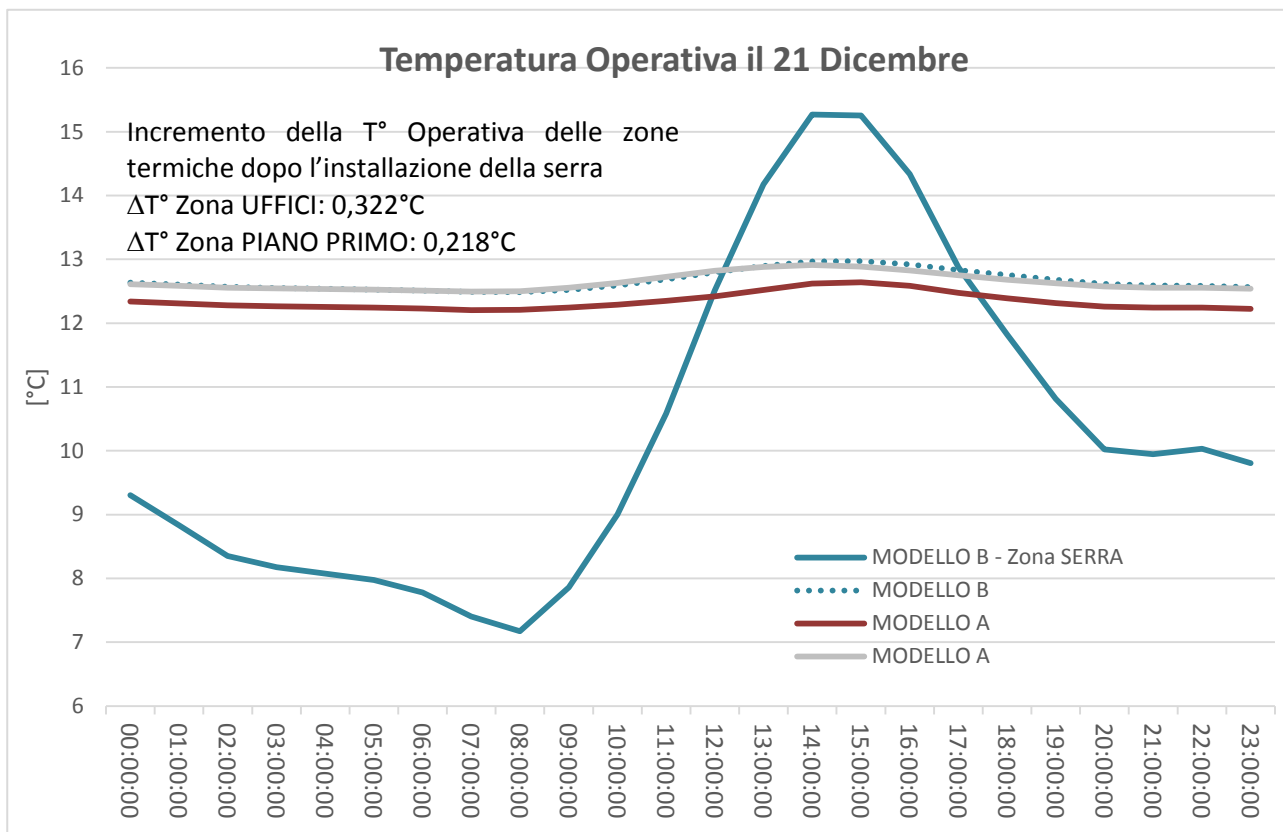


Grafico 77 MODELLI A e B a confronto - Giorno tipo in Dicembre

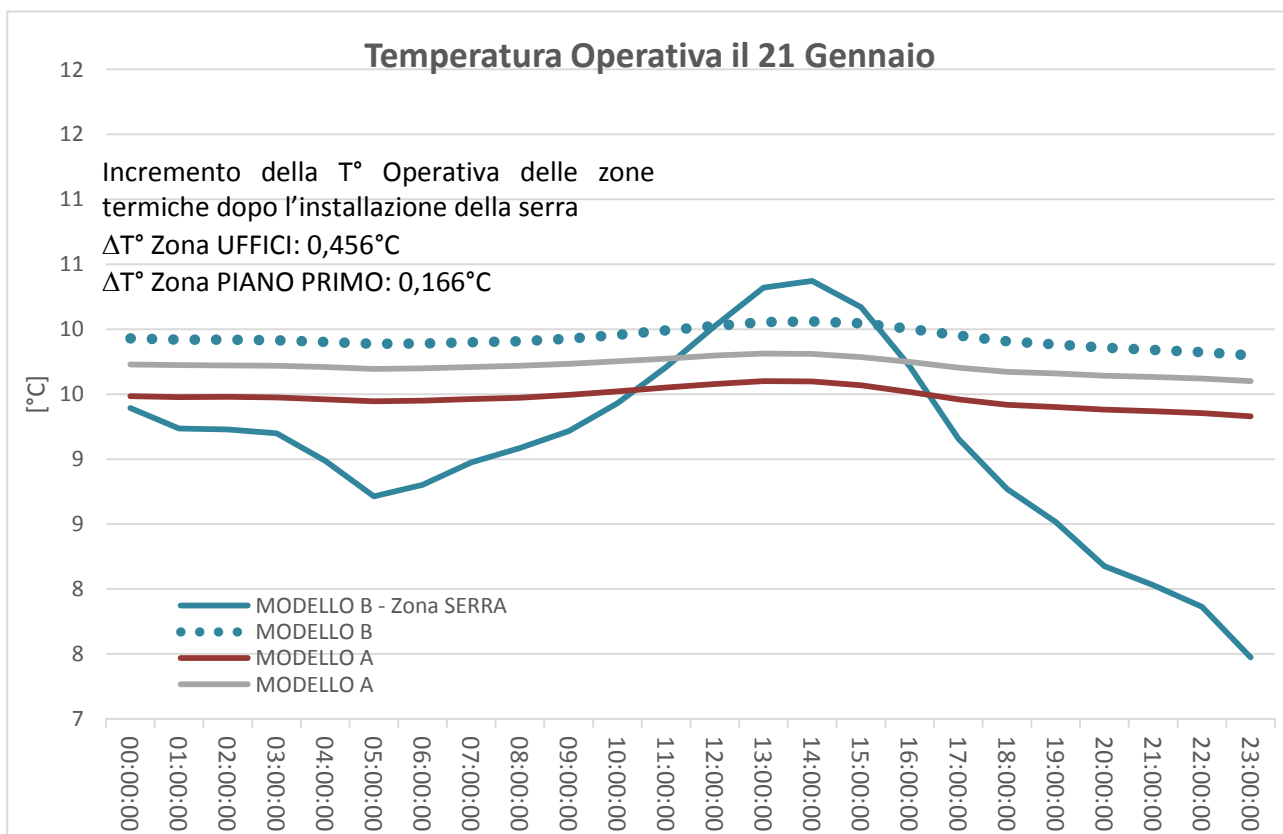


Grafico 78 MODELLI A e B a confronto - Giorno tipo in Gennaio

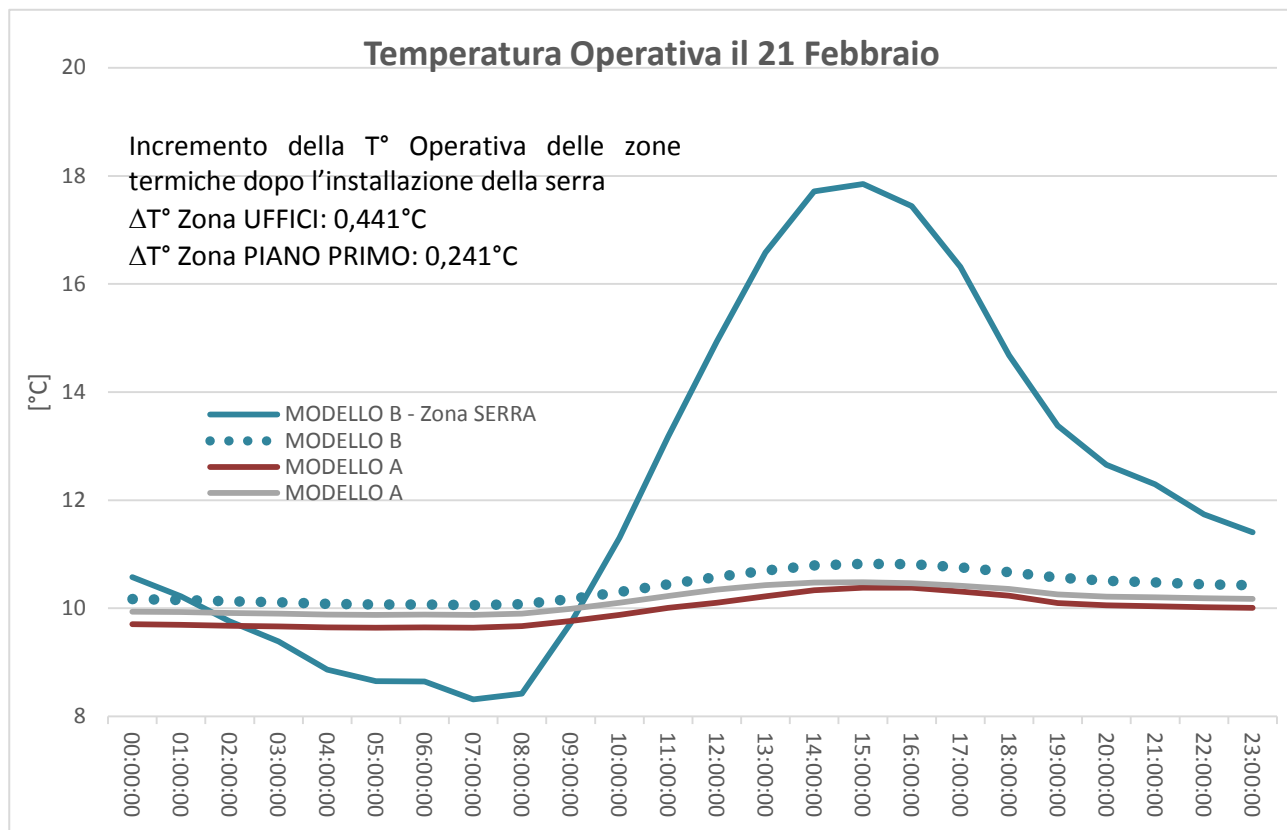


Grafico 79 MODELLI A e B a confronto - Giorno tipo in Febbraio

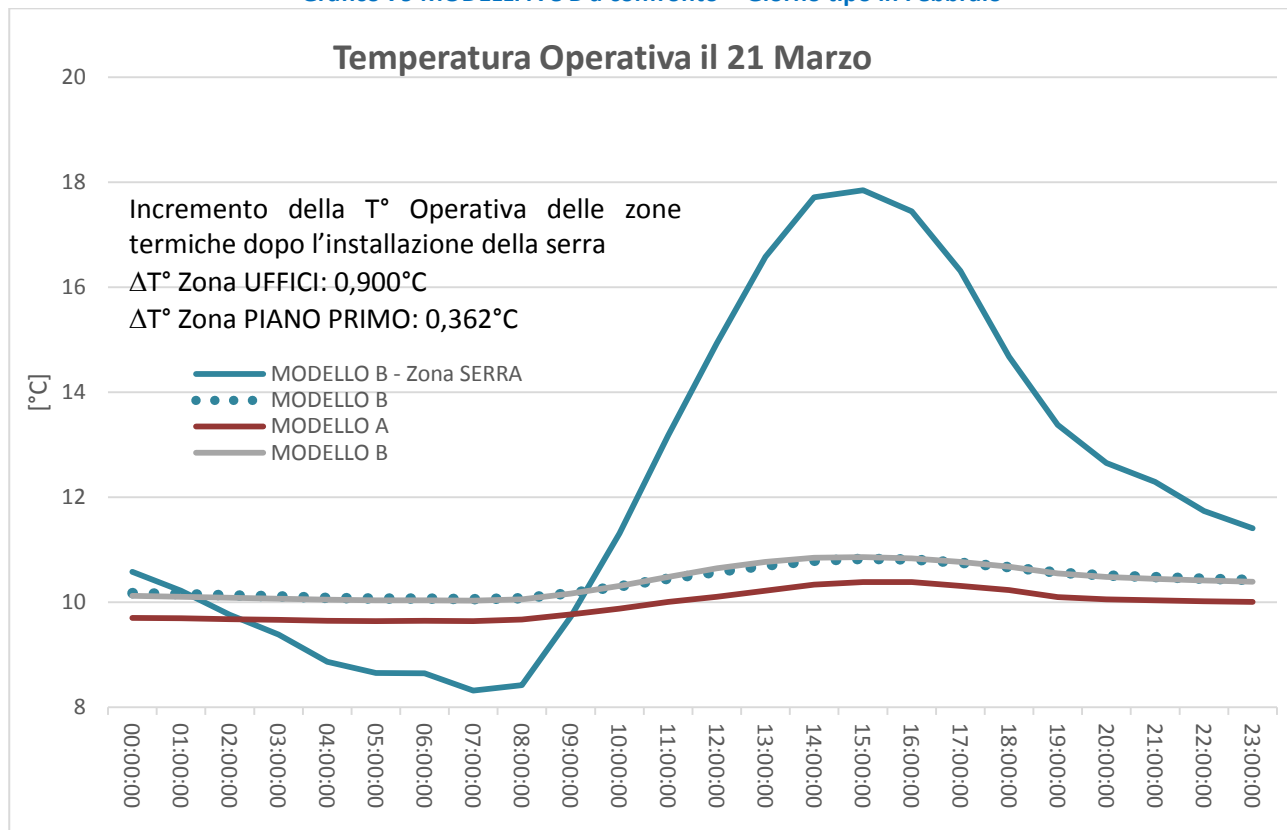


Grafico 80 MODELLI A e B a confronto - Giorno tipo in Marzo

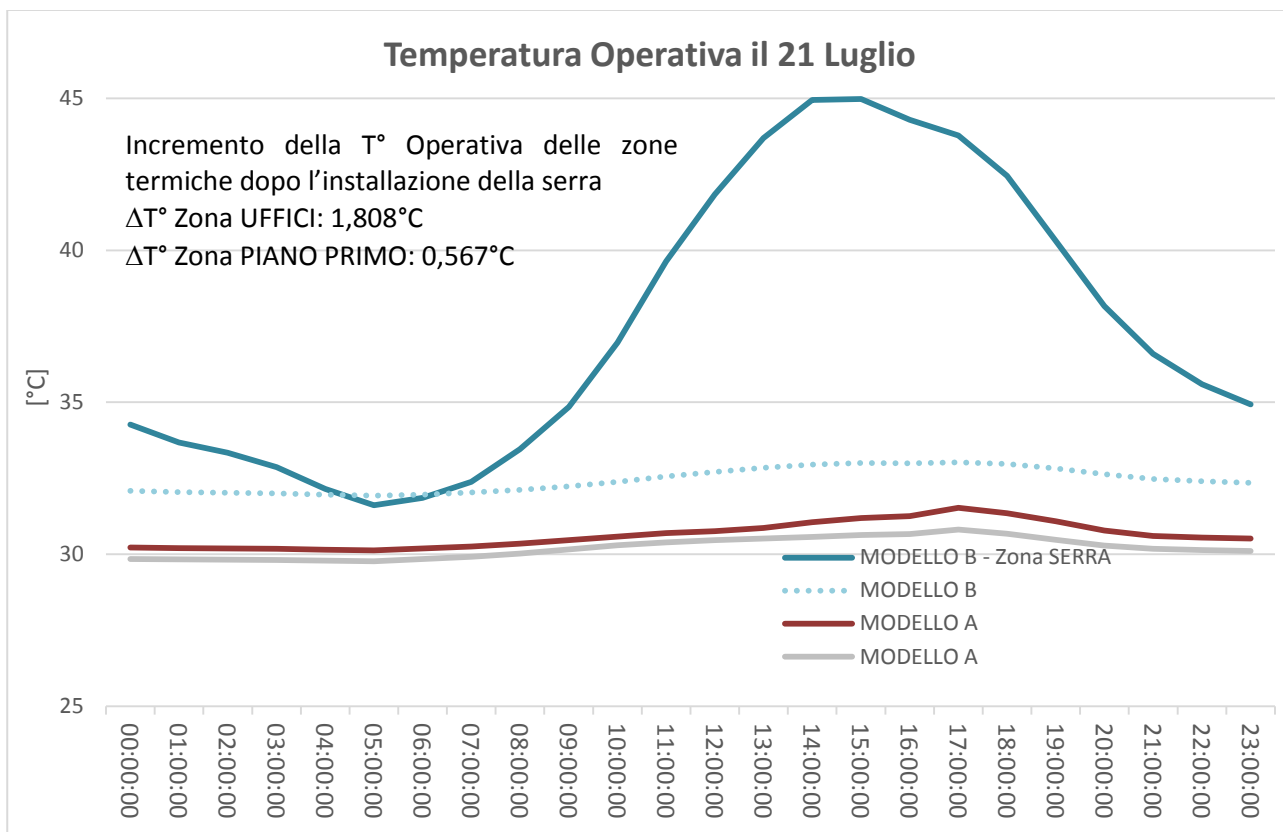


Grafico 81 MODELLI A e B a confronto - Giorno tipo in Luglio

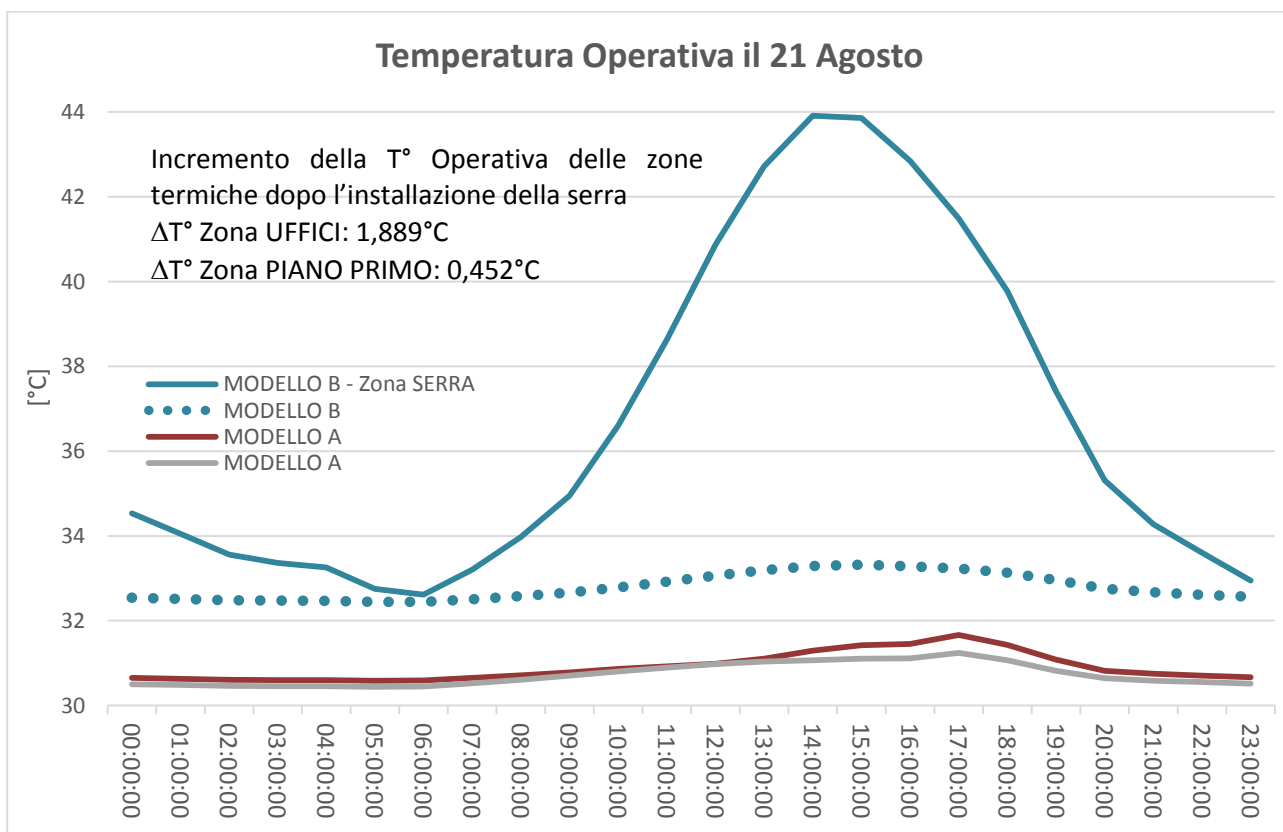


Grafico 82 MODELLI A e B a confronto - Giorno tipo in Agosto

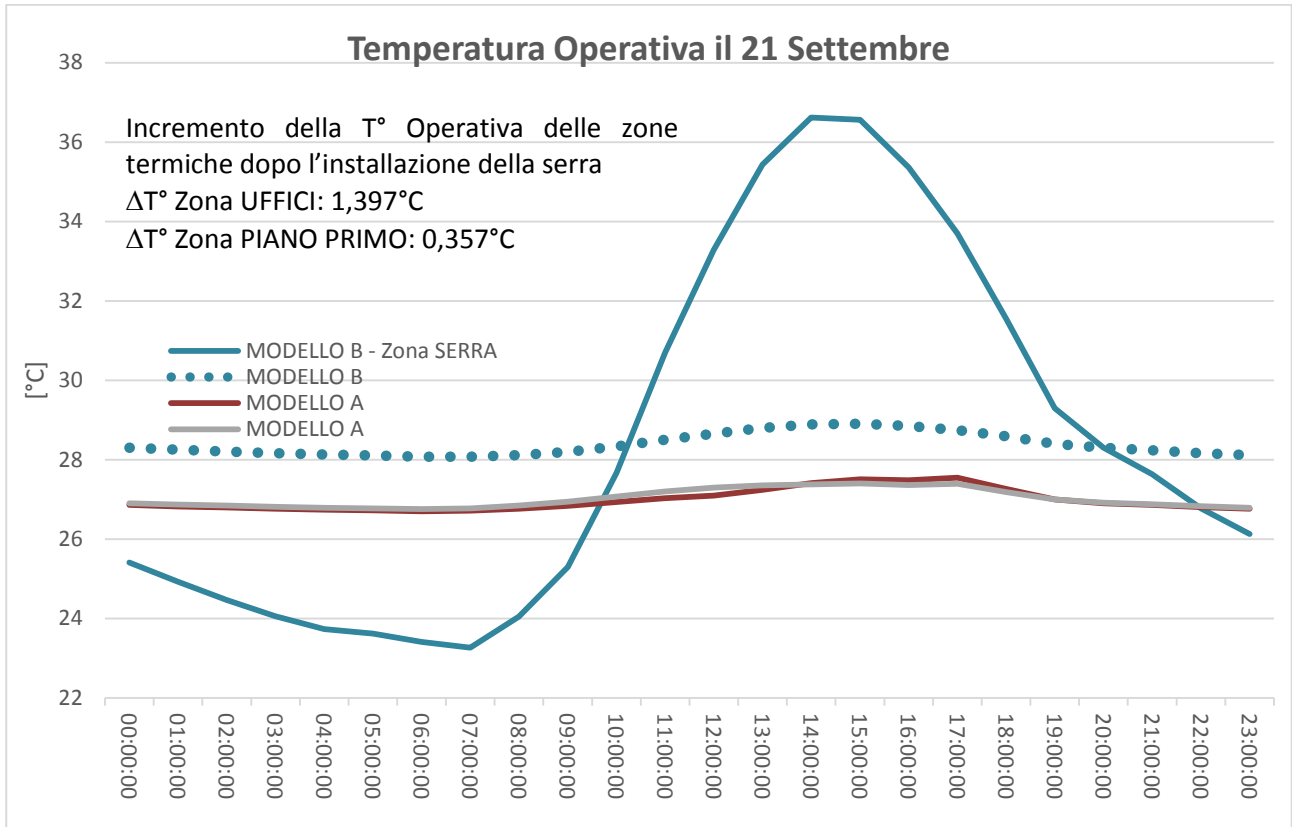


Grafico 83 MODELLI A e B a confronto - Giorno tipo in Settembre

2.7.2 Confronto tra i modelli B, C, D, E, F e G

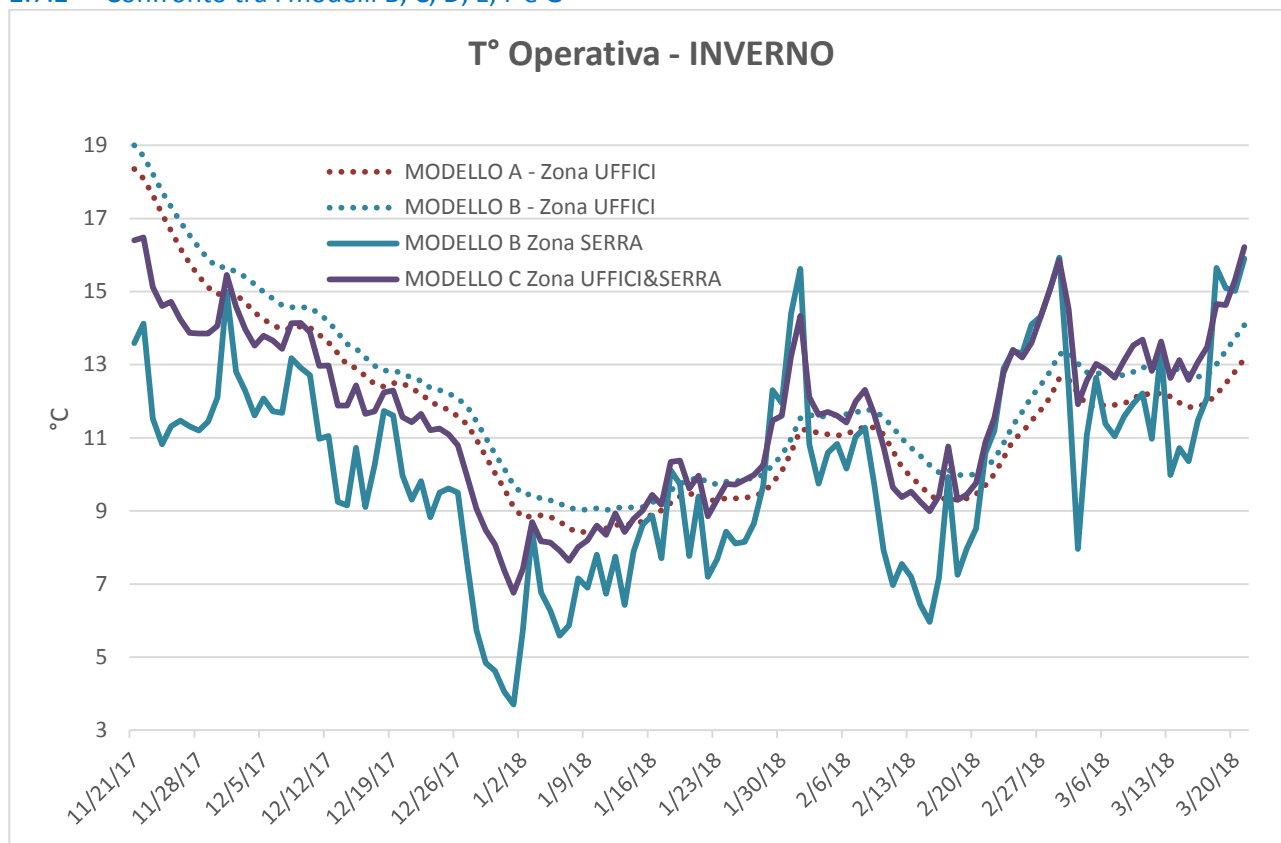


Grafico 84 MODELLI A, B e C a confronto in inverno

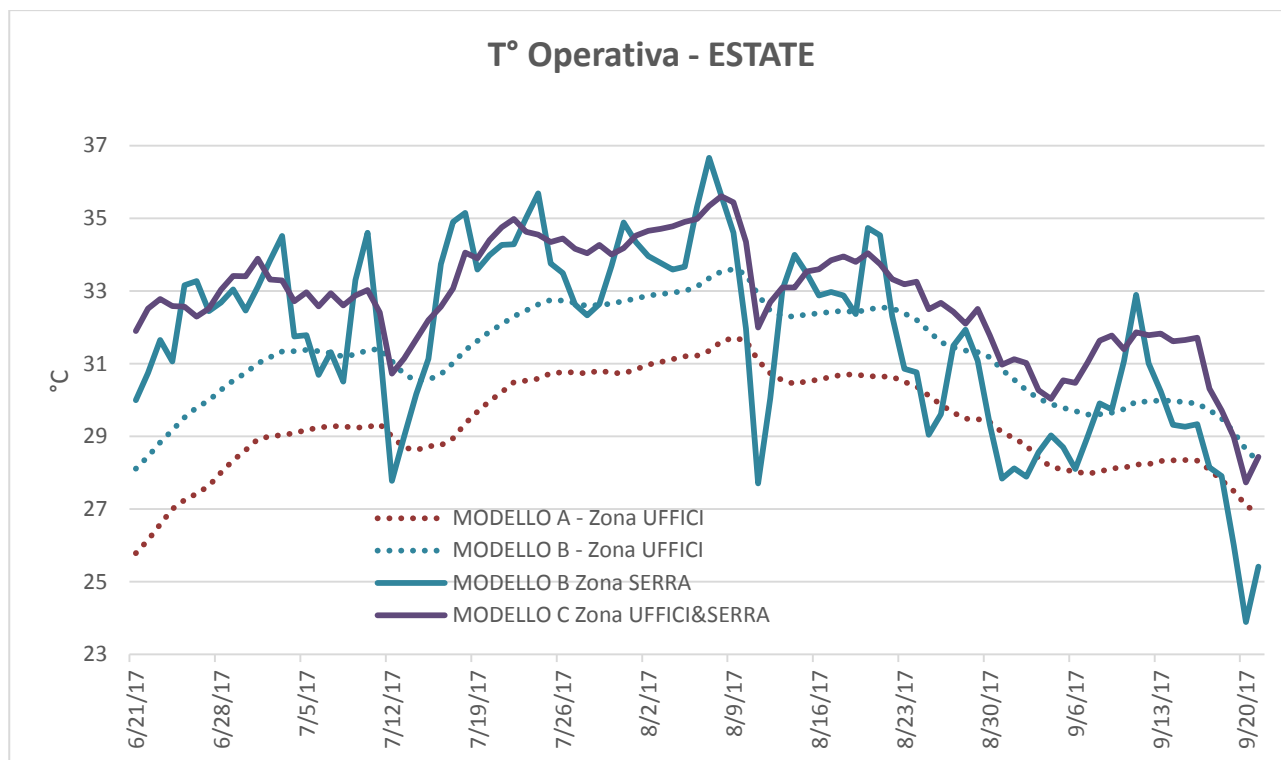


Grafico 85 MODELLI A, B e C a confronto in estate

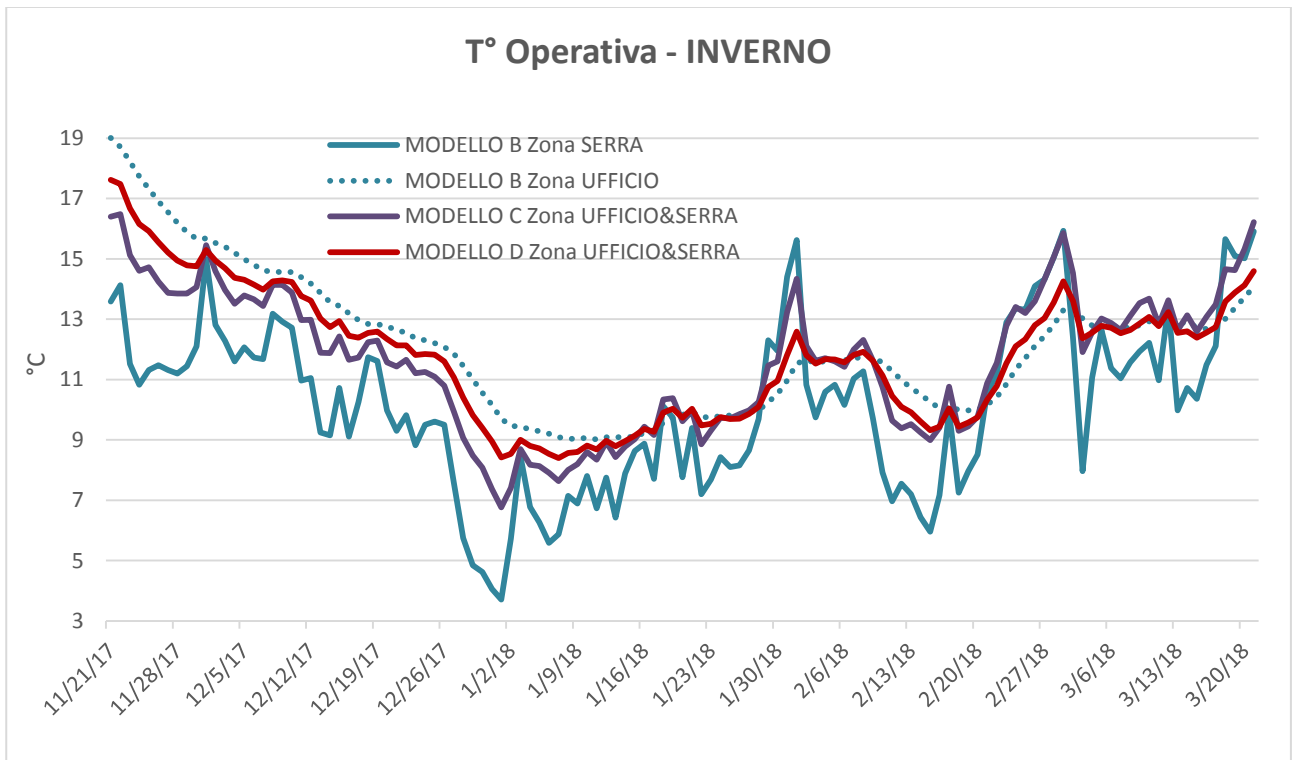


Grafico 86 MODELLI B, C e D a confronto in inverno

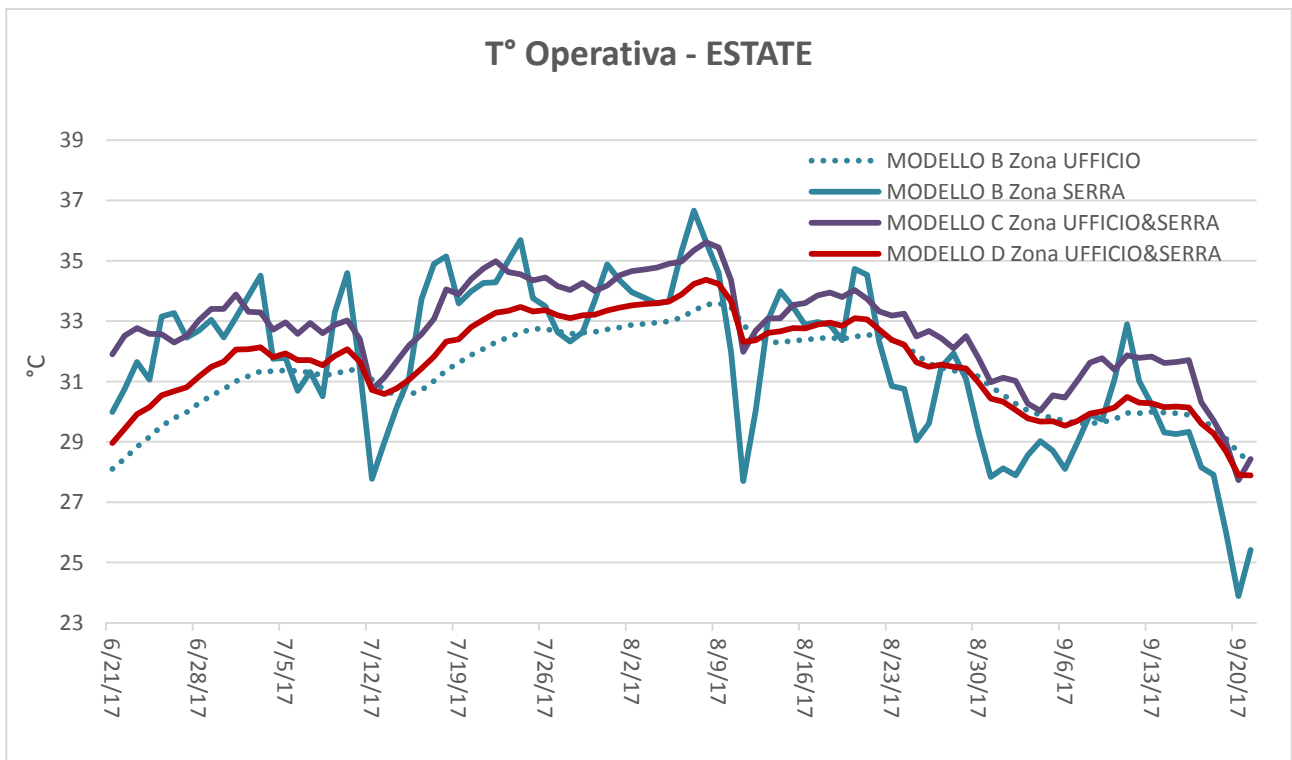


Grafico 87 MODELLI B, C e D a confronto in estate

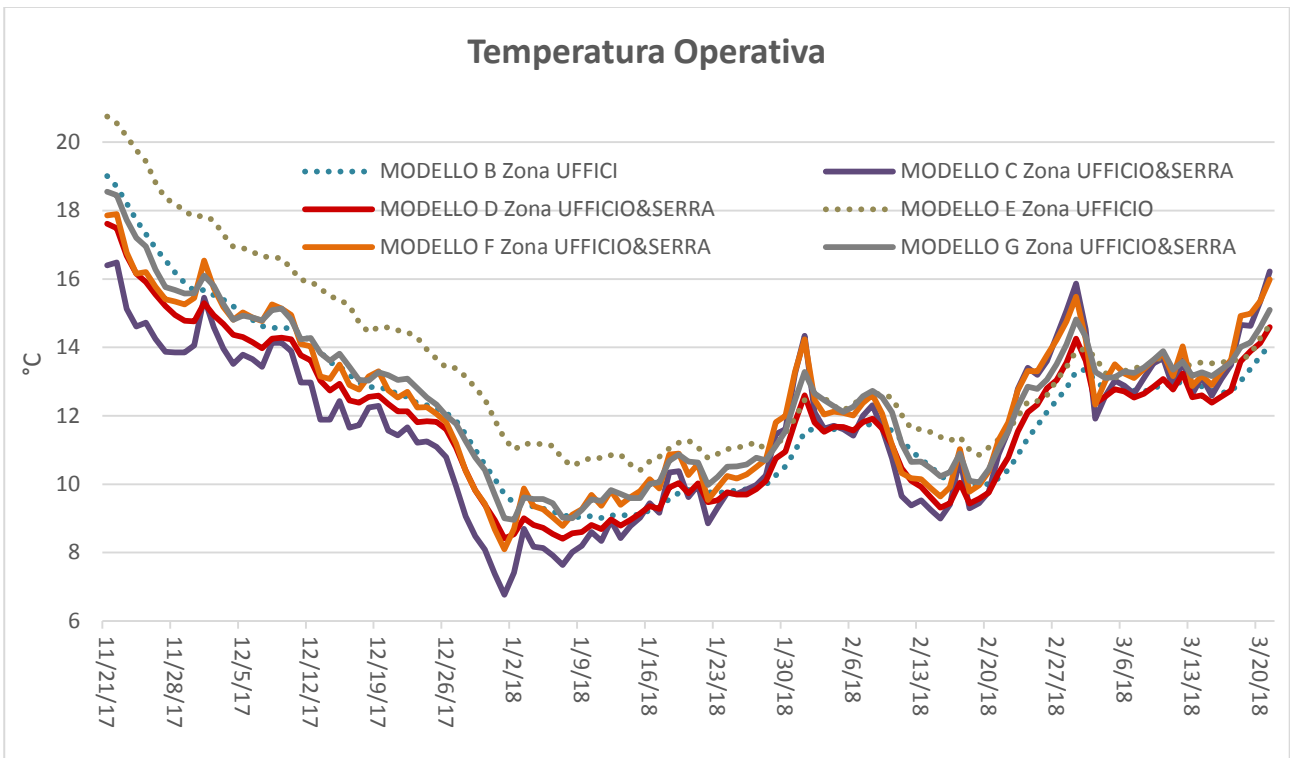


Grafico 88 MODELLI B, C, D, E, F, e G a confronto in inverno

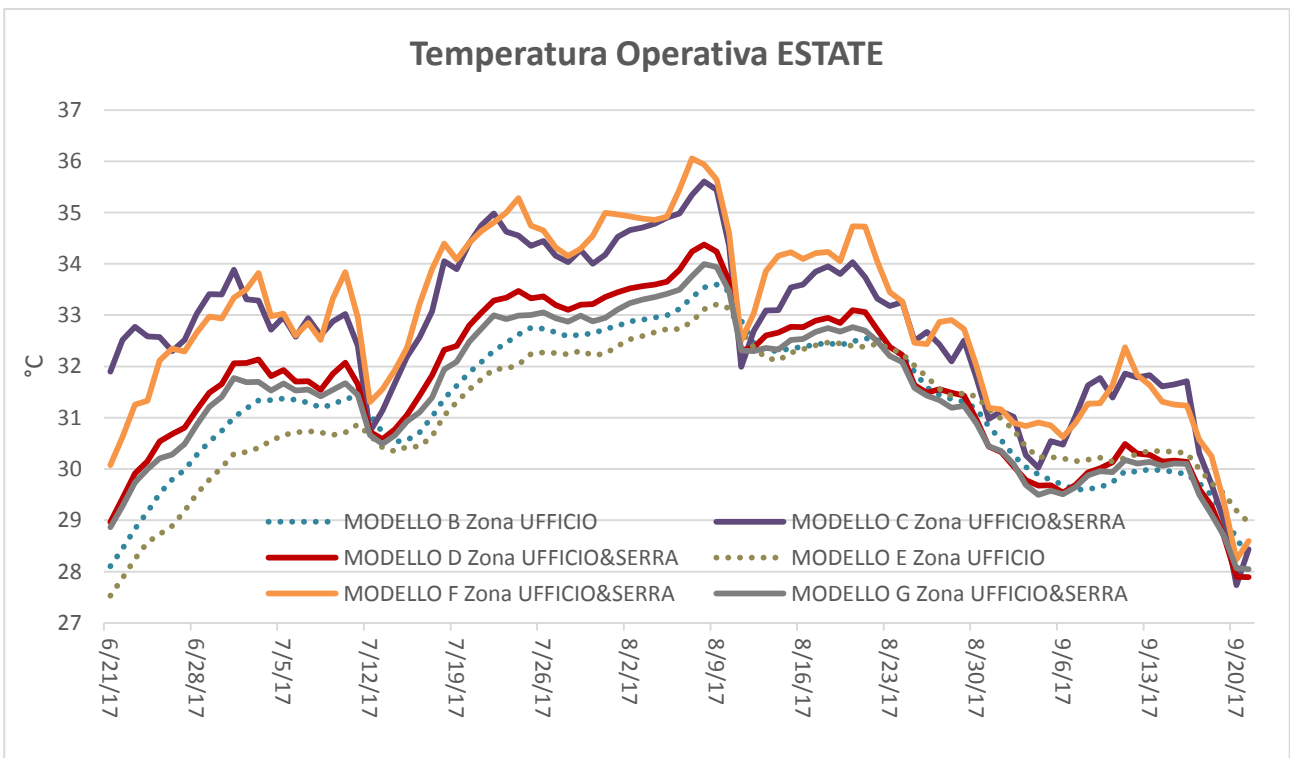


Grafico 89 MODELLI B, C, D, E, F, e G a confronto in estate

2.8 Analisi ed interpretazione critica dei risultati

I grafici di seguito riportati mettono a confronto i due modelli A e B ossia il comportamento dell'edificio Scuola delle Energie allo stato attuale e nello stato di progetto dopo la realizzazione della serra bioclimatica.

Allo stato attuale, descritto dal modello A, stante la cattiva qualità termica dell'involucro edilizio della Scuola delle Energie, in una condizione di comportamento passivo in assenza cioè di impianto di condizionamento, la zona termica UFFICIO dovrebbe sopportare, sia in inverno che in estate, condizioni di discomfort accentuate, con valori della T° operativa inferiori mediamente di circa $9,2^\circ\text{C}$ in inverno e superiori di circa $3,6^\circ\text{C}$ in estate rispetto ai valori di set-point predefiniti (21°C in inverno e 26°C in estate). Durante il periodo estivo, tutte le simulazioni condotte riferiscono alla condizione più gravosa di serra interamente chiusa, e le oscillazioni dei livelli di irraggiamento e T° operativa sono determinate esclusivamente dalla presenza dei sistemi schermanti che entrano in funzione durante il periodo estivo tra le 13:00 e le 17:00.

La realizzazione della serra bioclimatica sul fronte Sud-Ovest (modello B) comporta un sensibile innalzamento della T° operativa media durante l'orario di lavoro (Grafico 5 MODELLO A Temperatura media radiante in Inverno Grafico 5), riducendo a $8,8$ i gradi $^\circ\text{C}$ di discomfort medio rispetto al set-point invernale, ma causa un innalzamento delle temperature in regime estivo che mediamente superano di circa $5,4^\circ\text{C}$ la temperatura di set-point (Grafico 8).

La simulazione del modello H (Grafico 64), che prevede in alternativa al policarbonato e alle vetrate semplici un vetro doppio dotato di pellicola a controllo solare, ha dimostrato la possibilità di una riduzione del 10% dei valori medi di T° operativa in periodo estivo.

In inverno, il ΔT° di discomfort scende a $7,3^\circ\text{C}$ nella configurazione E che considera i carichi interni (persone, illuminazione e apparecchiature) mentre rimangono invariati nel periodo estivo (Grafico 88 e Grafico 89).

Gli apporti termici dovuti all'irraggiamento solare, ossia alla trasmissione di calore attraverso gli elementi vetrati, ovviamente diminuiscono a causa del posizionamento della serra sul lato Sud-Ovest della Zona UFFICIO (Grafico 69), andando di fatto la serra a coprire interamente la finestra esistente.

Se da un lato la bibliografia analizzata ha evidenziato l'importanza di una superficie di accumulo termico per la massimizzazione dei benefici derivanti dall'irraggiamento solare dello spazio tampone della serra, la specifica configurazione del progetto per la Scuola delle Energie limita purtroppo la possibilità di utilizzare la massa termica e la ventilazione tra lo spazio tampone e lo spazio abitato.

La parete esterna a cui viene addossata la serra, infatti, è priva di aperture poste nella zona inferiore e superiore, in grado di generare il moto di scambio termico per convezione, ed è caratterizzata dalla presenza della finestra esterna che costituisce di fatto l'unico elemento di contatto tra la serra e lo spazio abitato. Per le proprie caratteristiche geometriche, la finestra esistente limita quindi l'efficacia del sistema serra, essendone peraltro condizionata l'apertura e la chiusura dalla azione diretta dell'utente.

Durante la stagione invernale, i livelli di energia [kWh] dovuti all'irraggiamento solare diminuiscono mediamente del 50% dopo l'installazione della serra (il mese più gravoso è quello di Febbraio) e la T° operativa, ipotizzando l'apertura della finestra durante le ore di lavoro, sale in media solo di $0,55^\circ\text{C}$ (Grafico 67).

Per tale motivo, è stata ipotizzata una configurazione alternativa dello spazio (modello C) in cui la parete di separazione viene demolita e lo spazio abitato si dilata fino a comprendere il volume della serra.

Il modello C ottimizza i benefici della presenza dell'ampia superficie vetrata durante la stagione invernale (Grafico 84) ma ovviamente risente pesantemente del surriscaldamento estivo (Grafico 85) che comporta un innalzamento della T° operativa media di circa 3°C .

Nel modello D, infatti, l'azione della pellicola solare diventa particolarmente evidente proprio nel periodo estivo riportando le T° operative dello spazio ampliato UFFICIO&SERRA ai livelli del modello B (Grafico 87).

I modelli E, F, G ripropongono l'andamento dei modelli genitore B, C, e D rispettivamente, descrivendo con maggiore precisione quello che potrebbe essere il comportamento reale atteso delle diverse configurazioni nella condizione reale di esercizio dell'Edificio. I carichi interni gravano maggiormente nella configurazione B mentre l'innalzamento della T° dovuto agli apporti gratuiti interni è minimo nella configurazione C dove in estate, è addirittura negativo (Grafico 88 e Grafico 89).

3 Conclusioni

In generale, la realizzazione della serra sembra conseguire un miglioramento minimo delle condizioni di comfort invernale dello spazio abitato e sicuramente inferiore alle aspettative. Ciò è con tutta probabilità dovuto alla configurazione specifica della parete divisoria tra la serra e la zona termica e, al fine di massimizzare i benefici derivanti dalla installazione della serra, sarebbe auspicabile condurre una ulteriore simulazione su un modello che preveda il tamponamento della finestra esistente e la realizzazione di n. 2 aperture inferiori e n. 2 aperture superiori per l'innescò di un meccanismo di circolazione dell'aria calda dallo spazio tampone alla zona abitata durante le ore diurne, prevedendo la chiusura delle aperture durante le ore notturne. Tale strategia trova conforto nella bibliografia analizzata e, data la buona capacità termica della parete esterna esistente, potrebbe condurre ad un miglioramento significativo del comfort invernale.

Un ulteriore incremento potrebbe essere ottenuto sostituendo il policarbonato e il vetro semplice con una vetratura doppia basso emissiva, in modo da abbassare i livelli di trasmittanza dell'involucro trasparente e ridurre di conseguenza le dispersioni durante le ore notturne.

La riprogettazione degli elementi trasparenti diventa poi requisito essenziale nella configurazione ampliata C, in quanto la serra diventa di fatto estensione dello spazio abitabile, e dunque risolve completamente la criticità della poca illuminazione legata alla ipotesi del tamponamento della finestra esistente.

Di fatto, l'ottimizzazione del funzionamento del sistema serra con il tamponamento della finestra e la realizzazione delle aperture di ventilazione, se da un lato è facilmente realizzabile, dall'altro comporta un drammatico peggioramento del comfort luminoso della zona abitabile, rendendo di fatto questa modifica di difficile realizzazione: infatti, lo spazio abitato vedrebbe limitata l'illuminazione diretta alla sola finestra presente sul lato Nord-Ovest, sicuramente insufficiente a garantire adeguati livelli di luminosità.

Ipotizzando quindi di operare sul solo modello B, un ulteriore elemento di approfondimento, necessario a comprendere il reale comportamento dell'edificio durante la stagione estiva, è legato alla possibilità di aprire la serra o parte di essa. E' necessario quindi che sia definito un modello geometrico-temporale che identifichi le parti apribili della serra e definisca i cicli temporali di apertura e chiusura degli elementi, tenendo conto anche della presenza sulle superfici vetrate di elementi schermanti.

Considerando l'esperienza maturata dalle ricerche precedenti, sarebbe opportuno simulare a confronto una condizione di controllo meccanico e una condizione di controllo manuale da parte dell'utente per verificare, anche a fronte dei diversi costi di installazione, il beneficio ottenuto in termini di risparmio energetico.

Tutto ciò premesso, le simulazioni condotte con il software Energy Plus hanno fondamentalmente confermato il contributo della serra al miglioramento del comfort nei limiti attesi.

4 Riferimenti bibliografici

I riferimenti bibliografici devono essere richiamati nel testo con numeri progressivi tra parentesi quadre e riportati a fine testo con il seguente formato:

1. D. Aelenei, H. de Azevedo Leal, L. Aelenei, "The Use of Attached-sunspaces in Retrofitting Design: The Case of Residential Buildings in Portugal", *Energy Procedia* n. 48 (2014), pp. 1436-1441
2. R. Albatici, F. Passerini, "Bioclimatic design of buildings considering heating requirements in Italian climatic conditions. A simplified approach", *Building and Environment* n.46 (2011), pp.1624e1631
3. S. J. Angeraini, "Sunspace design solutions based on daylight performance in a multi-storey residential building", Master Thesis in Energy-efficient and Environmental Buildings Faculty of Engineering | Lund University, EEED-16/12
4. F. Asdrubali, F. Cotana, A. Messineo, "On the Evaluation of Solar Greenhouse Efficiency in Building Simulation during the Heating Period", *Energies* n. 5 (2012), pp. 1864-1880
5. G. Bot, N. van de Braak, H. Chall, S. Hemming, Th. Rieswijk, G. v. Straten, I. Verlodt "The Solar Greenhouse: State of the Art in Energy Saving and Sustainable Energy Supply" *Acta Horticulturae* n. 691 (2005) pp 501-508

6. G. Chiesa, M. Simonetti, G. Ballada, "Potential of attached sunspaces in winter season comparing different technological choices in Central and Southern Europe", *Energy and Buildings* n. 138 (2017) 377–395
7. S. Gorjian, T. T. Hashjin, B. Ghobadian, "Solar Powered Greenhouses", 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 4-7 Sep. 2011 Istanbul, TÜRKYE, 2011
8. O. B. Jorgensen, O. J. Hendriksen, "Glazed balconies and sunspaces - energy savers or energy wasters", *Energy savers or Energy wasters' Eurosun 2000*, Copenhagen
9. M. Kumar Singh, S. Mahapatra, S.K. Atreya, "Thermal performance study and evaluation of comfort temperatures in vernacular buildings of North-East India" , *Building and Environment* n. 45 (2010), pp.320-329
10. F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, A. Sabio-Ortega, A. García-Cruz, "Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* n.49 (2015) pp.736–755
11. G. Mihalakakou, "On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe" *Renewable Energy* (2002), pp. 415-429.
12. G. Oliveti, M. Simona, S. Ruffolo, "Solar contribution evaluation for building attached sunspace in the Mediterranean climate", *Proceedings of the International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*, Santorini, Greece, 2 May 2005.
13. G. Oliveti, M. De Simone, S. Ruffolo, "Evaluation of the absorption coefficient for solar radiation in sunspaces and windowed rooms", *Solar Energy* n. 82 (2008), pp. 212–219.
14. G. Oliveti, N. Arcuri, M. De Simone, R. Bruno, "Solar heat gains and operative temperature in attached sunspaces" *Renewable Energy* n..39 (2012), pp.241–249
15. M. Owraq, M. Aminy, M.T.Jamal-Abad, M.Dehghan, "Experiments and simulations on the thermal performance of a sunspace attached to a room including heat-storing porous bed and water tanks", *Building and Environment* n.92, (2015), pp. 142-151
16. P. Sdringola, S. Proietti, U. Desideri, G. Giombini, "Thermo-fluid dynamic modeling and simulation of a bioclimatic solar greenhouse with self-cleaning and photovoltaic glasses", *Energy and Buildings* n.69 (2014), pp. 183-195
17. M. Taki, A. Rohani, M. Rahmati-Joneidabad, "Solar thermal simulation and applications in Greenhouse", *Information Processing In Agriculture* n.5 (2018) pp. 83–113
18. A.F. Tzikopoulos, M.C. Karatza, J.A. Paravantis, "Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings", *Energy and Buildings* n.37 (2005) pp.529–544
19. L. Vanhoutteghem, G. C. J. Skarning, C. A. Hviid, S. Svendsen, "Impact of facade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses" *Energy and Building* (2015), pp. 149-156.

5 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Ing. Carlo Bibbiani Curriculum Vitae

Carlo Bibbiani, nato a Pisa nel 1962, consegue la Laurea in Ingegneria Civile , Sezione Idraulica, presso la Università degli Studi di Pisa. Successivamente consegue il titolo di Dottore di Ricerca in " Genio rurale " (IX° Ciclo, 1996) presso l'Università di Pisa. Dal 2001 è Ricercatore universitario presso il Dipartimento di Scienze Veterinarie (DSV) dell'Università di Pisa. Ha svolto ricerche nei seguenti settori : Energia rinnovabile applicata ai sistemi serra; Compilazione di software volto alla simulazione climatica nelle serre; Studio delle proprietà fisiche ed idrauliche dei substrati per le colture fuori suolo; Simulazione della relazione suolo-acqua nelle colture fuori suolo.

Ha partecipato come relatore a diversi Convegni, in materia energia rinnovabili applicate alla agricoltura, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di una sessantina di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

Prof. Ing. Fabio Fantozzi Curriculum Vitae

Fabio Fantozzi, nato a Pontedera (Pi) nel 1954, laureato in Ingegneria Meccanica con tesi sperimentale dal titolo "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica (1° ciclo- Curriculum: Termofluidodinamica, è attualmente Professore Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC).

Oltre ad un'intensa attività didattica, ha partecipato, in qualità di relatore, a circa 100 tesi di laurea nell'ambito dei Corsi di Laurea in Ing. Meccanica, Chimica, Civile ed Edile. Questa attività, in qualche caso, lo ha portato non solo a fare da correlatore di studenti di altre Facoltà (Architettura di Firenze e C.L. in Conservazione e Beni Culturali dell'Università di Parma) ma anche ad intraprendere importanti collaborazioni di ricerca con Enti e Università straniere

È attualmente Presidente del Consiglio aggregato dei Corsi di laurea magistrale in Ingegneria idraulica, dei trasporti e del territorio, in Ingegneria edile, in Ingegneria delle Costruzioni civili e in Ingegneria edile e delle Costruzioni civili (laurea interclasse di recente istituzione).

L'attività scientifica si è svolta inizialmente su diverse applicazioni di tubi di calore, su cui aveva lavorato anche durante la tesi (Titolo: "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche").

In particolare, i tubi di calore erano costituiti da termosifoni bifase con applicazioni previste nei campi:

- a) della geotermia
- b) del raffreddamento dell'elettronica, soprattutto di potenza.

Tale attività è stata a lungo svolta in collaborazione con il Moscow Power Engineering Institute di Mosca. Successivamente, ha cominciato ad interessarsi all'influenza che i parametri termoigrometrici e l'inquinamento esterno hanno sugli ambienti in cui si voglia garantire una corretta conservazione dei manufatti di interesse storico ed artistico, facendo anche parte di gruppi di lavoro, nell'ambito del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) per la stesura di progetti di norme sull'argomento

Attualmente, con riferimento alle Direttive Europee sul rendimento energetico in edilizia, svolge la sua attività, principalmente su tematiche di diagnosi energetica, risparmio energetico e riqualificazione di edifici esistenti, tema sul quale è stato chiamato a fare da relatore in diverse occasioni.

Ha lavorato sul tema della "Certificazione Energetica degli edifici", anche nell'ambito del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) in cui ha fatto parte di due specifici Gruppi di Lavoro del SottoComitato 1 riguardanti: a) Norme tecniche a supporto della legislazione energetica degli edifici, b) Caratteristiche termiche dei materiali.

L'attività si è poi definitivamente spostata su temi più tipici della Fisica Tecnica Ambientale, in particolare sullo studio di pareti multistrato e ventilate in edilizia, tema con cui ha fatto parte anche di diversi PRIN di ricerca a livello nazionale.

Ha lavorato su tematiche acustiche, con particolare riferimento a barriere acustiche autostradali.

Ha condotto, in qualità di Responsabile, diversi contratti di ricerca con aziende, su tematiche energetiche e ha partecipato come relatore a diversi Convegni e Corsi, sempre in materia energetica, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di un centinaio di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

Arch. Caterina Gargari Curriculum Vitae

Caterina Gargari, Laureata in Architettura presso la facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, svolge attività di ricerca presso il Dipartimento DESTEC dell'Università di Pisa sulle tematiche della progettazione sostenibile con particolare riguardo alla qualificazione energetica e alla valutazione di impatto ambientale di materiali e edifici. Ha iniziato la sua attività di ricerca partecipando a numerosi progetti europei sulla progettazione ambientale, il risparmio e

l'efficienza energetica, l'utilizzo di energie rinnovabili, con particolare riferimento alla progettazione in clima mediterraneo. Dal 2004 si occupa nello specifico di Valutazione delle prestazioni ambientali dei materiali da costruzione secondo la metodologia LCA e dal 2006 è membro stabile, nominato da UNI, del tavolo di lavoro CEN TC 350 "Sustainability of Construction Works".

6 Allegato A

Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [m ² K/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (i) [m]	ζ = s/i [-]	Resistenza termica [m ² K/W]	
R _{int}	Aria Strato tamponare interno									0,130	
1	intonaco in calce cem	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,128	0,017	
2	mutatura doppio LIME	0,250	0,273		1000	910		0,091	2,752	0,918	
3	intonaco in calce cem	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,128	0,017	
4								-	-	-	
5								-	-	-	
6								-	-	-	
7								-	-	-	
8								-	-	-	
9								-	-	-	
10								-	-	-	
11								-	-	-	
12								-	-	-	
13								-	-	-	
14								-	-	-	
15								-	-	-	
R _{est}	Aria Strato tamponare esterno									0,040	
Spessore totale componente [cm]		28,00		Resistenza termica totale [m ² K/W]						1,119	

RISULTATI											
Regime periodico stabilizzato						Regime stazionario					
T = 24 ore											
Fattore di decremento (attenuazione)	f _d	[-]	0,316			Massa superficiale	M _s	[kg/m ²]	282		
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]	10,15			Resistenza termica totale	R _t	[m ² K/W]	1,119		
Trasmittanza termica periodica	[Y] _{ie}	[W/m ² K]	0,283			Trasmittanza	U	[W/m ² K]	0,894		
Ammissenza termica lato interno	Y _{is}	[W/m ² K] [h]	3,64			2,19	Conduttanza	C	[W/m ² K]	1,054	
Ammissenza termica lato esterno	Y _{es}	[W/m ² K] [h]	4,87			3,11	Capacità termica aerea	C _{ta}	[kJ/m ² K]	282	
Capacità termica aerea lato interno	k ₁	[kJ/m ² K]	53,9			83,2	Costante di tempo	τ	[h]	88	
Capacità termica aerea lato esterno	k ₂	[kJ/m ² K]	78,6			83,2					
Fattore di smorzamento superficiale interno											
Parete dipendente						f _{sd}	[-]	0,527			0,367
Parete interna						f _{si}	[-]	0,498			0,333

Figura 16 stratigrafia della parete di tamponamento esterna

Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [m ² K/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (i) [m]	ζ = s/i [-]	Resistenza termica [m ² K/W]	
R _{int}	Aria Strato tamponare interno									0,130	
1	intonaco in calce cem	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,128	0,017	
2	mutatura doppio UNI	0,250	0,273		1000	910		0,091	2,752	0,918	
3	membrana bituminosa	0,004	0,045		1630	900		0,029	0,138	0,089	
4								-	-	-	
5								-	-	-	
6								-	-	-	
7								-	-	-	
8								-	-	-	
9								-	-	-	
10								-	-	-	
11								-	-	-	
12								-	-	-	
13								-	-	-	
14								-	-	-	
15								-	-	-	
R _{est}	Aria Strato tamponare esterno									0,040	
Spessore totale componente [cm]		26,90		Resistenza termica totale [m ² K/W]						1,191	

RISULTATI											
Regime periodico stabilizzato						Regime stazionario					
T = 24 ore											
Fattore di decremento (attenuazione)	f _d	[-]	0,279			Massa superficiale	M _s	[kg/m ²]	258		
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]	10,44			Resistenza termica totale	R _t	[m ² K/W]	1,191		
Trasmittanza termica periodica	[Y] _{ie}	[W/m ² K]	0,234			Trasmittanza	U	[W/m ² K]	0,839		
Ammissenza termica lato interno	Y _{is}	[W/m ² K] [h]	3,63			2,19	Conduttanza	C	[W/m ² K]	0,979	
Ammissenza termica lato esterno	Y _{es}	[W/m ² K] [h]	3,16			2,17	Capacità termica aerea	C _{ta}	[kJ/m ² K]	260	
Capacità termica aerea lato interno	k ₁	[kJ/m ² K]	53,2			81,8	Costante di tempo	τ	[h]	86	
Capacità termica aerea lato esterno	k ₂	[kJ/m ² K]	46,6			54,0					
Fattore di smorzamento superficiale interno											
Parete dipendente						f _{sd}	[-]	0,528			0,559
Parete interna						f _{si}	[-]	0,498			0,559

Figura 17 stratigrafia della parete controterra

Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/δ [-]	Resistenza termica [m2K/W]
R _{int}	Aria									0,130
1	□	intonaco in calce cem.	0,015	0,900	1000	1800		0,117	0,128	0,017
2	□	muratura semp. 1 testa	0,125	0,339	1000	1050		0,094	1,327	0,389
3	□	intonaco in calce cem.	0,015	0,900	1000	1800		0,117	0,128	0,017
4	□							-	-	-
5	□							-	-	-
6	□							-	-	-
7	□							-	-	-
8	□							-	-	-
9	□							-	-	-
10	□							-	-	-
11	□							-	-	-
12	□							-	-	-
13	□							-	-	-
14	□							-	-	-
15	□							-	-	-
R _{est}	Aria									0,043
Spessore totale componenti [cm]		15,50						Resistenza termica totale [m2K/W]		0,572
RISULTATI										
Regime periodico stabilizzato T = 24 ore						Regime stazionario				
Fattore di decremento (attenuazione)	fd	[-]			0,719	Massa superficiale	M _s	[kg/m2]	185	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]			4,83	Resistenza termica totale	R _t	[m2K/W]	0,572	
Trasmittanza termica periodica	[Y]e	[W/m2K]			1,357	Trasmittanza	U	[W/m2K]	1,748	
Ammettenza termica lato interno	Yi	[W/m2K] , [h]			3,73	Conduttanza	C	[W/m2K]	2,487	
Ammettenza termica lato esterno	Ye	[W/m2K] , [h]			5,28	Capacità termica areica	C _{ta}	[kJ/m2K]	185	
Capacità termica areica lato interno	k1	[kJ/m2K]			57,3	Costante di tempo	τ	[h]	29	
Capacità termica areica lato esterno	k2	[kJ/m2K]			82,8					
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete dipendente		fsd	[-]			0,515	0,314			
Parete interna		fsi	[-]			0,453	0,225			

Figura 18 stratigrafia dei divisori interni

Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/δ [-]	Resistenza termica [m2K/W]
R _{int}	Aria									0,130
1	□	pavimentazione in gres	0,015	0,538	1000	2700		0,074	0,203	0,028
2	□	collante	0,005	0,750	1000	1350		0,124	0,040	0,007
3	□	massetto in CLS alleg	0,100	0,099	1000	480		0,075	1,328	1,010
4	□	soletta in CLS	0,250	1,800	2000	2500		0,100	2,513	0,139
5	□	soffolondo in ghisa	0,400	1,200	1000	1700		0,139	2,871	0,333
6	□							-	-	-
7	□							-	-	-
8	□							-	-	-
9	□							-	-	-
10	□							-	-	-
11	□							-	-	-
12	□							-	-	-
13	□							-	-	-
14	□							-	-	-
15	□							-	-	-
R _{est}	Aria									0,043
Spessore totale componenti [cm]		77,00						Resistenza termica totale [m2K/W]		1,727
RISULTATI										
Regime periodico stabilizzato T = 24 ore						Regime stazionario				
Fattore di decremento (attenuazione)	fd	[-]			0,504	Massa superficiale	M _s	[kg/m2]	1400	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]			3,56	Resistenza termica totale	R _t	[m2K/W]	1,727	
Trasmittanza termica periodica	[Y]e	[W/m2K]			0,603	Trasmittanza	U	[W/m2K]	0,579	
Ammettenza termica lato interno	Yi	[W/m2K] , [h]			3,14	Conduttanza	C	[W/m2K]	0,659	
Ammettenza termica lato esterno	Ye	[W/m2K] , [h]			8,79	Capacità termica areica	C _{ta}	[kJ/m2K]	2825	
Capacità termica areica lato interno	k1	[kJ/m2K]			43,2	Costante di tempo	τ	[h]	971	
Capacità termica areica lato esterno	k2	[kJ/m2K]			120,8					
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete dipendente		fsd	[-]			0,466	-0,494			
Parete interna		fsi	[-]			0,466	-0,494			

Figura 19 stratigrafia del solaio interpiano

Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ζ = s/δ [-]	Resistenza termica [m ² K/W]
Ria	Aria Strato termare interno									0,170
1	○ pavimentazione in gres	0,015	0,538		1000	2700		0,074	0,203	0,028
2	○ collante	0,005	0,750		1000	1350		0,124	0,040	0,007
3	○ massetto in CLS alleg	0,100	0,099		1000	480		0,075	1,328	1,010
4	○ soletta in CLS	0,250	1,800		2000	2500		0,100	2,513	0,139
5	○ sottofondo in ghiaia	0,400	1,200		1000	1700		0,139	2,671	0,333
6	○							-	-	-
7	○							-	-	-
8	○							-	-	-
9	○							-	-	-
10	○							-	-	-
11	○							-	-	-
12	○							-	-	-
13	○							-	-	-
14	○							-	-	-
15	○							-	-	-
Rie	Aria Strato termare esterno									0,040
Spessore totale componente [cm]		77,00						Resistenza termica totale [m ² K/W]		1,727
RISULTATI										
Regime periodico stabilizzato						Regime stazionario				
T = 24 ore										
Fattore di decremento (attenuazione)	fd	[-]	0,004			Massa superficiale	Ms	[kg/m ²]	1400	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]	2,06			Resistenza termica totale	Rt	[m ² K/W]	1,727	
Trasmittanza termica periodica	[Y]e	[W/m ² K]	0,003			Trasmittanza	U	[W/m ² K]	0,579	
Ammissenza termica lato interno	Yi	[W/m ² K]	3,14			Conduttanza	C	[W/m ² K]	0,659	
Ammissenza termica lato esterno	Ye	[W/m ² K]	8,79			Capacità termica areica	Cta	[kJ/m ² K]	2625	
Capacità termica areica lato interno	kt1	[kJ/m ² K]	43,2			Costante di tempo	τ	[h]	971	
Capacità termica areica lato esterno	kt2	[kJ/m ² K]	120,8							
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete dipendente						fsd	[-]	0,466		
Parete interna						fai	[-]	0,466		

Figura 20 stratigrafia del solaio controterra

Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (ρ) [Kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ζ = s/δ [-]	Resistenza termica [m ² K/W]
Ria	Aria Strato termare interno									0,100
1	○ pavimentazione in gres	0,015	0,538		1000	2700		0,074	0,203	0,028
2	○ collante	0,005	0,750		1000	1350		0,124	0,040	0,007
3	○ massetto in CLS alleg	0,100	0,099		1000	480		0,075	1,328	1,010
4	○ membrana bituminosa	0,004	0,245		1630	900		0,029	0,138	0,009
5	○ solaio in laterocem 16+4	0,200	1,800		2000	2500		0,100	2,010	0,111
6	○ intonaco mt. calc. cem.	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,128	0,017
7	○							-	-	-
8	○							-	-	-
9	○							-	-	-
10	○							-	-	-
11	○							-	-	-
12	○							-	-	-
13	○							-	-	-
14	○							-	-	-
15	○							-	-	-
Rie	Aria Strato termare esterno									0,040
Spessore totale componente [cm]		33,80						Resistenza termica totale [m ² K/W]		1,401
RISULTATI										
Regime periodico stabilizzato						Regime stazionario				
T = 24 ore										
Fattore di decremento (attenuazione)	fd	[-]	0,008			Massa superficiale	Ms	[kg/m ²]	626	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	φ	[h]	13,98			Resistenza termica totale	Rt	[m ² K/W]	1,401	
Trasmittanza termica periodica	[Y]e	[W/m ² K]	0,070			Trasmittanza	U	[W/m ² K]	0,714	
Ammissenza termica lato interno	Yi	[W/m ² K]	3,75			Conduttanza	C	[W/m ² K]	0,793	
Ammissenza termica lato esterno	Ye	[W/m ² K]	11,72			Capacità termica areica	Cta	[kJ/m ² K]	1128	
Capacità termica areica lato interno	kt1	[kJ/m ² K]	51,7			Costante di tempo	τ	[h]	439	
Capacità termica areica lato esterno	kt2	[kJ/m ² K]	161,8							
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete dipendente						fsd	[-]	0,625		
Parete interna						fai	[-]	0,624		

Figura 21 stratigrafia del solaio di copertura

Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conducibilità termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (p) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (d) [m]	$\zeta = s/d$ [-]	Resistenza termica [m2kw]
Rsi	Aria Strato laminare interno									0,100
1	intonaco int. cacle cem.	0,015	0,900		1000	1800		0,117	0,128	0,017
2	solaio in laterocem 16+4	0,200	1,800		2000	2500		0,100	2,010	0,111
3	membrana bituminosa	0,004	0,045		1630	900		0,029	0,138	0,089
4	massetto in CLS alleg	0,100	0,099		1000	480		0,075	1,328	1,010
5	collante	0,005	0,790		1000	1350		0,124	0,040	0,007
6	pavimentazione in gres	0,015	0,538		1000	2700		0,074	0,203	0,028
7	DAKU FSD 30	0,080	0,034		1200	25		0,177	0,453	2,353
8	DAKU STABILFILTER SFE	0,0013	0,220		900	170		0,199	0,007	0,006
9	DAKU ROOF SOIL	0,080	0,110		1348	878		0,085	0,943	0,258
10								-	-	-
11								-	-	-
12								-	-	-
13								-	-	-
14								-	-	-
15								-	-	-
Rse	Aria Strato laminare esterno									0,040
Spessore totale componente [cm]		50,03		Resistenza termica totale [m2K/W]		4,018				
RISULTATI										
Regime periodico stabilizzato						Regime stazionario				
T = 24 ore										
Fattore di decremento (attenuazione)	fd	[-]	0,012			Massa superficiale	Ms	[kg/m2]	888	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	ϕ	[h]	21,42			Resistenza termica totale	Rt	[m2K/W]	4,018	
Trasmittanza termica periodica	[Yie]	[W/m2K]	0,093			Trasmittanza	U	[W/m2K]	0,249	
Ammettenza termica lato interno	Yii	[W/m2K], [h]	6,97			Conducianza	C	[W/m2K]	0,258	
Ammettenza termica lato esterno	Yee	[W/m2K], [h]	4,86			Capacità termica areica	Cta	[kJ/m2K]	1225	
Capacità termica areica lato interno	k1	[kJ/m2K]	95,8			Costante di tempo	τ	[h]	1368	
Capacità termica areica lato esterno	k2	[kJ/m2K]	66,8							
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete dipendente		fsd	[-]	0,383		0,514				
Parete interna		fsl	[-]	0,383		0,514				

Figura 22 stratigrafia del solaio di copertura con tetto verde

ⁱ Report RdS/PAR2013/136, Report RdS/PAR2013/137 , Report RdS/PAR2013/139, Report RdS/PAR2015/154