

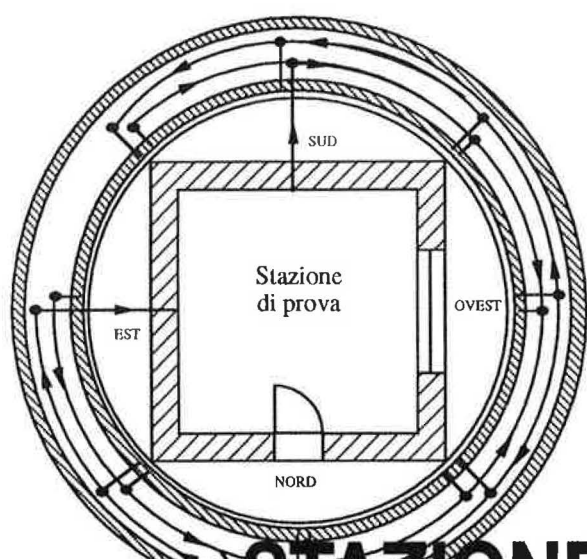
1 INTRODUZIONE

Sono stati finora sviluppati numerosi metodi di calcolo sia di tipo complesso che semplificato [1], [2], [3] e [4] per predire il comportamento termico degli edifici durante il riscaldamento invernale ed i relativi consumi energetici, nonché gli indici di comfort degli occupanti. Un numero più esiguo di metodi è invece disponibile per la previsione dei consumi energetici relativi alla climatizzazione estiva [5] e [6].

È ben noto che la voce riscaldamento degli edifici assorbe una grossa aliquota dei consumi energetici nazionali ed il condizionamento estivo, che si va sempre di più estendendo anche nel nostro paese, impegna quote non trascurabili di energia elettrica.

Nell'ambito della problematica del risparmio energetico è dunque molto utile poter disporre di metodi di calcolo sufficientemente accurati, convalidati sperimentalmente, mediante i quali sia possibile prevedere con accuratezza i consumi e progettare adeguatamente l'involucro edilizio, anche ai fini della "certificazione energetica" dell'edificio, introdotta dalla legge n. 10 del 9/01/91.

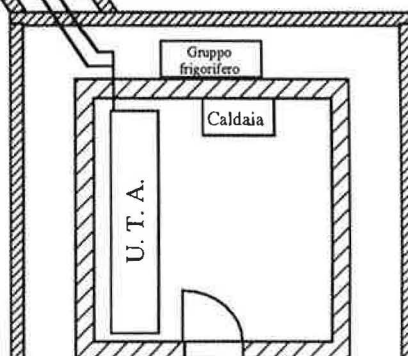
Benché sia stato effettuato molto lavoro sperimentale, anche su parchi di edifici ubicati in diverse località italiane, specie per quanto riguarda la rilevazione dei consumi stagionali di combustibile, dei gradi giorno e della temperatura dell'aria interna in alcuni ambienti di riferimento, i risultati finora ottenuti per giudicare l'effettiva capacità dei modelli di calcolo di predire accuratamente i dati di consumo sono spesso contraddittori, sia per la complessità delle variabili in



Mario Cucumo, Dimitrios Kaliakatsos,
Valerio Marinelli

STAZIONE DI PROVA AD ORIENTAMENTO VARIABILE

Un laboratorio outdoor
per lo studio e la sperimentazione
del comportamento
energetico dell'edificio



gioco, spesso non adeguatamente note, sia per l'aleatorietà del comportamento degli occupanti gli edifici. D'altro canto i confronti tra i vari modelli impiegati per la valutazione dei fabbisogni termici invernali [7] e [8] hanno evidenziato differenze di previsione spesso non trascurabili. Tutto ciò indica la necessità di svolgere ulteriore ricerca sperimentale in questo campo al fine di migliorare e convalidare maggiormente i metodi di calcolo.

La presente ricerca si propone lo scopo di colmare queste lacune realizzando una stazione di prova in scala reale, accuratamente "definita" e strumentata nella quale sia possibile effettuare campagne di prove sperimentali in grado di fornire tutte le informazioni utili per validare i modelli di calcolo esistenti (sia modelli complessi che metodi di calcolo semplificati) e per caratterizzare le prestazioni energetiche e termoigrometriche dei componenti edilizi dell'involucro esterno dell'edificio, di tipo sia tradizionale che innovativo.

È possibile inoltre studiare con la stazione di prova il comportamento di componenti solari passivi quali pareti ad accumulo termico (muri Trombe e ad acqua), pareti a camino solare, pareti vetrate ecc.

Non esistono, a conoscenza degli autori, altre stazioni di prova di questo genere ad orientamento variabile; tuttavia, nell'ambito del progetto PASSYS della C.E.E. [9], sono state realizzate celle di prova strumentate ad orientamento fisso. Un punto debole di queste celle è che, ad eccezione della parete di prova, non viene riprodotta l'inerzia termica degli involucri edilizi comunemente usati, essendo la struttura delle celle realizzata con materiale isolante in una ossatura portante di acciaio.

2 LA STAZIONE DI PROVA

La stazione di prova, ubicata presso il Dipartimento di Meccanica dell'Università della Calabria, consiste in un monolocale con cinque pareti costruite con materiale edilizio di inerzia termica paragonabile a quella degli edifici reali e debitamente isolate in modo da essere quasi adiabatiche, e da una parete "trasmittente", sostituibile con pareti di tipologia diversa.

Il monolocale è montato su una piattaforma rotante, in modo da poter variare l'orientamento della parete trasmittente rispetto al sole.

La stazione di prova è provvista di un impianto di climatizzazione ad aria per il riscaldamento ed il raffreddamento e di un impianto di riscaldamento ad acqua che alimenta alternativamente un radiatore, un ventilconvettore o un pavimento radiante. Gli impianti sono opportunamente controllati in modo da mantenere all'interno la temperatura e l'umidità di progetto negli intervalli di funzionamento considerati.

L'ambiente è strumentato mediante termoresistenze per la misura della temperatura dell'aria interna e ter-

moresistenze e termoflussimetri applicati sulle pareti per la misura delle temperature di parete, dei flussi termici e delle caratteristiche termofisiche dei materiali in opera.

Il clima esterno viene rilevato in tempo reale mediante cinque solarimetri, un pireliometro ed una centralina meteorologica.

I dati sperimentali vengono rilevati mediante un opportuno sistema di acquisizione ed elaborazione dati posto nella stazione di prova e trasferiti via rete ad un secondo computer collocato nella stazione ausiliaria, nella quale sono alloggiati gli impianti termici.

La stazione di prova, avente le dimensioni nette di 4x4x3,2 m, costruita con ossatura portante in cemento armato, è composta da cinque pareti (tre verticali, tetto e pavimento) "quasi adiabatiche" e da una parete di prova. Le pareti "quasi adiabatiche" verticali sono del tipo a cassa vuota realizzate con doppio strato di mattoni forati ad una testa dello spessore di 8 cm. L'intercapedine tra i due mattoni (spessore 30 cm) è riempita da isolante termico tipo Styrodur in lastre rigide.

La parete finita (compresi gli intonaci) ha pertanto uno spessore complessivo di 50 cm ed una trasmittanza di 0,1 W/m² K.

La "parete di prova" ha invece tipologia variabile in base alle campagne di prove che si effettueranno: essa subirà pertanto diverse demolizioni e ricostruzioni. Per evitare traumi al resto della struttura i pilastri sono stati opportunamente sagomati. La prima parete di prova, di tipo monolitico, è stata realizzata con mattoni isolanti dello spessore di 30 cm, con struttura alveolare (tipo Alveolater): la sua trasmittanza è di 0,52 W/m² K.

Il solaio è stato coibentato (lato estradosso) con 30 cm di isolante termico protetto dall'acqua mediante "scossalina piana", in acciaio zincato, preverniciata a fuoco, dello spessore di 8/10 mm ed opportunamente sigillata. Questa soluzione lascia aperta la possibilità di poter studiare anche gli ambienti con tetto disperdente, rimuovendo l'isolante termico. Il solaio attuale ha una trasmittanza di 0,11 W/m² K.

Il pavimento è stato realizzato con quattro strati: un primo strato (spessore 15 cm) costituito da un massetto isolante di cemento ed argilla espansa; un secondo strato (spessore 30 cm) costituito da isolante termico in lastre rigide; un terzo strato (spessore 5 cm) costituito da un massetto di calcestruzzo armato con rete elettrosaldata ϕ 5 con maglia 20x20 cm ed infine uno strato di piastrelle in gres antigelivo delle dimensioni 15 x 15 cm. Nel massetto è annegata una serpentina in polietilene reticolato ϕ 18x2,5 mm (T_{max} di esercizio 95°C, P_{max} di esercizio 10 atm) con passo di 20 cm. La trasmittanza del pavimento è di 0,1 W/m² K. La finestra della prima parete di prova, avente dimensioni 1,5 x 1,2 m, in doppio vetro, è del tipo "monoblocco" in alluminio in modo da poter essere utilizza-

ta anche in successive campagne di prova ed è provvista di persiana avvolgibile in alluminio con doghe riempite di poliuretano espanso.

Allo scopo di ridurre le dispersioni termiche in corrispondenza dell'ingresso, la stazione di prova ha una doppia porta, una interna ed una esterna, entrambe isolate termicamente.

L'effetto dei ponti termici sulle perdite di calore risulta pari al 3% per l'attuale parete di prova ed al 6,5% per l'intera stazione di prova.

Allo scopo di poter studiare l'influenza dell'orientamento della "parete di prova" sul comportamento energetico dei componenti edilizi, la stazione di prova è stata collocata sopra una piattaforma ruotante in acciaio.

La piattaforma, costituita da un reticolo di travi IPE e UNP di diverse dimensioni, si adagia su quattro carrelli (ognuno provvisto di due ruote) obbligati a muoversi su una rotaia di forma circolare. Essa è stata realizzata con un quadro pieno di 60 mm saldata su 32 traversine UNP 100. Il reticolo è coperto da una

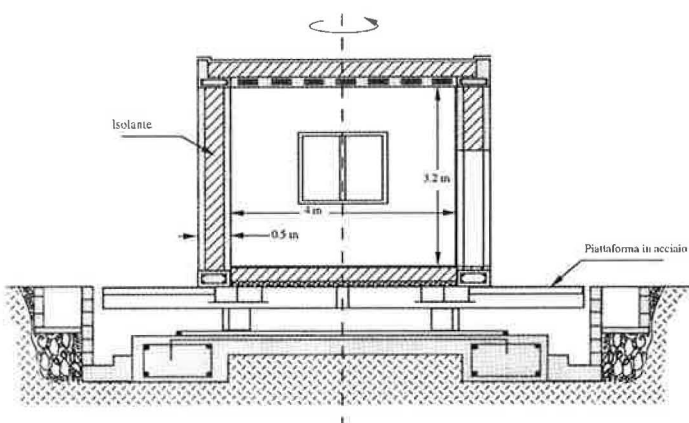


Figura 1 - Sezione verticale della stazione di prova

lamiera di acciaio di forma circolare avente 8 mm di spessore. Per limitare il costo del sistema di rotazione della stazione di prova si è adottata la soluzione più semplice, consistente nell'utilizzo di un motore elettrico da 2 HP, 1400 rpm, due motoriduttori con controllo elettronico della velocità tramite inverter ed una fune di acciaio avvolta attorno alla piattaforma. La velocità di rotazione prevista è di 1 giro all'ora per evitare le sollecitazioni dinamiche che potrebbero produrre lesioni alla struttura.

È stata inoltre lasciata la possibilità di applicare sul perimetro esterno della piattaforma (costituito da un profilato UNP 100) una dentatura a cremagliera da connettere, mediante opportuna trasmissione, al motore elettrico. Tale modalità di rotazione consentirebbe di studiare il comportamento termico passivo della stazione di prova in condizioni di inseguimento continuo del sole, dopo averla scollegata dalle tubazioni di trasporto dei fluidi. Nella figura 1 viene mostrata una sezione verticale della stazione di prova.

3 LA STAZIONE AUSILIARIA E GLI IMPIANTI TERMICI

La stazione di controllo ed acquisizione dati, avente dimensioni nette 4x4x3 m, è ubicata a 15 m di distanza dalla stazione di prova ma in posizione tale da non portare ombre su di essa. Essa è stata progettata allo scopo di contenere tutte le apparecchiature di controllo e tutti gli impianti termici.

Le apparecchiature termiche installate nella stazione ausiliaria sono:

- una caldaia murale a gas con potenza nominale 6/12 kW dotata di un serbatoio di accumulo da 100 litri;
- un refrigeratore d'acqua da 6,2 kW con serbatoio di accumulo freddo da 80 litri;
- una unità di trattamento dell'aria.

Combinando in modo opportuno questi componenti ed i corpi scaldanti è possibile realizzare le seguenti modalità di climatizzazione ad acqua e ad aria:

per il periodo invernale:

- sistema di riscaldamento ad acqua con radiatore;
- sistema di riscaldamento ad acqua con ventilconvettore;
- sistema di riscaldamento ad acqua con pavimento radiante;
- sistema di riscaldamento ad aria;
- sistema di riscaldamento misto con acqua nel ventilconvettore ed aria primaria umidificata immessa nell'ambiente;
- sistema di riscaldamento misto con acqua nel pavimento radiante ed aria primaria umidificata;

per il periodo estivo:

- sistema di raffrescamento ad aria;
- sistema di raffrescamento con acqua fredda nel ventilconvettore;
- sistema di raffrescamento con acqua fredda nel pavimento radiante;
- sistema di raffrescamento misto con acqua fredda nel ventilconvettore ed aria primaria deumidificata immessa nell'ambiente;
- sistema di raffrescamento misto con acqua fredda nel pavimento radiante ed aria primaria deumidificata.

Nella figura 2 è mostrata una vista assonometrica della stazione di prova con l'ubicazione del radiatore, del ventilconvettore e delle bocchette di immissione e di estrazione dell'aria.

Nella figura 3 è mostrato lo schema semplificato degli impianti termici della stazione di prova.

La caldaia, il refrigeratore d'acqua e l'unità di trattamento dell'aria (UTA) sono, come già detto, ubicati nella stazione ausiliaria, ed i fluidi vengono convogliati alla stazione di prova per mezzo di tubazioni posizionate all'interno di un cunicolo rettilineo per un tratto di 15 m e circolare per la parte adiacente alla stazione di prova.

Ad intervalli angolari di 45° sono disposti dei collegamenti flessibili e mobili in modo da poter connette-

re la stazione di prova girevole alla rete dell'acqua e dell'aria nelle varie posizioni angolari da essa assunte. Sono infatti previste per la casa girevole otto posizioni angolari principali, rimanendo sempre la possibilità di orientarla in qualunque direzione.

Nella figura in apertura sono mostrate le otto posizioni di collegamento tra la stazione di prova ed i condotti dell'aria.

L'impianto di climatizzazione ad aria è costituito dalla sezione di miscelamento, dalla batteria di riscaldamento, dalla batteria di raffreddamento e deumidificazione, dall'umidificatore, dalla batteria di post-riscaldamento e da due unità ventilanti provviste di motori elettrici monofase da 180 W. L'impianto è stato progettato per mezzo di simulazioni ottenute con i codici di calcolo CLIMED-1M e CLIMED-2M sviluppati presso la sezione di Fisica Tecnica del Dipartimento di Meccanica dell'Università della Calabria. È stato previsto sia il funzionamento a portata costante che a portata variabile nell'intervallo 100-800 m³/h.

4 CONTROLLO E REGOLAZIONE DEGLI IMPIANTI

La regolazione ed il monitoraggio dell'intero impianto sono affidati ad un controllore a microprocessore (PRU) ad alta capacità di gestione del traffico dati collegato a mezzo Bus ad un PC, corredato di softwa-

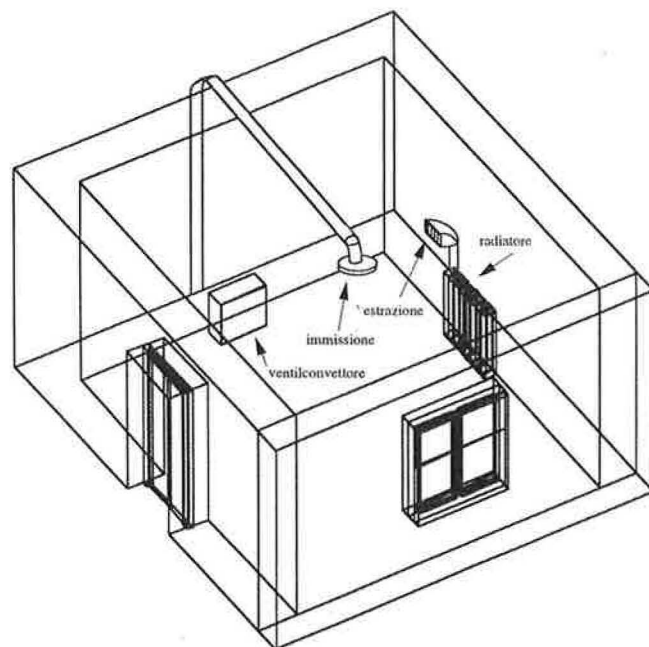


Figura 2 - Vista assonometrica della stazione di prova con l'ubicazione del radiatore, del ventilconvettore e delle bocchette di immissione e di estrazione dell'aria

re dedicato.

Il controllo dell'impianto in regolazione avviene per mezzo di un sistema di carte operative personalizzabili (POP CARDS) che permette una rapida e facile consultazione dei dati.

I dati di processo del sistema vengono convertiti e digitalizzati per mezzo di opportuni moduli di interfaccia con l'impianto e sono trasmessi al controllore

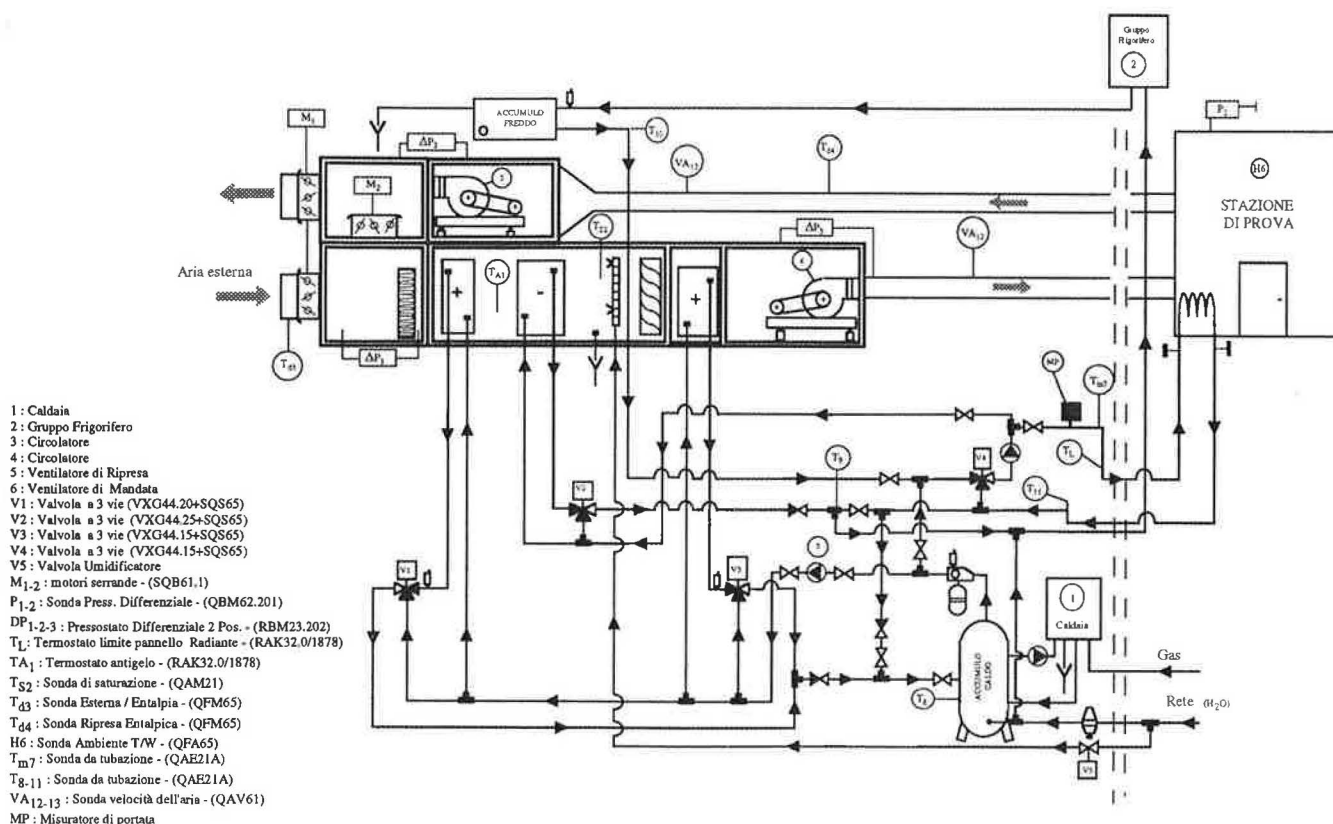


Figura 3 - Schema degli impianti termici della stazione di prova

di processo tramite un Bus di comunicazione ad alta velocità (60 kbd) L'insieme dei moduli posizionati sui binari sono montati in appositi pannelli e collegati tra di loro tramite Bus di comunicazione. Sono previsti moduli di interfaccia per il controllo degli ingressi e delle uscite sia di tipo analogico che di tipo digitale.

5 STRUMENTAZIONE E SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

La stazione di prova è provvista di sensori per la misura delle temperature di parete, della temperatura e dell'umidità dell'aria, e dei flussi termici.

Sono stati inizialmente impiegati, per la misura del flusso termico, 10 termoflussimetri (HFS) forniti dall'Istituto di Fisica Applicata TNO-TPD di Delft (Olanda) applicati in prossimità delle superfici interne della stanza nelle posizioni indicate in figura 4.

È stato fatto uno studio bidimensionale sull'errore di misura degli HFS che ha portato alla scelta del tipo di sensore PU32T per limitare l'errore sul flusso termico. Questo sensore, dello spessore di 1 mm e del diametro di 75 mm, presenta un errore sistematico di distorsione del flusso termico pari al -4%. La costante di calibrazione di ciascun sensore è affetta da un errore del $\pm 5\%$. Per le misure delle temperature di parete si è preferito l'impiego di termoresistenze PT100 ohm a quattro fili di classe 1/3 DIN, con piastrina di fibra di vetro, applicate sulle superfici interne ed esterne delle pareti, piuttosto che di termocoppie, per ridurre l'errore di misura a 0,1-0,15 °C. Le termoresistenze, in numero di 52, sono posizionate come mostrato nella figura 5 (28 sulle superfici interne e 24 sulle superfici esterne).

La temperatura dell'aria interna è misurata con termoresistenze PT100 poste in 10 diverse posizioni all'interno dell'ambiente, nel quale è inoltre collocata una sonda per la misura dell'umidità relativa e della temperatura dell'aria ai fini del controllo dell'impianto di climatizzazione ad aria.

Il flusso solare globale è misurato per mezzo di 5 solariometri della Kipp & Zonen, di cui 4 montati sulle superfici verticali esterne ed uno sul piano orizzontale del tetto della stazione di prova. L'irraggiamento solare diretto è misurato per mezzo di un pireliometro della Kipp & Zonen, munito di inseguitore solare.

Una centralina meteorologica misura la temperatura dell'aria esterna, l'umidità relativa, la pressione atmosferica, la direzione e la velocità del vento.

La portata dell'acqua calda e fredda è misurata mediante un misuratore di portata elettromagnetico, mentre la portata dell'aria è valutata per mezzo di alcuni anemometri a filo caldo.

I condotti dell'acqua e dell'aria sono provvisti di termoresistenze per la misura delle temperature dei fluidi. I segnali dei sensori, per un totale di circa 100 punti di

misura, opportunamente trattati mediante moduli di condizionamento a 32 canali dell'input analogico vengono acquisiti, tramite una scheda di conversione analogico-digitale, da un PC provvisto di software dedicato e collocato all'interno della stazione di prova. L'elaboratore dei dati, collegato mediante un cavo RG58 (fig. 6) è posizionato nella stazione ausiliaria. Con questa soluzione i sensori sono il più possibile vicino ai moduli di condizionamento, ed inoltre l'operatore non interferisce con l'ambiente monitorato della stazione di prova.

I valori di temperatura ed umidità dell'aria trattata sono invece acquisiti dal PC dedicato al controllo degli impianti, posizionato nella stazione ausiliaria.

Nella figura 7 è mostrata la parete di prova della stazione girevole; si notano in essa i cavi delle termoresistenze applicate all'esterno e due piranometri.

Le foto riportate nelle figure 8 e 9 mostrano invece i collegamenti dei sensori con il sistema di acquisizione dati.

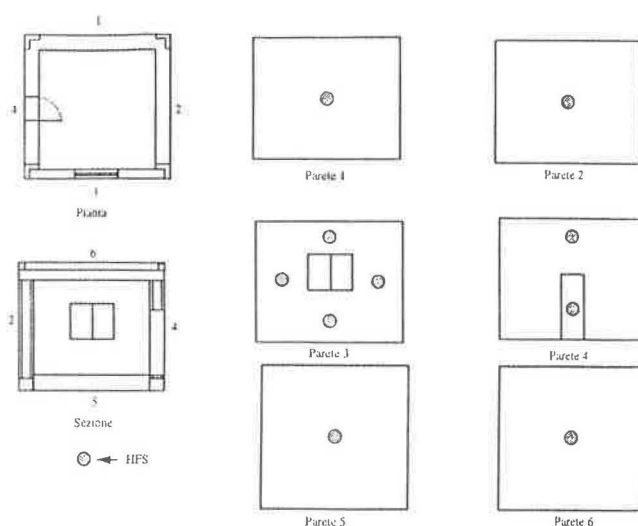


Figura 4 - Posizionamento dei termoflussimetri per la stazione di prova

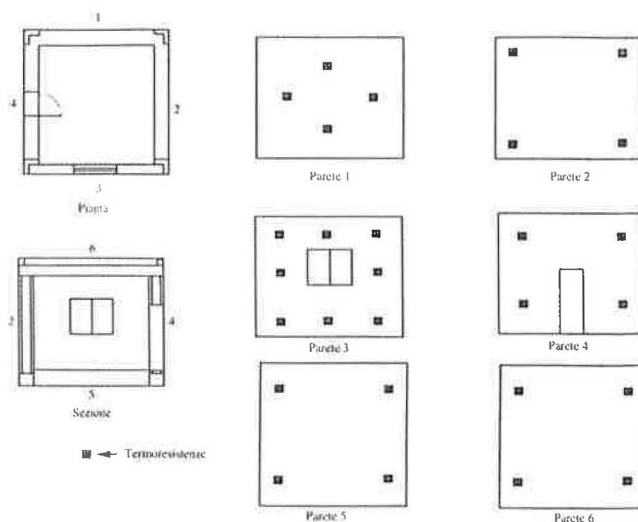


Figura 5 - Posizionamento delle termoresistenze per la stazione di prova

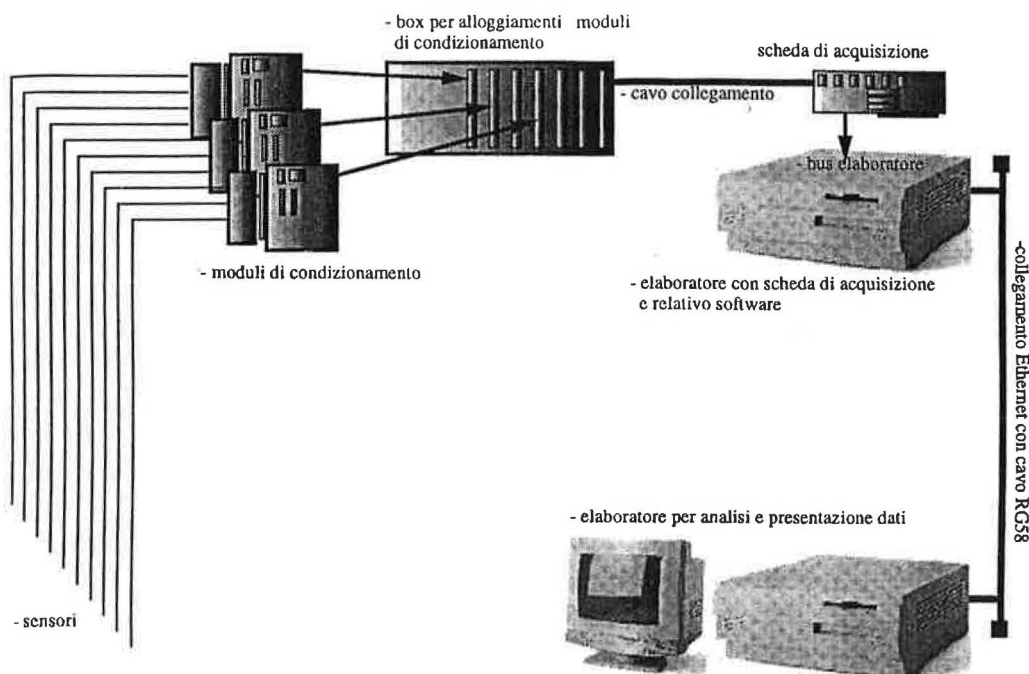


Figura 6 - Schema del sistema di acquisizione dati

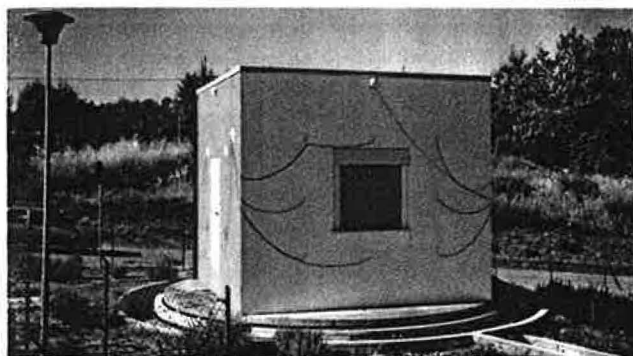


Figura 7 - Foto della stazione di prova

6 CONCLUSIONI

È stata costruita, presso l'Università della Calabria, una stazione di prova ad orientamento variabile per studi e sperimentazione del comportamento energetico dell'edificio.

La stazione di prova è provvista di una caldaia murale a gas con un serbatoio di accumulo dell'acqua calda, un refrigeratore d'acqua con serbatoio di accumulo freddo, una unità di trattamento dell'aria, un radiatore, un ventilconvettore e un pavimento radiante a tubi annegati.

Combinando in modo opportuno questi componenti è possibile realizzare sei modalità diverse di riscaldamento ad acqua e ad aria nel periodo invernale e cinque modalità di raffrescamento ad aria e ad acqua nel periodo estivo.

L'ambiente è strumentato mediante termoresistenze per la misura della temperatura dell'aria interna e da termoresistenze e termoflussimetri applicati sulle pareti per la misura delle temperature di parete, dei flussi termici e delle caratteristiche termofisiche dei materiali in opera.

Il clima esterno viene misurato in tempo reale mediante cinque solarimetri, un pireliometro ed una centralina meteorologica.

I dati sperimentali vengono rilevati mediante un opportuno sistema di acquisizione ed elaborazione dati, installato in parte nella stazione di prova ed in parte nella stazione ausiliaria, nella quale sono alloggiati gli impianti termici.

Per mezzo di questa apparecchiatura sarà possibile convalidare sperimentalmente in modo accurato, mediante opportune campagne di prova, vari metodi di calcolo del comportamento termico invernale ed estivo degli edifici e dei consumi energetici. Sarà altresì possibile caratterizzare le prestazioni energetiche e termoigrometriche dei componenti edilizi dell'involucro esterno dell'edificio di tipo sia tradizionale che innovativo.

La stazione di prova verrà in futuro dotata di un sistema di collettori solari ad acqua collegati al pavimento radiante, in modo da ottenere dati sperimentali anche su questo tipo di riscaldamento, che appare interessante dal punto di vista del risparmio energetico.

Verranno anche effettuate, mediante opportuna strumentazione, misure di luce naturale contemporaneamente alle misure di radiazione solare, in modo da verificare i modelli di calcolo esistenti ed ottenere dati sull'illuminamento naturale per i quali c'è in Italia scarsità di informazione.

Infine, la stazione di prova sarà corredata di alcuni pannelli fotovoltaici per effettuare studi su questi sistemi.

Con i potenziamenti citati la stazione di prova costituirà un laboratorio completo per studi energetici sull'edificio.