

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Energetica

Prova Finale di Laurea Triennale

Piano di Azione per l'Energia Sostenibile e per lo Sviluppo del Turismo in Alta Quota



Tutor: Prof. Guglielmina Mutani

Studente: Alberto Ferrarese

Contents

1 - INTRODUZIONE.....	4
2 - STORIA E ORIGINI.....	4
3 - MAISONECO.....	8
3.1 - Caso di studio.....	8
3.2 - Planimetria.....	10
3.3 - Stratigrafia.....	11
3.3.1 - Stratigrafia pareti verticali opache.....	11
3.3.2 - Stratigrafia solette (pavimento).....	12
3.3.3 - Stratigrafia soffitto.....	13
4 – STUDIO E MONITORAGGIO DELL’ABITAZIONE.....	14
4.1 - Sistema di monitoraggio dell’abitazione.....	14
4.2 - Strumentazioni di misurazione.....	16
Flussimetro.....	16
Termocamera.....	16
Blower Door System.....	18
5 - DATI E GRAFICI.....	19
5.1 - Profilo parete.....	19
5.2 - Energia consumata.....	21
5.3 - Umidità.....	22
6 - CALCOLO CONDUCIBILITA’ TERMICA DELLA PAGLIA.....	23
6.1 - Calcolo della conducibilità termica tramite il sistema di monitoraggio.....	23
6.2 - Calcolo della conducibilità termica tramite il flussimetro.....	27
7 - CALCOLO TRASMITTANZE.....	30
Parete.....	30
Pavimento.....	30
Soffitto.....	30
Ponti Termici.....	31
Involuceri trasparenti.....	32
Ricambi d’aria.....	32
Tabella riassunti trasmittanze.....	33
8 – CALCOLO DEI PARAMETRI TERMICI DINAMICI.....	34
Confronto tra Sfasamento calcolato e misurato.....	35
9 - CALCOLO DELLA PRESTAZIONE IGROMETRICA.....	36
10 – CALCOLO DEI CONSUMI DELL’ABITAZIONE.....	38
10.1 - Dati climatici.....	38

10.2 - Dispersioni (ventilazione + trasmissione).....	38
10.3 - Apporti solari.....	39
10.4 - Consumi netti abitazione.....	40
10.5 - Firma energetica.....	42
11 - CONCLUSIONI.....	43
12 - BIBLIOGRAFIA.....	44

1 - INTRODUZIONE

Il progetto “straw-house” nasce dalla volontà dell’azienda Maisonéco di riscoprire l’utilizzo di materiali ecologici come isolanti in ambito edilizio.

Il prototipo è stato affidato all’Istituto Tecnico ISTP di Verrés, che con l’utilizzo di progetti scolastici ha implementato diversi moduli di monitoraggio per valutare le prestazioni dell’edificio in ambito energetico.

Il presente studio raccoglie il lavoro portato avanti dall’istituto e l’aggiunta di una serie di misurazioni al fine di ottenere una panoramica completa sia delle caratteristiche fisiche del materiale utilizzato, paglia, sia delle prestazioni energetiche dell’edificio.

2 - STORIA E ORIGINI

L’uomo ha sempre cercato di utilizzare nella costruzione delle proprie abitazioni tutti i materiali affidabili e facili da ottenere dal territorio. La paglia è uno dei materiali di costruzione più antichi utilizzato maggiormente in combinazione con il fango. A testimonianza di questo vi sono resti di case fabbricate in tutto il mondo: in Germania, esistono registri di abitazioni con più di 500 anni che ancora sono in uso, con più di 200 anni in Inghilterra dove la tecnica di combinare paglia e fango è conosciuta come “Cob”.

Innumerevoli culture nel mondo hanno valorizzato le qualità di questo materiale e lo hanno adoperato per i loro rifugi, poiché porta con sé benefici ambientali essendo un materiale di scarto e non necessitando di trattamenti inquinanti per essere adoperato.

L’origine della casa costruita esclusivamente con blocchi di paglia non è così antica; questo è dovuto al fatto che il macchinario utilizzato per imballare la paglia fu inventato solo a metà del XIX secolo. La prima imballatrice fu inventata negli Stati Uniti nel 1850 ed era totalmente manuale. Successivamente nel 1875 ne fu creata una trainata da cavalli e infine, nel 1884 la macchina possedeva una con forza motrice a vapore.

La prima casa documentata costruita interamente con blocchi di paglia si trova nelle pianure del Nebraska, edificata nel 1896 dai colonizzatori europei. Questi, in attesa dell’arrivo dei materiali per costruire le proprie abitazioni e vedendo che il luogo non forniva legname e pietra in quanto privo di zone boschive e rocciose, utilizzarono la paglia come materiale per le loro case provvisorie. Con il tempo si resero conto che, oltre a rendere le abitazioni confortevoli, la paglia è un materiale molto isolante, facile da lavorare ed economico. L’abitazione più antica che ancora ai nostri giorni continua ad essere utilizzata è la casa di George P. Bruñe, costruita nel 1903.



Figura 2.1. Abitazione in paglia di Arthur - Nebraska 1925

In Europa le prime case di paglia risalgono agli inizi de XX secolo e la casa più antica conosciuta fu costruita in Montargis, Francia nel 1921.



Figura 2.2. Abitazione unifamiliare in Montargis - Francia 1921.

Agli inizi del 1940, a causa della 2^a guerra mondiale e delle pressioni delle imprese di cemento e acciaio, questa tecnica bio-costruttiva cadde in disuso permettendo così un maggior mercato di acciaio e di cemento nel mondo dell'edilizia. Ciò portò all'abbandono di molte abitazioni anche se tutt'ora alcune vengono utilizzate nonostante la scarsa manutenzione.

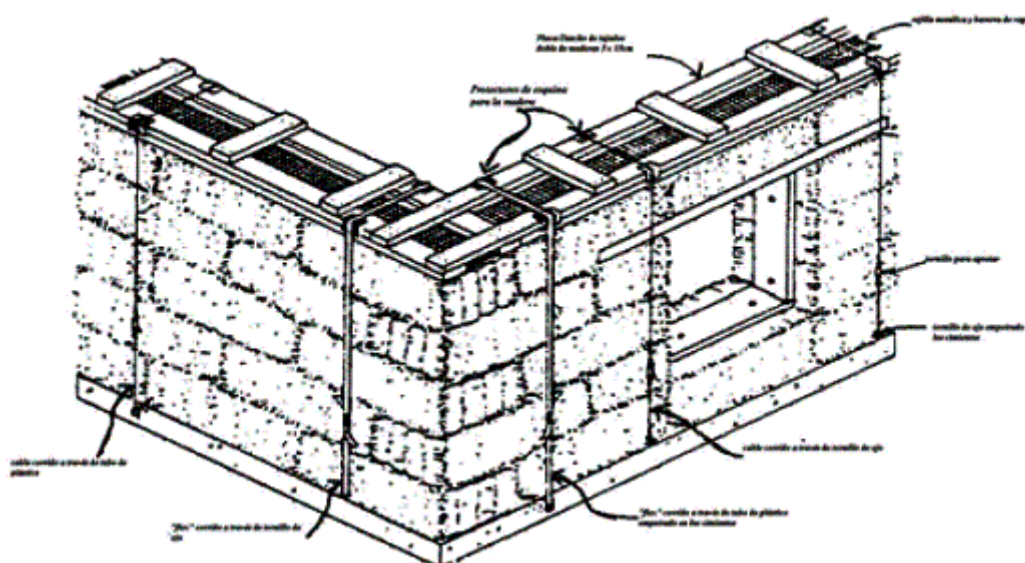
Bisogna aspettare gli anni Sessanta quando movimenti alternativi nella nuova architettura californiana diedero origine ai primi adattamenti delle bio-costruzioni con paglia.

La rinascita delle costruzioni di paglia cominciò nel 1973 con un articolo scritto da Roger Welsch per il libro "Outside house". Questo fu un testo dal quale presero ispirazione le nuove generazioni di case di paglia.

Lo storico Roger L. Welsch di Nebraska scrisse: "Era inevitabile che qualche colono disperato, alla ricerca di un materiale economico e disponibile, non vedesse i blocchi di paglia come una possibilità di costruzione. Blocchi lunghi 1 metro, alti 34 centimetri e larghi 45, furono impilati come mattoni. Quattro o cinque barre di legno (in altri casi di ferro) furono collocate all'interno dei blocchi di paglia per sostenerli e unirli saldamente. La base della soffitta e la soffitta stessa venivano sostenute dalla struttura portante in legno e paglia."

In Québec, Canada, vicino al confine con gli Stati Uniti, François Tanguay, ispirato dall'articolo di Roger Welsch, progettò un tetto in paglia e si rese conto che lo stesso sistema di costruzione utilizzato per il tetto, poteva essere utilizzato per costruire le pareti della casa. Fu così che nel 1981 costruì una casa di assi e travi riempita di blocchi di paglia nel sud-est del Québec.

Nel 1982, la "Canada Mortgage and Housing Corporation" finanziò il programma Housing Technology Incentives per dimostrare come un sistema di blocchi di paglia e di malta potesse essere utilizzato per la costruzione di pareti portanti per abitazioni civili. Louis Gagné de Huli, Québec, sviluppò un sistema di pareti chiamato "sistema a matrice" che prevedeva un muro di blocchi di paglia impilati in colonna con giunzioni in malta. Questa metodologia di parete è stata testata da consulenti indipendenti che hanno verificato, attraverso metodi rigorosi, la resistenza al calore, alla perforazione e alla penetrazione dell'umidità.



Nel 1987 si riprende in via ufficiale il metodo di costruzione con paglia negli Stati Uniti. L'anno successivo, nel rapporto che riassumeva il Corso di Disegno di Permacultura del 1987, fu incluso un articolo sulle costruzioni con blocchi di paglia di Dave Bainbridge, il quale influenzò molti costruttori. Nel 1991 uscì il primo libro sulle costruzioni in paglia scritto da S.O. Macdonald. Nacque inoltre l'associazione "Out on a Bale" in contemporanea la rivista *The Last Straw*, entrambe dedicate esclusivamente alle costruzioni in paglia. Nello stesso anno fu edificata la prima casa con balle di paglia finanziata dalla banca, in Tesuque, Nuovo Mexico.

Nel settembre del 1993 ebbe luogo in Arthur, Nebraska, la prima conferenza sugli edifici con blocchi di paglia, "Radici e Rinascita", alla quale assistettero cinquanta architetti, costruttori e disegnatori. In Canada, lo stesso anno, Kim Thompson, della Nuova Scozia, costruì un edificio con mura portanti che prevedevano 7 blocchi per il primo piano, 3 per il secondo e un tetto a cattedrale. Il sistema consisteva nell'appoggiare l'edificio su una piattaforma in legno sostenuta da larghi tralicci del telefono sommersi 1.5 metri nel terreno. La struttura di Thompson è di grande rilevanza, in quanto l'edificio è costruito in un'aera soggetta a carichi di neve e umidità relativamente alti. La paglia nei periodi invernali tende a comprimersi sotto il peso della neve e a riprendere la sua dimensione originale man mano che questa si scioglie.

Nel 1994 in Russia, nei monti Urali vicino a Chelyabinsk, l'americano Scott Pittman e il fondatore australiano della Permacultura Bill Mollison, costruirono un'officina di balle di paglia nella fattoria collettiva di Myak. Edificarono una casa con una struttura in legno usando come isolante la paglia.

Come si percepisce dagli esempi segnalati le costruzioni in balle di paglia sono in aumento. Numerosi siti web, libri, articoli di riviste, officine e incontri internazionali cominciarono a divulgarsi in tutto il mondo. In Europa esiste l'associazione "European Straw Bale Network", che fu fondata nel 1998 e che si riunisce ogni due anni in differenti luoghi d'Europa, per condividere esperienze e realizzare collettivamente alcuni edifici.



Attualmente esistono case di paglia in diversi paesi: Australia, Stati Uniti, Inghilterra, Svezia, Russia, Messico, America, India, Africa e Cina e la maggior parte di queste case hanno ricevuto premi, licenze e tutta la documentazione legale necessaria per essere costruite a norma nei Paesi.

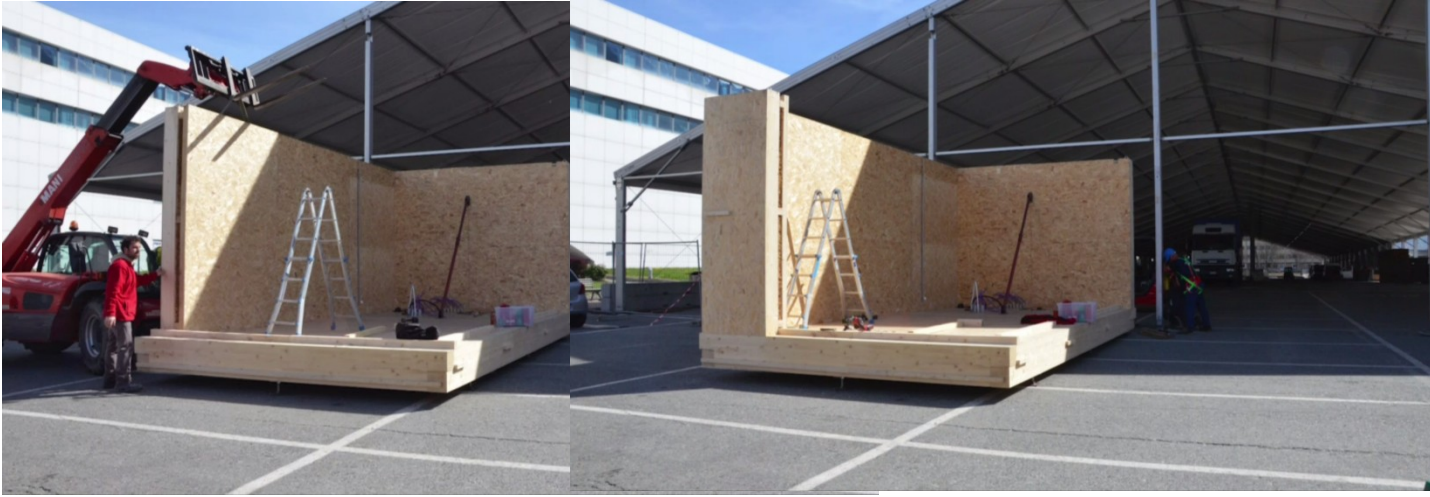


Nel 2014 i fondatori di Maisonéco, in collaborazione con Abito Paglia, hanno costruito un modulo abitativo di circa venti metri quadrati, progettato in legno e paglia. Esso è stato presentato alla fiera “Maison et loisir”, per far conoscere al pubblico questa tipologia di costruzione, divulgando principi di sostenibilità ambientale e promuovendo l’utilizzo della paglia come materiale isolante. Per unire ecosostenibilità a versatilità è stato sviluppato un sistema a moduli, così da garantire tempi molto rapidi di costruzione. Ogni modulo è una struttura portante e insieme isolante; nel dettaglio la parte portante è costituita da legno massiccio mentre la parte isolante è paglia compatta con intrecci paralleli alla parete per garantire un migliore isolamento termico.



La struttura viene assemblata su travi in legno che si incastrano perfettamente con i moduli formando una struttura molto compatta e diminuendo al massimo i ponti termici strutturali.





Oltre ai moduli di base, ve ne sono di altre tipologie che permettono di inserire infissi e porte di varie misure.

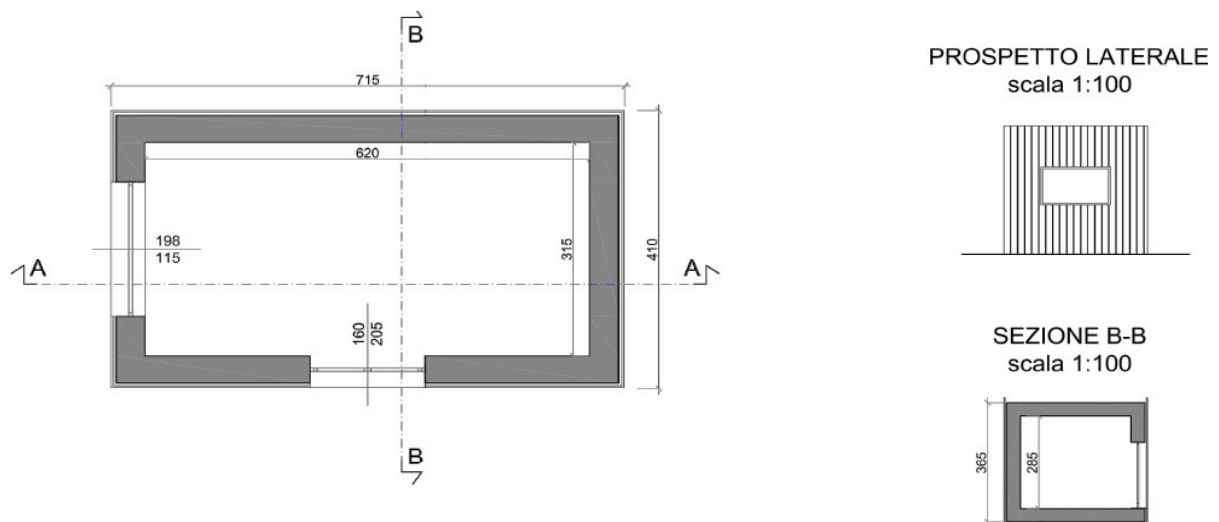


Nella fase finale è stata aggiunta una copertura in legno così da formare un'intercapedine d'aria attorno al modulo abitativo; per quanto concerne la copertura orizzontale è stato costruito un tetto piatto con ghiaia.



3.2 - Planimetria

La casa nella sua semplicità strutturale presenta la miglior configurazione per uno studio sperimentale. Il numero ridotto di superfici trasparenti riduce gli apporti solari rendendo predominante l'isolamento dovuto alla struttura di paglia. Durante le misurazioni non c'è stata nessuna occupazione e di conseguenza non sono stati effettuati ricambi d'aria.



Superfici disperdenti	esposizione	A (m2)
parete verticale opaca	sud	14,965
parete verticale opaca	nord	12,688
parete verticale opaca	ovest	26,0975
parete verticale opaca	est	22,8175
parete orizzontale opaca		29,315
superficie trasparente	nord	2,3
superficie trasparente	est	3,28
Totale superfici disperdenti		661,583
Volume lordo riscaldato [m3]		106,99975
Volume netto riscaldato		55,6605
fattore di forma		6,183033138

3.3 - Stratigrafia

In questo capitolo verranno elencati i vari componenti della struttura e le rispettive proprietà ad eccezione della paglia, che sarà oggetto di studio solo successivamente.

3.3.1 - Stratigrafia pareti verticali opache

Spostandosi virtualmente dall'esterno all'interno del muro, le componenti edili si dividono come segue:

1. Copertura in legno: l'intera abitazione è circondata da una copertura in legno con un spessore di 2 cm con una conducibilità termica pari a $0,14 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$;
2. Intercapedine d'aria semi ventilata con uno spessore di 4 cm;
3. Barriera al vapore che ha lo scopo di non far passare l'umidità nella parete interna così da non deteriorare la paglia;
4. Pannello OSB(Holzforschung) con uno spessore di 3 cm e una conducibilità termica pari a



$$0,13 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

;



5. Paglia compressa dall'azienda Maisonéco con filamenti paralleli alla parete di spessore complessivo pari a 0,37 cm ;



6. Pannello OSB(Holzforchung) con uno spessore di 3 cm e una conducibilità termica pari a $0,13 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$.

3.3.2 - Stratigrafia solette (pavimento)

Il pavimento presenta la stessa stratigrafia della parete verticale tranne che per l'assenza di una copertura in legno esterna e la presenza di una pavimentazione in legno nella parte interna.

Immaginando di procedere, come sopra, dal pavimento verso il basso otteniamo i seguenti strati:

1. Pavimento in legno ;
2. Pannello OSB (stessa tipologia di pannello descritta sopra);
3. Paglia con le stesse caratteristiche in tutta la struttura;
4. Pannello OSB (stessa tipologia di pannello descritta sopra);
5. Barriera al vapore;
6. Intercapedine d'aria: l'edificio risulta rialzato dal pavimento e l'intercapedine risulta chiusa dalle assi esterne della parete verticale.

3.3.3 - Stratigrafia soffitto

Anche il soffitto risulta strutturalmente molto simile alle altre pareti.

Se partiamo dall'interno verso l'alto osserveremo i seguenti componenti:

1. Lamina di compensato aggiunta per l'installazione delle luci;
2. Intercapedine d'aria con spessore di 2 cm;
3. Pannello OSB (stessa tipologia di pannello descritta sopra);
4. Paglia con le stesse caratteristiche in tutta la struttura;
5. Pannello OSB (stessa tipologia di pannello descritta sopra);
6. Barriera al vapore;
7. Intercapedine d'aria tra la struttura e un tetto che risulta rialzato di 20 cm;
8. Copertura con ghiaia.

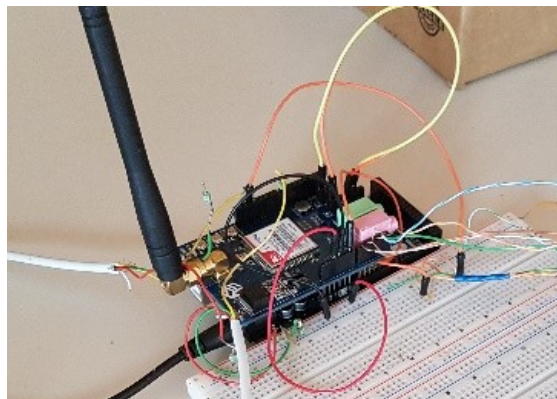
4 – STUDIO E MONITORAGGIO DELL'ABITAZIONE

Per affrontare questo studio in maniera più accurata possibile sono stati utilizzati più strumenti, tra cui un sistema di domotica installato per un monitoraggio completo dell'abitazione e un sistema di misurazione.

4.1 - Sistema di monitoraggio dell'abitazione

L'Istituto ISTP di Verres ha sviluppato un sistema di monitoraggio della casa che si avvale della piattaforma Arduino. Questo ha avuto più fasi di sviluppo nelle quali sono state implementate, in base alle esigenze di studio, più sensori.

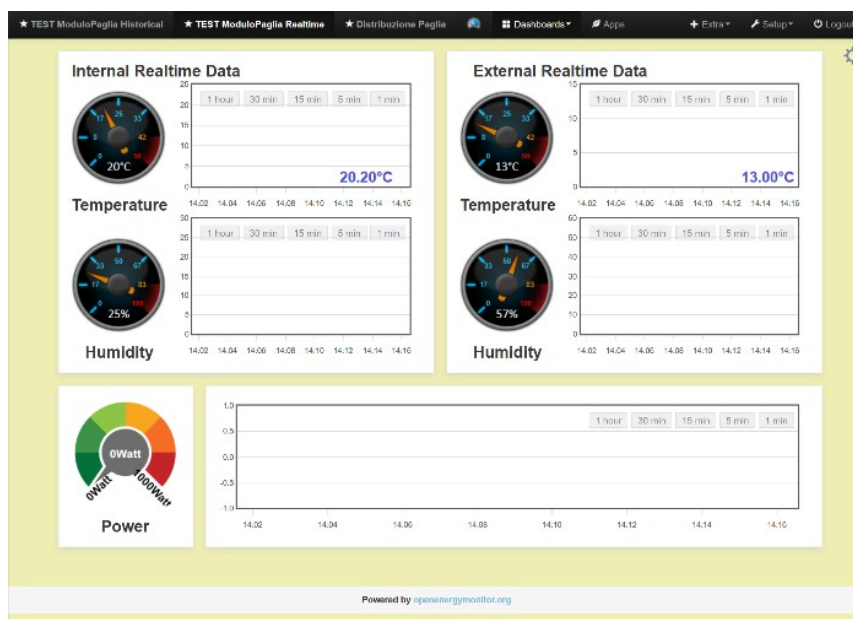
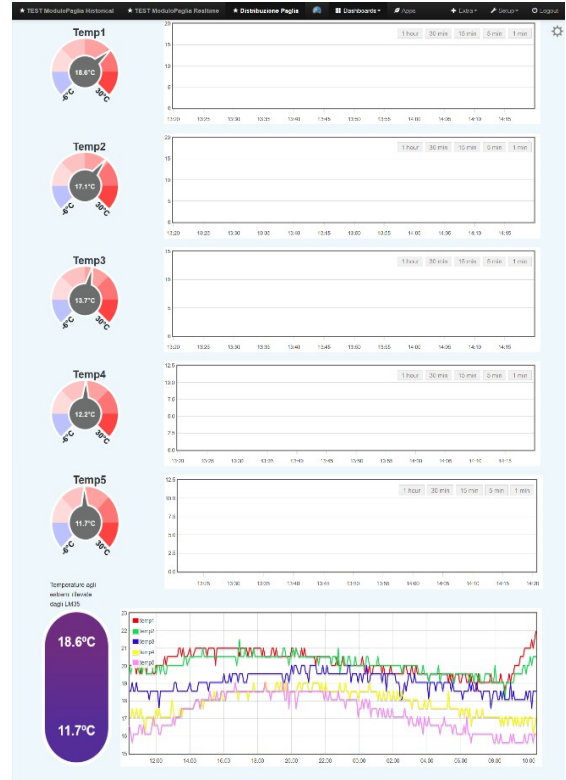
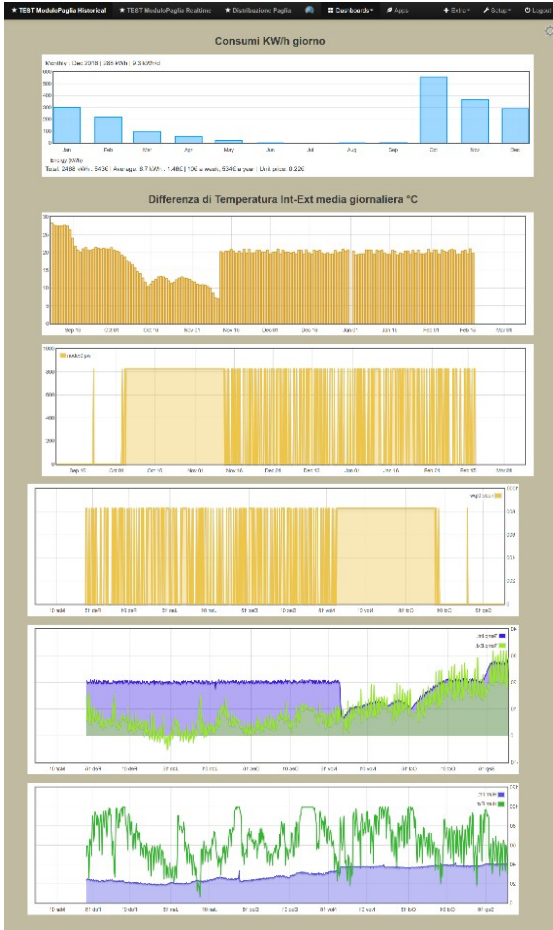
La prima versione del sistema presenta 2 sensori di misura che monitorano la temperatura e l'umidità dell'ambiente interno ed esterno. Nel caso della parete interna il sensore è stato fissato a 1.5 m di altezza dal terreno e posizionato ad una distanza ottimale dai ponti termici.



Per immagazzinare tutti i dati, Arduino trasmette tutte le informazioni alla piattaforma Emoncms; in questo modo oltre ad immagazzinare i dati è possibile rielaborare le informazioni per ottenere un riscontro diretto della loro correttezza.

Con questa prima fase è possibile controllare e studiare le condizioni interne ed esterne del sistema. In una seconda fase è aggiunto un impianto di riscaldamento controllato interamente da Arduino, programmato per mantenere una temperatura interna all'abitazione costante di circa 20 gradi. Ogni accensione e spegnimento del sistema di riscaldamento viene trasmesso alla base di dati. Sono stati utilizzati inoltre 5 sensori di temperatura posizionati sopra un'asta che attraversa da un lato all'altro la paglia per studiare la distribuzione delle temperature all'interno della paglia.





Layout della piattaforma Emoncms nella quale si possono leggere in tempo reale i valori dei sensori.

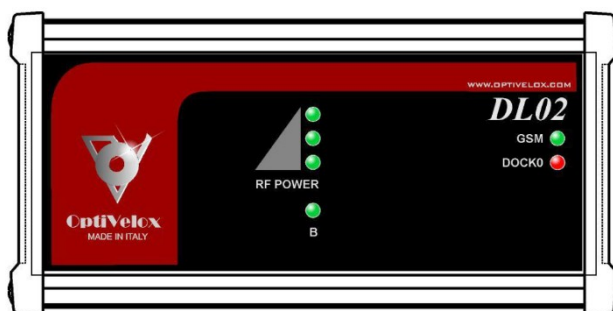
4.2 - Strumentazioni di misurazione

L'Istituto Tecnico di Verres ha reso disponibili strumenti sofisticati e certificati la cui complessità di utilizzo ha richiesto gli interventi di tecnici dalla COA.

Flussimetro

Con questo strumento è possibile ottenere una stima della conducibilità termica della paglia. Sono presenti 5 sensori, 4 che misurano solamente la temperatura e uno che misura sia il flusso termico che la temperatura. Avvalendosi di periferiche wireless è possibile posizionare due sonde sulla parete esterna e le rimanenti sulla parte interna. Con questa configurazione si riesce ad effettuare una media delle temperature per ottenere in uscita dal flussimetro una misura più precisa.

Dati tecnici Optivelox DL02



Sensore Temperatura	
Range operativo	-50 125 °C
Accuratezza	$\pm (0,10 + 0,0017 t)$ °C

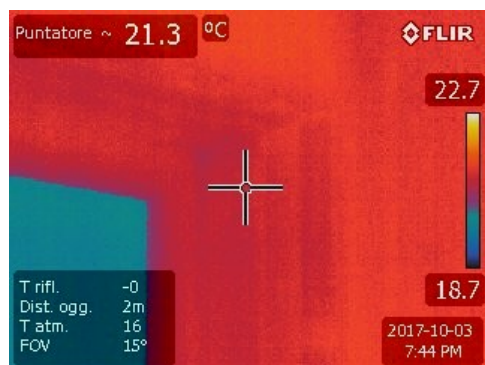
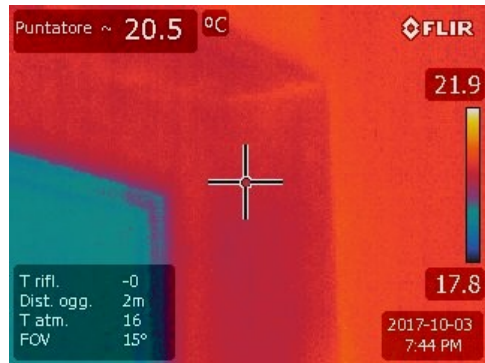
Sensore Flusso	
Range operativo	-300...300 W/m ²
Accuratezza	$\pm 5\%$

Termocamera

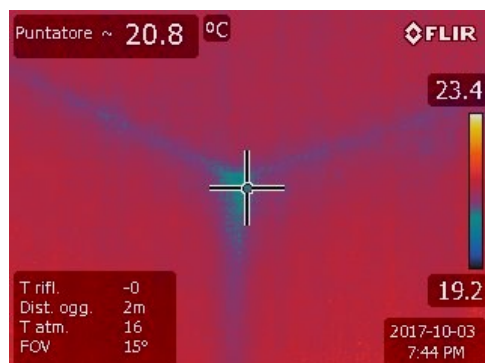
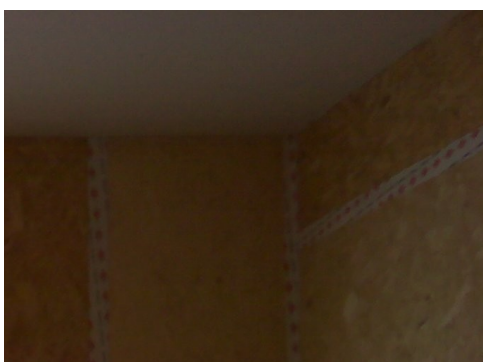
La termocamera localizza i ponti termici della struttura utilizzando immagini ad infrarossi per posizionare in maniera ottimale i sensori del flussimetro.

Dalle immagini si può osservare che la struttura è assemblata con una particolare attenzione; infatti tra i vari blocchi che la costituiscono non vi sono quasi differenze termiche rilevanti. Un'altra particolare accuratezza costruttiva si osserva nelle giunzioni tra infissi e pareti poiché è presente uno stato isolante aggiunto per compensare la discontinuità strutturale così critica e per diminuire al massimo i ponti termici.

La struttura risulta essere poco influenzata dai ponti termici e questo permette di effettuare lo studio di questa particolare abitazione in maniera più accurata.



FLIR E50bx	
Qualità immagine	240x180 pixels
Sensibilità termica	0.045 °C



Blower Door System

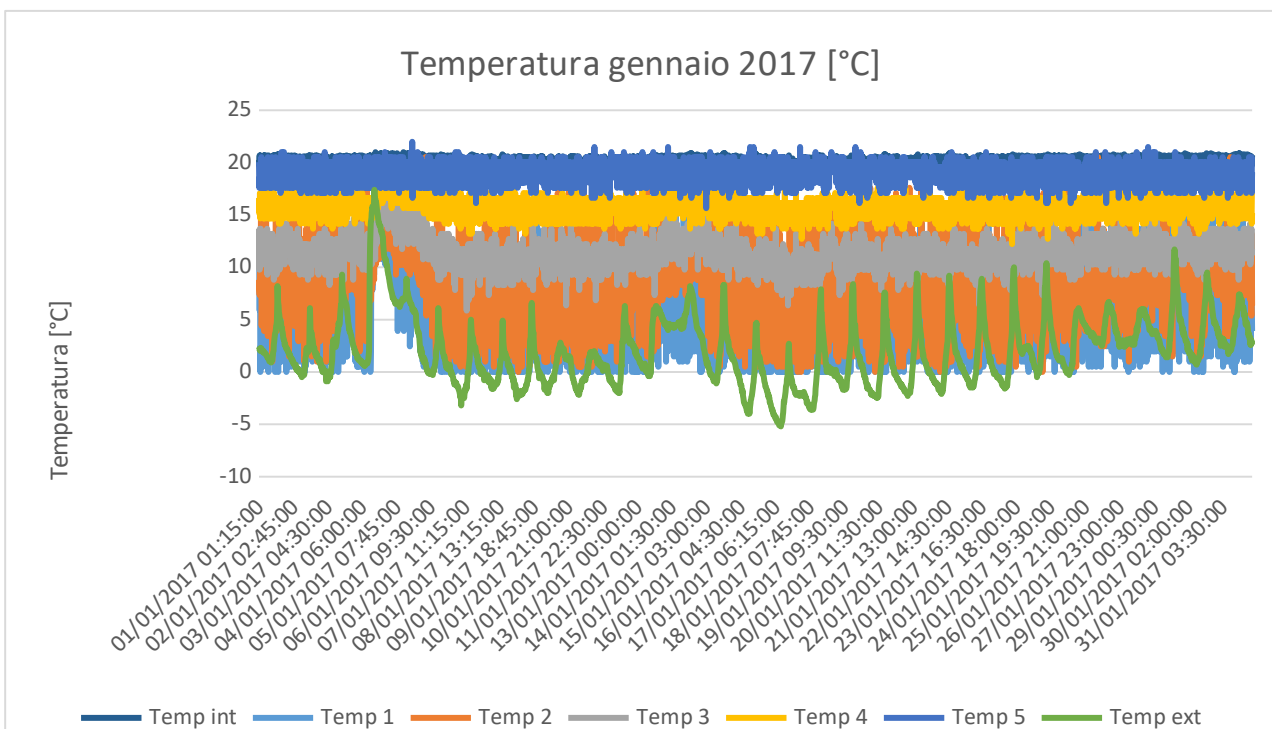
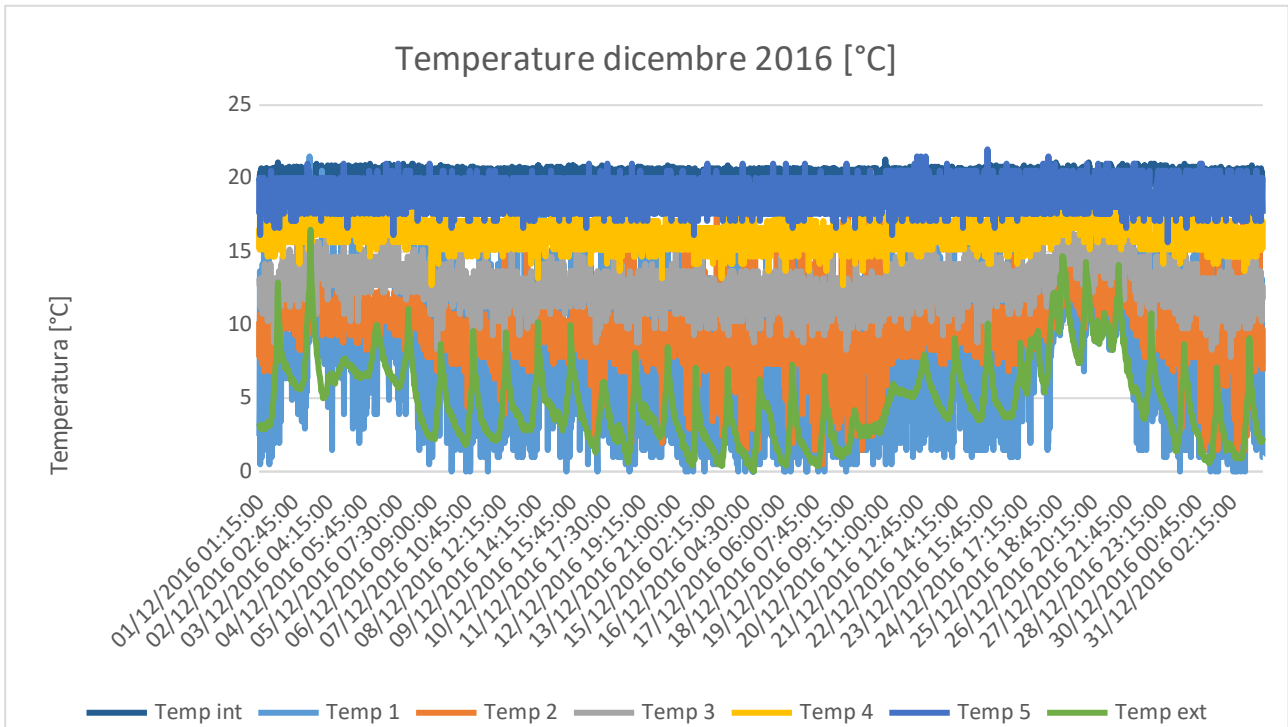
Lo studio prevede l'utilizzo di un sistema airflow utilizzato per misurare la permeabilità dell'abitazione in condizioni normali e in condizioni di venti molto forti. Con la prima misurazione si ottiene il valore dei ricambi d'aria della struttura, con la seconda si verifica la coesione dei blocchi in condizioni di criticità esterne.

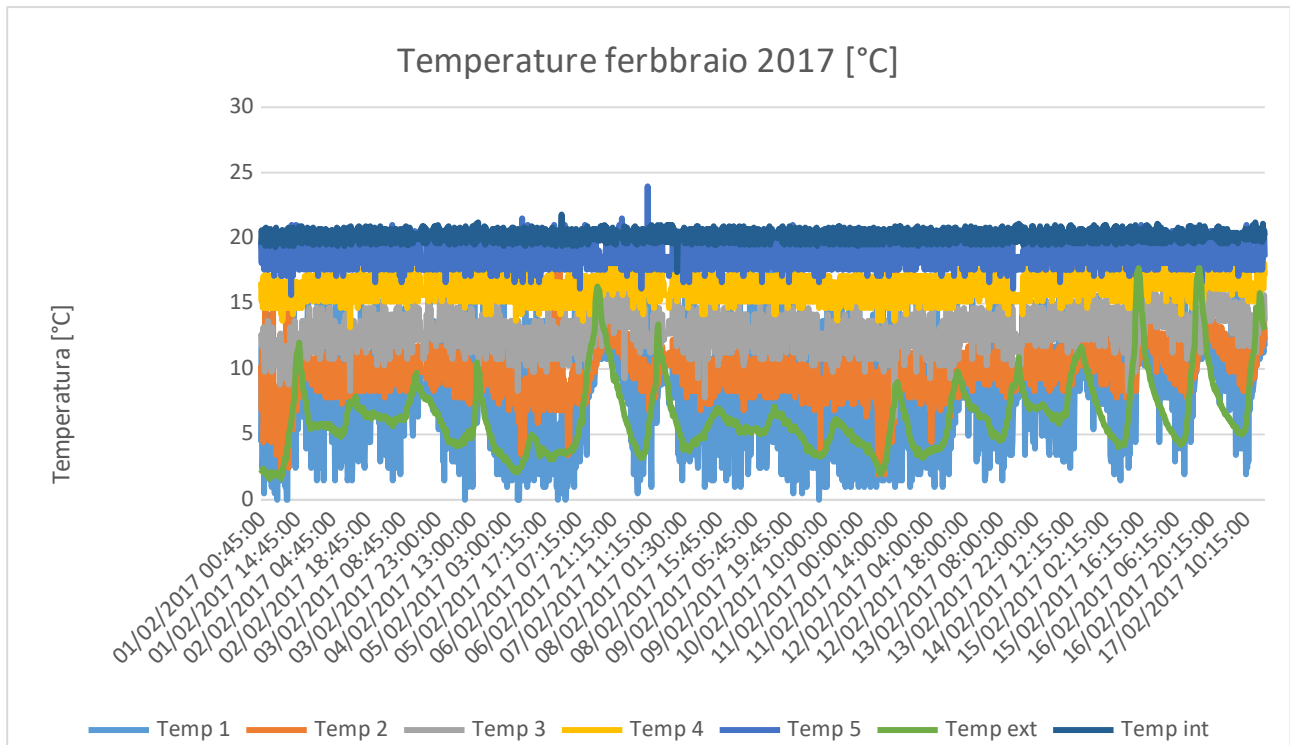


5 - DATI E GRAFICI

5.1 - Profilo parete

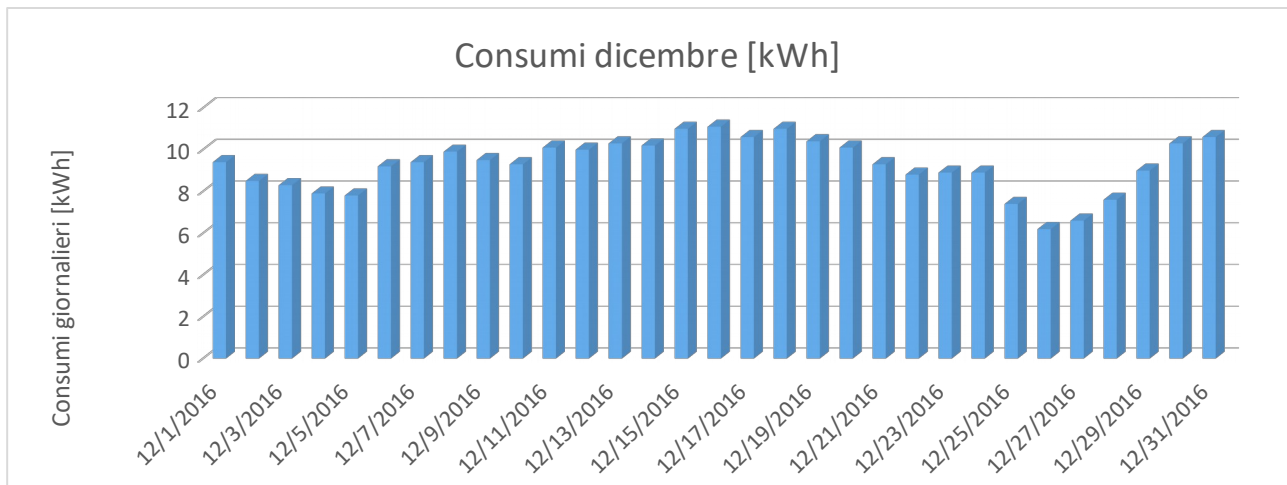
Come descritto nei capitoli precedenti la parete è stata monitorata in 7 punti differenti ottenendo le misure che hanno permesso di rappresentare le temperature della stratigrafia nelle varie fasi del giorno.



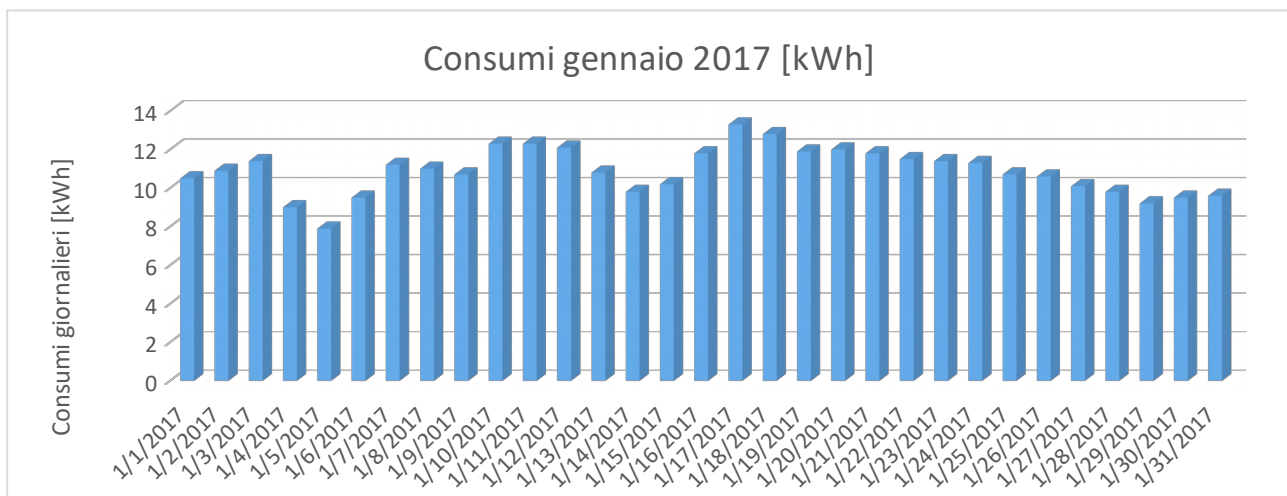


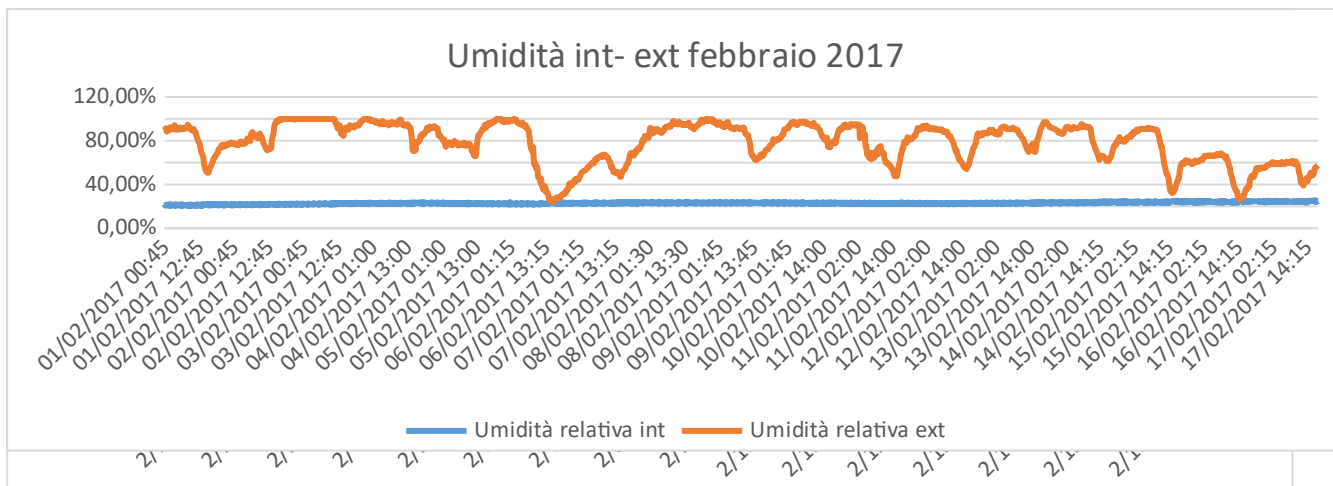
Come si può osservare dal grafico la temperatura interna "Temp int" dell'ambiente viene sempre mantenuta costante tra 19.5 e 21 °C . La temperatura rilevata dai 5 sensori (Temp 1, Temp 2, ecc.) è funzione dello spessore del blocco di paglia mentre la temperatura esterna "Temp ext" presenta un andamento più dinamico e più variabile.

5.2 - Energia consumata

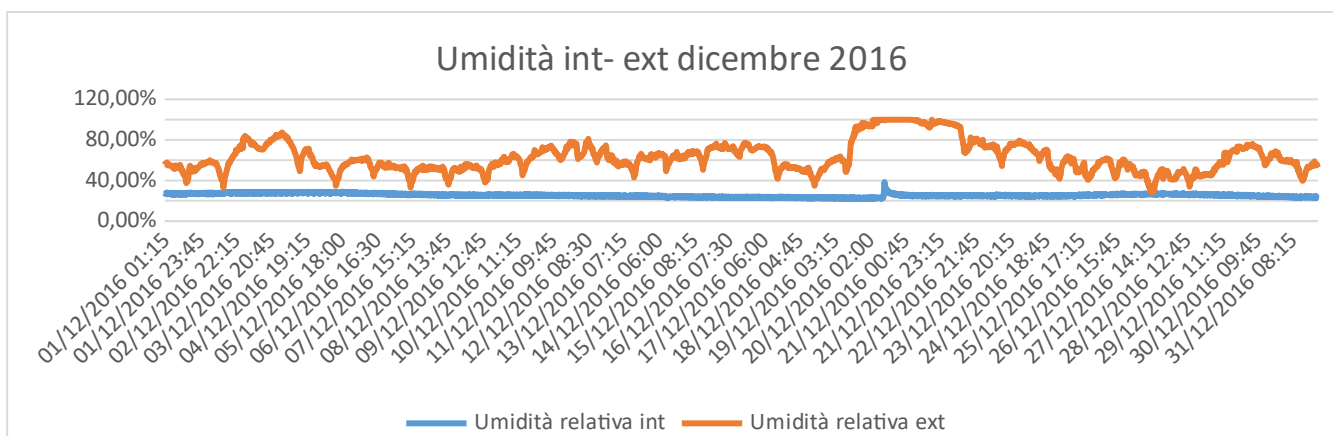


Per mantenere l'ambiente ad una temperatura di 20 gradi Arduino controlla una stufa da 829 Watt che si accende e si spegne in base alle necessità. Il sistema di controllo non opera solamente localmente ma manda in tempo reale alla base di dati le accensioni e gli spegnimenti registrati. Aggiungendo un contatore alla stufa è possibile verificare se i consumi reali della stufa elettrica corrispondano a quelli registrati nella base di dati.



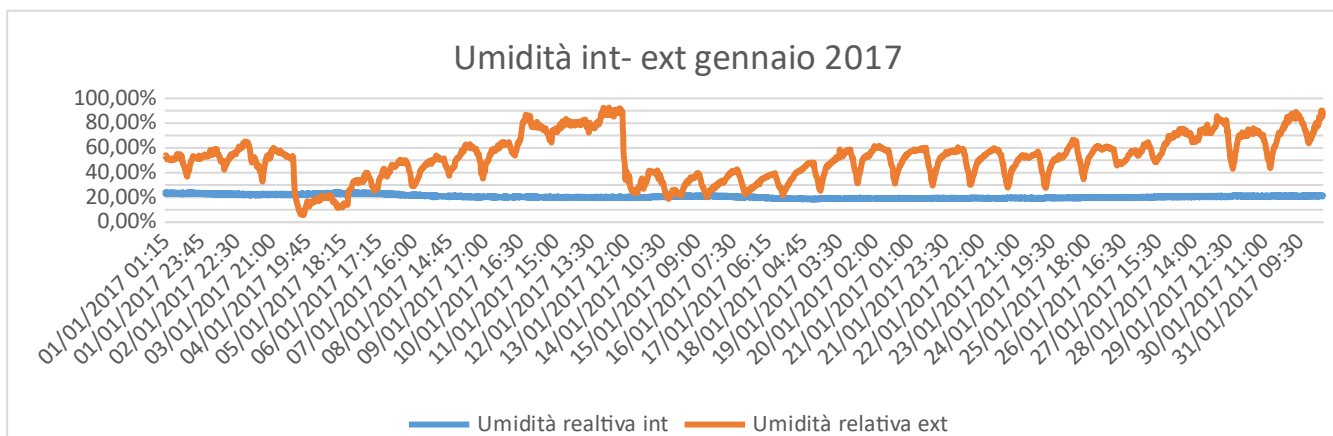


5.3 - Umidità



La paglia è un materiale molto duraturo la cui integrità può essere compromessa dall'umidità. Per fronteggiare questa problematica è predisposta una barriera al vapore affiancata da una struttura a strati che permette di mantenere il materiale il più isolato possibile.

Per verificare l'efficacia dell'isolamento sono utilizzati 2 sensori di umidità uno all'interno e uno all'esterno della struttura che non osservano fenomeni di condensa all'interno dell'abitazione.



6 - CALCOLO CONDUCIBILITA' TERMICA DELLA PAGLIA

Per calcolare la conducibilità termica della paglia sono monitorati i seguenti dati: temperatura interna, esterna e potenza sviluppata.

Le misurazioni sono effettuate in orari notturni in modo da garantire i seguenti vantaggi nel metodo di calcolo:

- maggiore accuratezza del sensore di temperatura esterno che, essendo su una parete al sole, negli orari diurni viene influenzato dalla radiazione solare segnando un valore maggiore di quello superficiale;
- semplificazione dell'equilibrio termico dell'abitazione potendo escludere gli apporti solari;
- maggiore differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno.

6.1 - Calcolo della conducibilità termica tramite il sistema di monitoraggio

Se le condizioni termiche alle quali è sottoposta la parete fossero di regime stazionario, C ed U potrebbero essere ricavati per via sperimentale semplicemente attraverso la misura istantanea del flusso specifico e delle temperature interna ed esterna.

Questa procedura è relativamente semplice da riprodurre in laboratorio ma gli edifici in condizioni operative reali sono soggetti a condizioni al contorno fortemente variabili nel tempo.

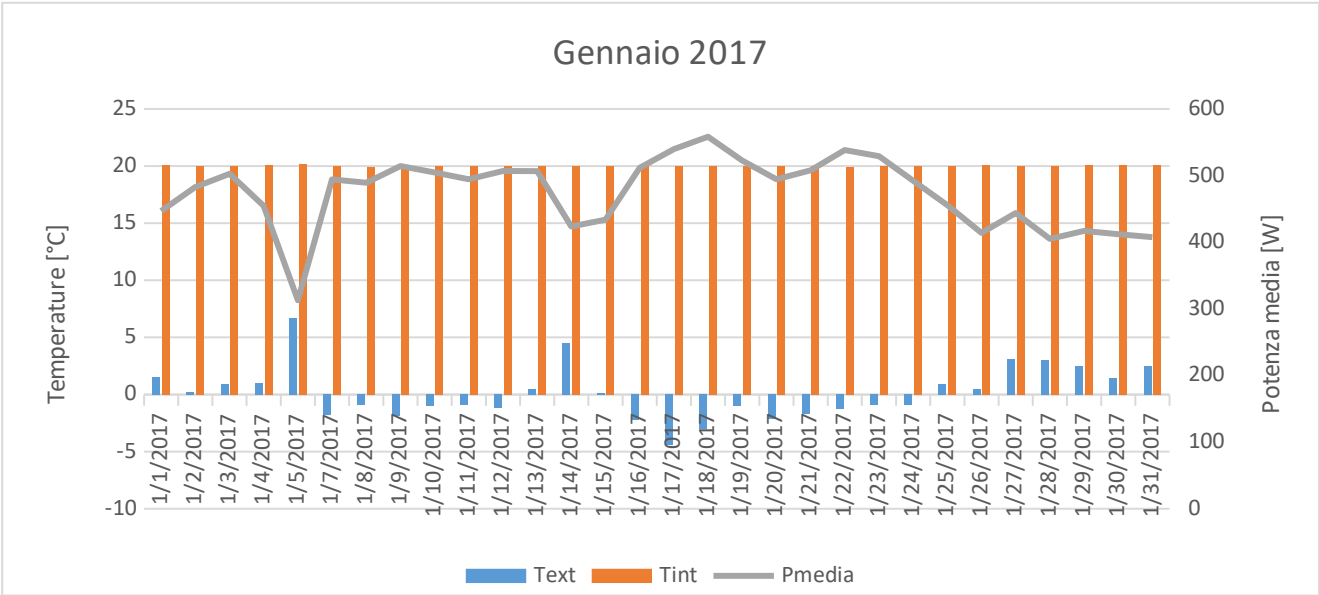
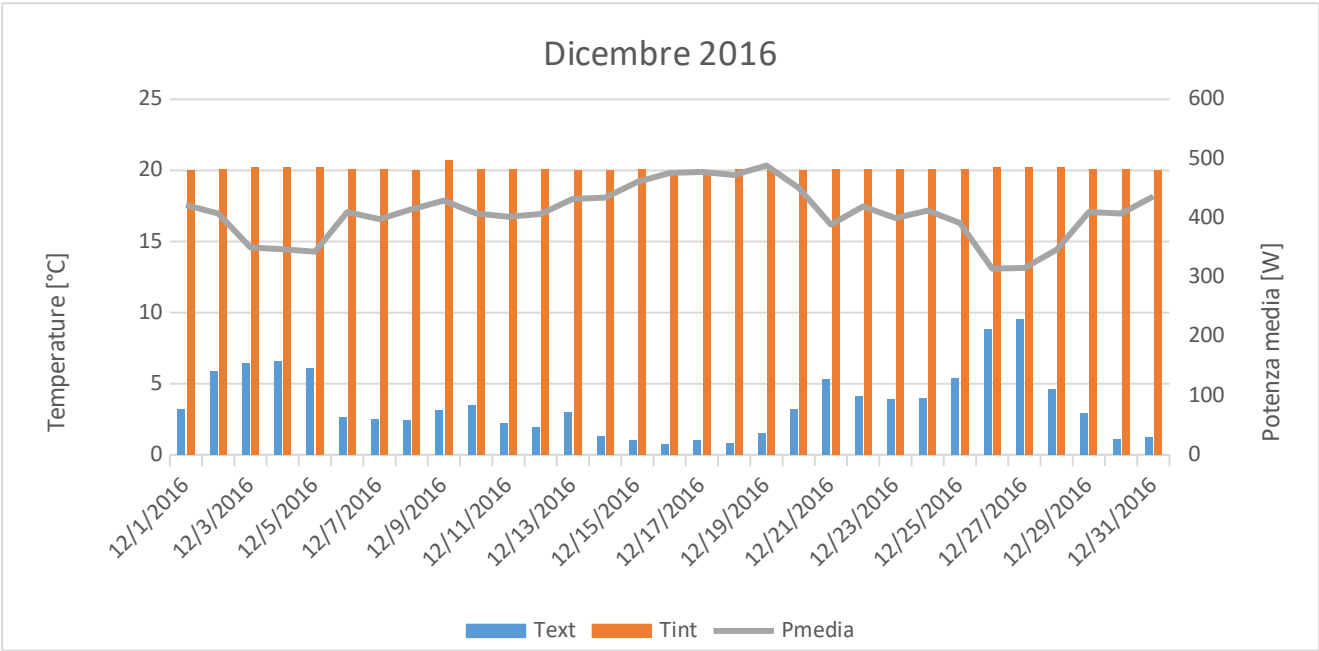
Il primo passo per conoscere le proprietà della paglia è calcolare il valore medio dell'isolamento della struttura. Utilizzando la seguente formula nella sua forma inversa, dal flusso termico specifico e dalla differenza di temperatura possiamo ottenere la conducibilità termica.

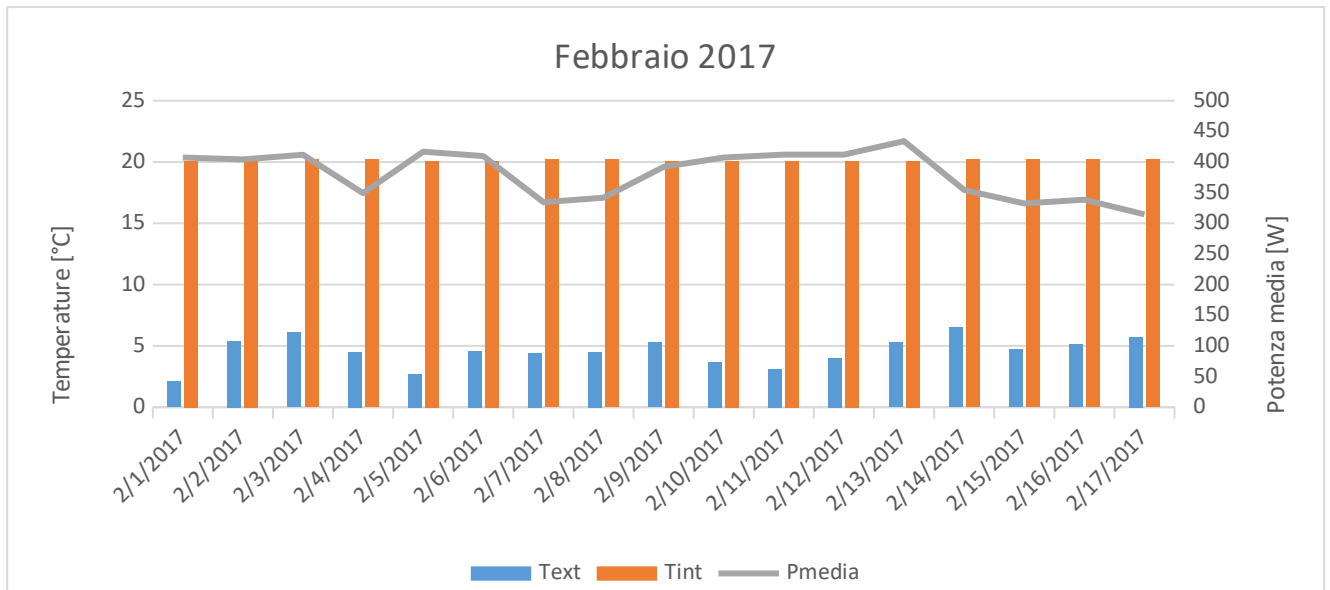
$$\dot{Q} = U \cdot (T_i - T_e)$$

Dove:

- U è la trasmittanza media della struttura $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$
- T_i e T_e sono rispettivamente la temperatura interna ed esterna $[K]$
- S la superficie interna della struttura $[m^2]$

$$U = \frac{\sum \dot{Q}}{\sum (T_i - T_e)}$$





Dicembre 2016				
	Text	Tint	Pmedia	U
01/12/2016	3,2	20	421,4	0,27
02/12/2016	5,9	20,1	407,3	0,31
03/12/2016	6,4	20,2	350	0,27
04/12/2016	6,6	20,2	347	0,28
05/12/2016	6,1	20,2	342,7	0,26
06/12/2016	2,6	20,1	409,7	0,25
07/12/2016	2,5	20,1	397,7	0,24
08/12/2016	2,4	20	414,5	0,26
09/12/2016	3,1	20,7	429	0,26
10/12/2016	3,5	20,1	407,1	0,27
11/12/2016	2,2	20,1	401,9	0,24
12/12/2016	1,9	20,1	406,7	0,24
13/12/2016	3	20	431,9	0,28
14/12/2016	1,3	20	434	0,25
15/12/2016	1	20,1	460,6	0,26
16/12/2016	0,7	20	475,8	0,27
17/12/2016	1	20	477,5	0,27
18/12/2016	0,8	20,1	472,3	0,26
19/12/2016	1,5	20	488,2	0,29
20/12/2016	3,2	20	450,4	0,29
21/12/2016	5,3	20,1	388,4	0,28
22/12/2016	4,1	20,1	419,2	0,28
23/12/2016	3,9	20,1	399,7	0,27
24/12/2016	4	20,1	412,1	0,28
25/12/2016	5,4	20,1	391,2	0,29
26/12/2016	8,8	20,2	314,1	0,30
27/12/2016	9,5	20,2	315,3	0,32
28/12/2016	4,6	20,2	346,2	0,24
29/12/2016	2,9	20,1	409,7	0,26
30/12/2016	1,1	20,1	407,3	0,23
31/12/2016	1,2	20	436,1	0,25

Gennaio 2017				
	Text	Tint	Pmedia	U
01/01/2017	1,5	20,1	446,8	0,26
02/01/2017	0,2	20	482,8	0,26
03/01/2017	0,9	20	502,6	0,28
04/01/2017	1	20,1	454,5	0,26
05/01/2017	6,7	20,2	312,9	0,25
06/01/2017	-	-	-	-
07/01/2017	-1,8	20	494,2	0,25
08/01/2017	-0,9	19,9	489,3	0,25
09/01/2017	-1,9	20	514,3	0,25
10/01/2017	-1	20	504,6	0,26
11/01/2017	-0,9	20	494,3	0,26
12/01/2017	-1,2	20	506,9	0,26
13/01/2017	0,5	20	506,6	0,28
14/01/2017	4,5	20	423,5	0,30
15/01/2017	0,1	20	433,8	0,24
16/01/2017	-2,2	20	511,7	0,25
17/01/2017	-4,4	20	539,7	0,24
18/01/2017	-3	20	558,3	0,26
19/01/2017	-1	20	522,5	0,27
20/01/2017	-2,1	20	494,3	0,24
21/01/2017	-1,7	20	507,8	0,25
22/01/2017	-1,3	19,9	538,3	0,27
23/01/2017	-0,9	20	528,9	0,27
24/01/2017	-0,9	20	492,2	0,25
25/01/2017	0,9	20	455,6	0,26
26/01/2017	0,5	20,1	413,9	0,23
27/01/2017	3,1	20	443,8	0,28
28/01/2017	3	20	405	0,26
29/01/2017	2,5	20,1	416,9	0,26
30/01/2017	1,4	20,1	412	0,24
31/01/2017	2,5	20,1	407,5	0,25

Febbraio 2017				
	Text	Tint	Pmedia	U
01/02/2017	2,1	20,1	407,4	0,25
02/02/2017	5,4	20,1	404,4	0,30
03/02/2017	6,1	20,2	412	0,32

04/02/2017	4,5	20,2	349,3	0,24
05/02/2017	2,7	20,1	416,9	0,26
06/02/2017	4,6	20,1	409,8	0,29
07/02/2017	4,4	20,2	334,6	0,23
08/02/2017	4,5	20,2	341,9	0,24
09/02/2017	5,3	20,1	392,2	0,29
10/02/2017	3,7	20,1	407,3	0,27
11/02/2017	3,1	20,1	412,2	0,26
12/02/2017	4	20,1	412,2	0,28
13/02/2017	5,3	20,1	434,2	0,32
14/02/2017	6,5	20,2	354,6	0,28
15/02/2017	4,7	20,2	332,6	0,23
16/02/2017	5,1	20,2	338,7	0,24
17/02/2017	5,7	20,2	314,6	0,23

Per calcolare il valore di U è stata utilizzata la media mobile semplice dalla quale si è ottenuto come

valore medio $U = 0.26 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$.

Attraverso il valore medio della trasmittanza e conoscendo le proprietà termiche di tutti i materiali si possono calcolare le proprietà della paglia.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e}}$$

Dove:

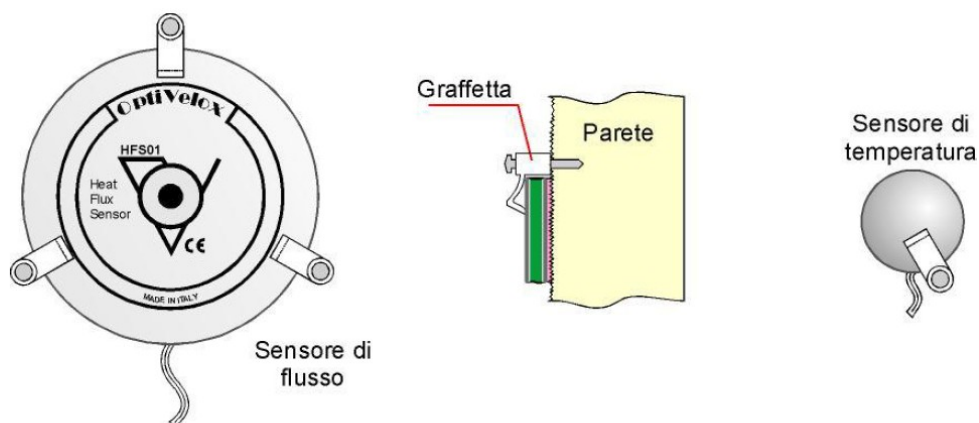
- h_i = coefficiente di scambio termico liminare interno espresso in $\left[\frac{W}{m^2 \cdot C} \right]$
- h_e = coefficiente di scambio termico liminare esterno espresso in $\left[\frac{W}{m^2 \cdot C} \right]$
- s_i è lo spessore i-esimo in $[m]$
- λ è il coefficiente di conducibilità termica $\left[\frac{W}{m \cdot k} \right]$

Attraverso questo metodo si è ottenuto che il valore di conducibilità termica della paglia vale:

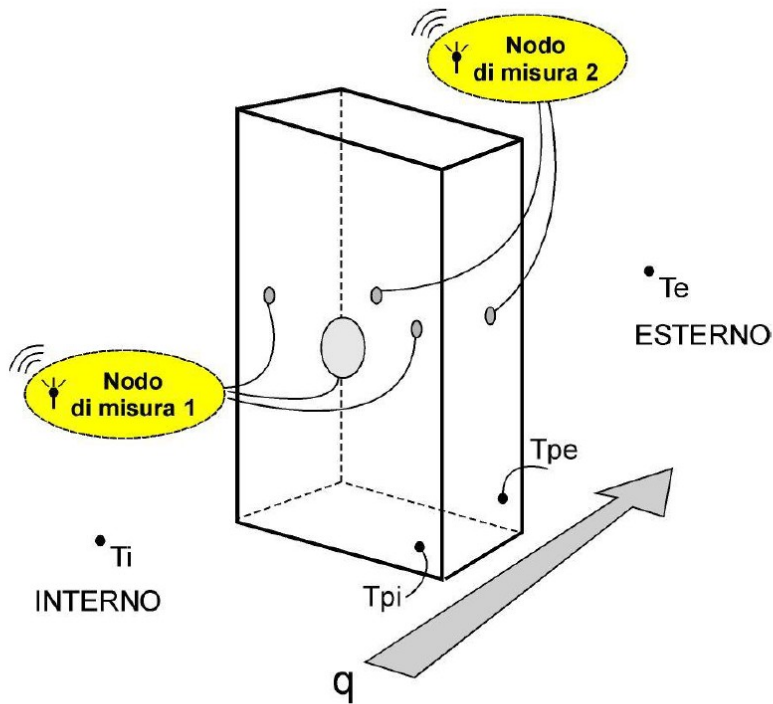
$$\lambda = 0.08 \left[\frac{W}{m \cdot k} \right]$$

6.2 - Calcolo della conducibilità termica tramite il flussimetro

L'isolamento dell'abitazione è misurato anche attraverso il flussimetro. Queste seconde misurazioni sono effettuate in periodo estivo, pertanto non è possibile confrontarle direttamente con quelle delle sonde. La configurazione dei sensori consiste in un sensore di flusso posizionato sulla superficie interna della parete e da due sensori di temperatura posizionati sia sulla superficie interna che sulla superficie esterna. L'uso di più sensori di temperatura permette di mediare i valori, diminuendo l'errore in caso di costruzioni non sufficientemente omogenee.



Nella figura seguente è schematizzata la configurazione di installazione usata:



I simboli mostrati hanno il seguente significato:

$$q = \frac{dQ}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \text{Flusso termico specifico (flusso riferito all'unità di superficie)}$$

$$\Lambda = \frac{q}{T_{pi} - T_{pe}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \text{Conduttanza termica}$$

$$U = \frac{q}{T_i - T_e} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \text{Trasmittanza termica}$$

Le procedure di misura adottate in campo prevedono un'opportuna elaborazione di dati sperimentali in modo da gestire correttamente gli effetti transitori (accumulo e rilascio di energia) indotti nella parte dal regime termico variabile.

Ciò nella pratica si traduce nell'utilizzare al posto delle grandezze istantanee i corrispondenti valori medi, valutati ad istanti discreti (n campioni).

$$U = \frac{\int q dt}{\int (T_i - T_e)} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n (T_{i_i} - T_{i_i})}$$

E' più agevole e affidabile effettuare la rilevazione della conduttanza della parete edilizia adottando per i coefficienti di adduzione interno ed esterno i valori normati (UNI EN ISO 6946). Di conseguenza si effettua il calcolo di:

$$\Lambda = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n (T_{pi_i} - T_{pe_i})}$$

Si ricava il valore della trasmittanza dalla relazione:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

Dove:

- h_i e h_e indicano i coefficienti di adduzioni interno ed esterno

Dati ottenuti dal flussimetro:

Flux	Temp int		Temp ext				
Flusso termico (0.00 W/m2)	CH1_2: Temperatur a (0.00 °C)	CH1_3: Temperatura (0.00 °C)	CH2_1: Temperatura (0.00 °C)	CH2_2: Temperatura (0.00 °C)	Temp media Int	Temo media Ext	Trasmittanza termica parete U (W/m2K)
5,96	32,73	33,23	14,76	14,84	32,98	14,8	0,328
5,98	32,84	33,34	14,59	14,67	33,09	14,63	0,324
6,03	32,96	33,46	14,13	14,2	33,21	14,165	0,317
5,83	33,08	33,58	13,85	13,93	33,33	13,89	0,300
6,05	33,2	33,71	13,75	13,83	33,455	13,79	0,308

6,01	33,31	33,81	13,53	13,6	33,56	13,565	0,301
5,92	33,41	33,91	13,1	13,14	33,66	13,12	0,288
5,98	33,52	34	13,21	13,25	33,76	13,23	0,291

Il flussimetro è posizionato direttamente sulla barriera al vapore smontando quelle che sono le assi che ricoprono l'abitazione eliminando inoltre l'intercapedine d'aria per le misure.

$$\text{Valore medio } U = 0,307 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Ottenuta la trasmittanza è possibile calcolare la conducibilità termica della paglia che vale:

$$\lambda = 0,14 \left[\frac{W}{m \cdot k} \right]$$

7 - CALCOLO TRASMITTANZE

Alla luce dei due sistemi di misurazione possiamo affermare che la paglia ha un valore di conducibilità termica che vale $\lambda = 0,08 \left[\frac{W}{m \cdot k} \right]$ per temperature basse e $\lambda = 0,14 \left[\frac{W}{m \cdot k} \right]$ per temperature più elevate.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i valori delle trasmittanze delle superfici.

Parete

Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	s [m]	ρ [Kg/	c [Kj/	λ [w/	R=s/ λ [m ² K/	CF=s* ρ *c [Kj/	MF=s* ρ
--	----------	----------------	-----------	------------------	--------------------------------------	-------------------------	-----------------

		m3]	(KgK]	mK]	W]	(m2K)]	[kg/m2]
aria interna					0,13		
pannello OSB	0,03	650	1,7	0,12	0,25	33,15	19,5
paglia	0,37	340	1,9	0,08	4,73	239,02	125,8
pannello OSB	0,03	650	1,7	0,12	0,25	33,15	19,5
barriera al vapore	0,0002 2	110	1,8	0,40	0,0006	0,04356	0,0242
intercapedine d'aria ventilata	0,04	-	-	-	-	-	-
parete in legno esterno	0,02	-	-	-	-	-	-
aria esterna					0,04		
Totale					5,4016		

Pavimento

Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	s [m]	ρ [Kg/ m3]	c [Kj/ (KgK]	λ [w/mK]	R=s/λ [m2K/ W]	CF=s*ρ*c [Kj/ (m2K)]	MF=s* ρ [kg/ m2]
aria interna					0,17		
Pavimento in legno	0,02			0,14	0,14	0	
pannello OSB	0,03	650	1,7	0,12	0,25	33,15	19,5
paglia	0,37			0,08	4,70	0	0
pannello OSB	0,03	650	1,7	0,12	0,25	33,15	19,5
barriera al vapore	0,0002 2	-	-	-	-	-	-
aria esterna					0,04		
Totale					5,54856 2		

Soffitto

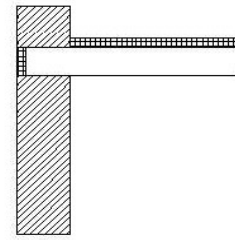
Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	s [m]	ρ [Kg/ m3]	c [Kj/ (KgK]	λ [w/mK]	R=s/λ [m2K/ W]	CF=s*ρ*c [Kj/ (m2K)]	MF=s* ρ [kg/ m2]
aria interna					0,10		
controtetto in compensato	0,02	400		0,14	0,14		
intercapedine d'aria	0,05	1,3	1	-	0,11	0,065	0,065
pannello OSB	0,03	650	1,7	0,12	0,25	33,15	19,5
paglia	0,37			0,08	4,70	0	0
pannello OSB	0,03	650	1,7	0,12	0,25	33,15	19,5
barriera al vapore	0,0002 2	110	1,8	0,4	-	0,04356	0,0242
intercapedine d'aria	0,2	1,3	1	-	0,16	0,26	0,26
pavimento in legno	0,02			0,14	0,14	0	0
ghiaia	0,04			1,2	0,03	0	0
aria esterna					0,04		
totale					5,88475 2		

Ponti Termici

I valori correttivi utilizzati nei seguenti calcoli sono tratti dalla UNI 14683.

Nodo tra parete esterna e solaio di copertura

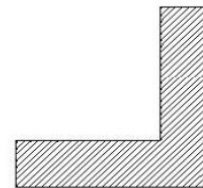
Lunghezza [m]	[w/mK]	H pt [w/k]
18,7	0,1	1,87



R12
 $L^{2D} = 1,00$
 $\Psi_e = 0,10$
 $\Psi_{oi} = 0,30$
 $\Psi_i = 0,00$

Angoli tra pareti esterne

lunghezza [m]	[w/mK]	H pt [w/k]
11,4	-0,15	-1,71



C8
 $L^{2D} = 0,00$
 $\Psi_e = 0,05$
 $\Psi_{oi} = -0,15$
 $\Psi_i = 0,15$

Nodi tra pareti esterne e serramenti di porte e finestre

lunghezza [m]	[w/mK]	H pt [w/k]
7,3	0,05	0,365



W4
 $L^{2D} = 0,41$
 $\Psi_e = 0,05$
 $\Psi_{oi} = 0,05$
 $\Psi_i = 0,05$



W10
 $L^{2D} = 0,39$
 $\Psi_e = 0,00$
 $\Psi_{oi} = 0,00$
 $\Psi_i = 0,00$

lunghezza [m]	[w/mK]	H pt [w/k]
6,26	0	0

Involucri trasparenti

I serramenti usati comprendono finestre a doppio vetro (vetrocamera) caratterizzato da uno strato di vetro semplice dello spessore di 4 millimetri seguito da una camera sotto vuoto dello spessore di 15 millimetri, e uno strato finale di vetro semplice dello stesso spessore del primo.

$$U = 1,4 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Ricambi d'aria

Non si sono effettuati ricircoli d'aria nell'abitazione per tutto il periodo del monitoraggio ma,

volendo simulare l'utilizzo di questa abitazione, ipotizziamo un ricambio d'aria pari a $0,5 \frac{Vol}{h}$ come per le abitazioni civili.

$$\dot{V}_{aria} = 0,5 \frac{Vol}{h} \cdot 55,66 m^3 = 27,83 \frac{m^3}{h} = 0,0077 \frac{m^3}{s}$$

Per il calcolo di Q_{vent} occorre anche calcolare la portata massica d'aria, passando attraverso la densità

dell'aria ($\rho_{aria} = 1,2 \frac{kg}{m^3}$), e si ottiene:

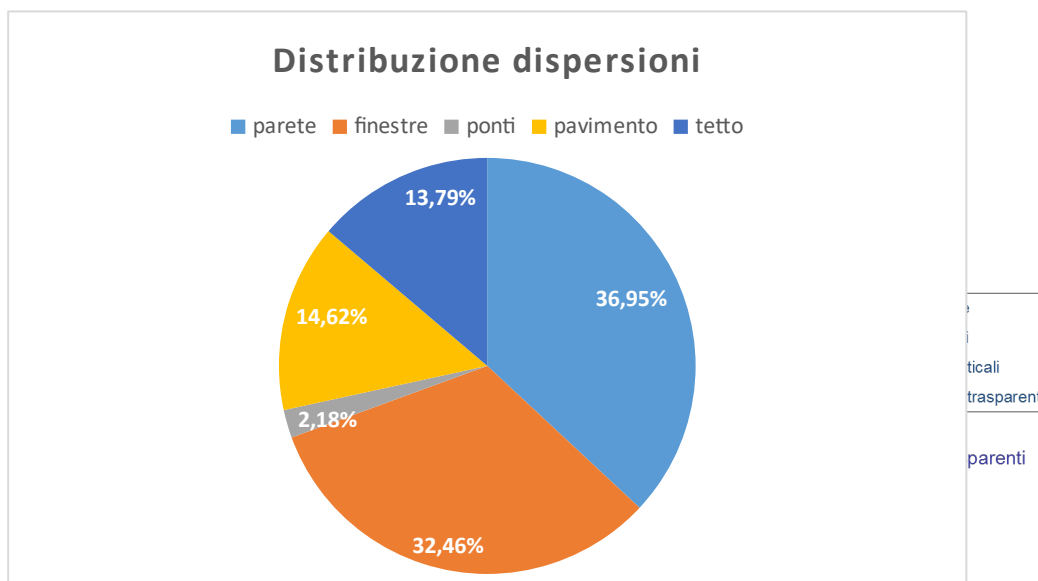
$$\dot{m}_{aria} = \dot{V}_{aria} \cdot \rho_{aria} = 0,0077 \cdot 1,2 = 0,0093$$

A questo punto:

$$H_{vent} = \dot{m}_{aria} \cdot c_{p,aria} = 0,0093 \cdot 1,005 = 0,0094 \left[\frac{W}{^\circ C} \right]$$

Tabella riassunti trasmittanze

Parete	$U \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$	Sup [m ²]	$H \left[\frac{W}{^\circ C} \right]$
Verticali	0,18635	47,715	8,892
Pavimento	0,180	19,53	3,52
Soffitto	0,198	19,53	4,07
Tramezze	-	-	0,53
Serramenti	1,4	5,58	7,812



8 – CALCOLO DEI PARAMETRI TERMICI DINAMICI

Le caratteristiche termiche di un componente in regime dinamico descrivono il suo comportamento termico quando esso è soggetto a condizioni al contorno variabili, cioè flusso termico o temperatura variabile su una o su entrambe le superfici. La norma UNI EN ISO 13786 considera solo condizioni al contorno sinusoidali.

Le proprietà considerate sono le ammettenze termiche e le proprietà termiche di trasmissione dinamica, che mettono in relazione un flusso termico variabile ciclicamente con variazioni cicliche di temperatura.

Parametro	Modulo	Sfasamento
Ammettenza termica interna (Y_{ii})	2,342 W/(m ² K)	2,63 h
Ammettenza termica esterna (Y_{ee})	2,761 W/(m ² K)	3,24 h
Trasmittanza termica periodica (Y_{ie})	0,002 W/(m²K)	-1,98 h
Capacità termica areica interna (κ_i)	32,2 kJ/(m²K)	
Capacità termica areica esterna (κ_e)	38,0 kJ/(m ² K)	
Resistenza termica (R)	5,257 (m ² K)/W	
Trasmittanza termica (U)	0,190 W/(m²K)	
Fattore di attenuazione (f)	0,013	

Spessore (s)	43,0 cm	
Massa superficiale (m)	165 kg/m²	
Sfasamento (φ)	1,98 h	

Osservazione: lo sfasamento risulta maggiore di 24h che dal programma di calcolo viene interpretato come $25,98 - 24 = 1,98 h$.

Confronto tra Sfasamento calcolato e misurato

Per un'ulteriore conferma della veridicità dei valori è stata effettuata una verifica con la procedura a norma UNI EN ISO 13786 per la quale è stato sviluppato l'andamento sinusoidale della temperatura misurata sulla superficie interna ed esterna dell'abitazione. La funzione è stata calcolata attraverso la seguente equazione:

$$T(t) = T + \Delta T \cdot \cos(\omega t + \vartheta)$$

Dove:

T= temperatura media misurata dal sensore (°C)

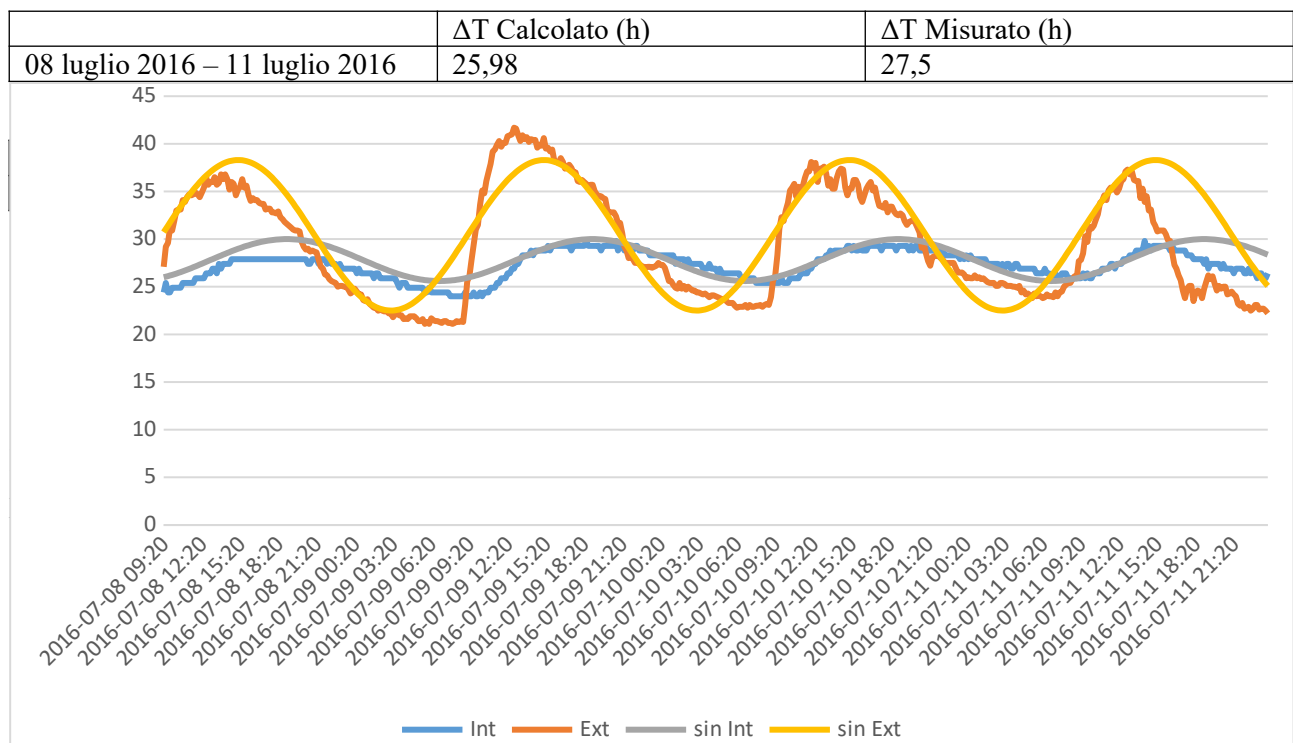
ΔT = semi-differenza tra il valore massimo e minimo misurata dal sensore (°C)

ω = frequenza angolare, in radianti $\left(\frac{2\pi}{24} \text{ considerando un periodo di 24 ore} \right)$

t = tempo in ore

ϑ = fase

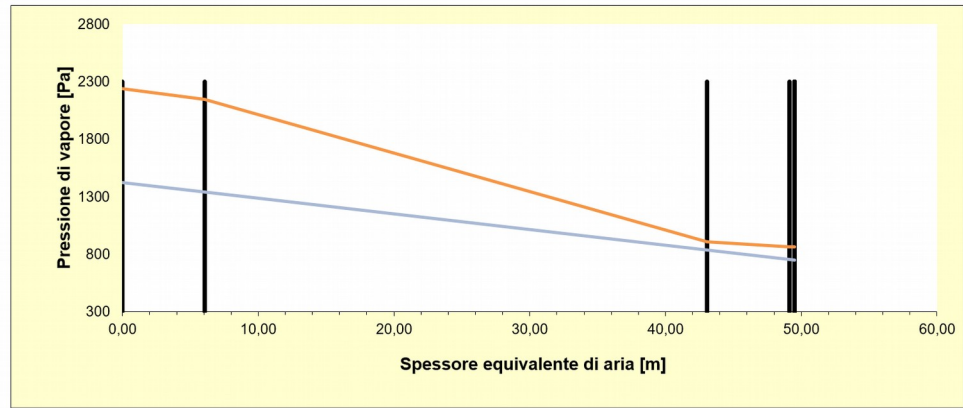
Nella figura si osservano le sinusoidi che approssimano l'andamento della temperatura superficiale interna ed esterna durante il periodo estivo. Dal grafico si può notare come lo sfasamento sia addirittura maggiore di 24 ore, cosa non del tutto positiva perché il calore accumulato dalla parete non viene rilasciato in orari più freschi ma bensì il giorno successivo sfasato di un paio d'ore rispetto alle ore più calde.



- Conducibilità termica [W/m°C] o resistenza termica [m²°C/W].

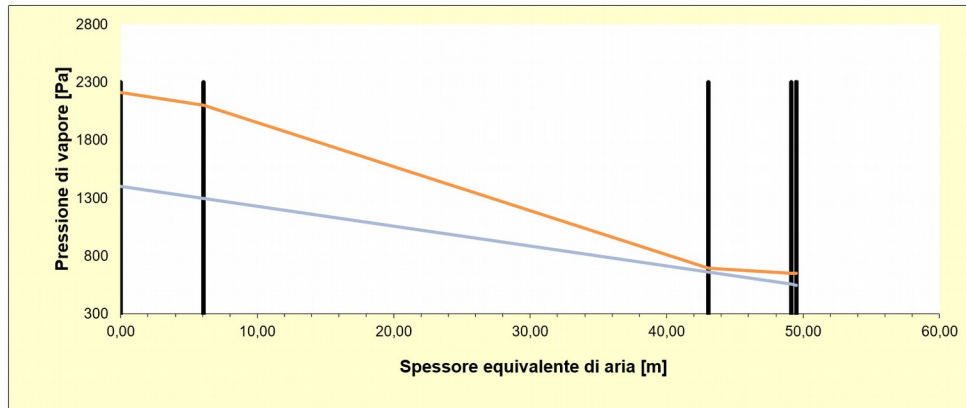
Per garantire la durabilità della struttura è necessario verificare che non si generi condensa all'interno della parete soprattutto nello strato di paglia. Nei seguenti grafici sono rappresentate le curve di pressione del vapore nei quali si può notare che in nessun caso si supera il punto di rugiada.

Mese
Novembre

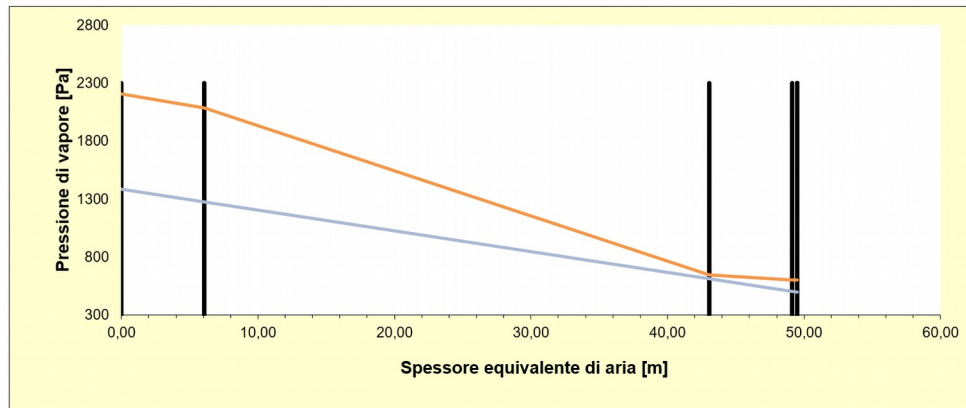


10.1 - Dati climatici

Mese
Dicembre



Mese
Gennaio



mese	durata		T _{int}	T _{ext}	H _{tr}	H _{ve}	Q _{ht}
	[gg]	[s]	[°C]	[°C]	[W/K]	[W/K]	[MJ]
ottobre	17	1468800	20	10,9	24,0672543 1	0,0094	321,81
novembre	30	2592000		5,3			917,38
dicembre	31	2678400		1,6			1186,56
gennaio	31	2678400		0,4			1263,94
febbraio	28	2419200		2,3			1030,96
marzo	31	2678400		6			902,82
aprile	15	1296000		9,9			315,15

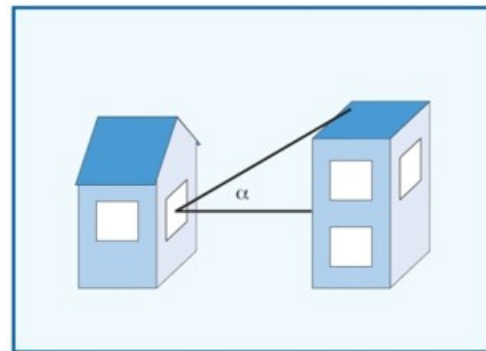
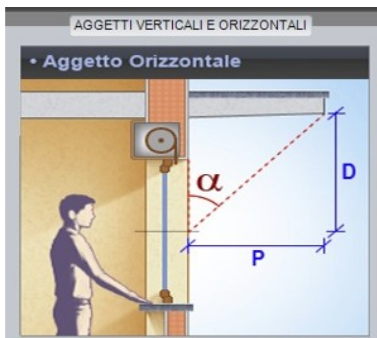
10.3 - Apporti solari

Apporti da radiazione solare attraverso le superfici trasparenti

$$\Phi_{sol,w,k} = F_{sh,ob} \cdot A_{sol,w,k} \cdot I_{sol,k}$$

Attraverso un software specifico sono stati calcolati gli apporti solari dovuti alle superfici opache e a quelle trasparenti. Il programma tiene conto:

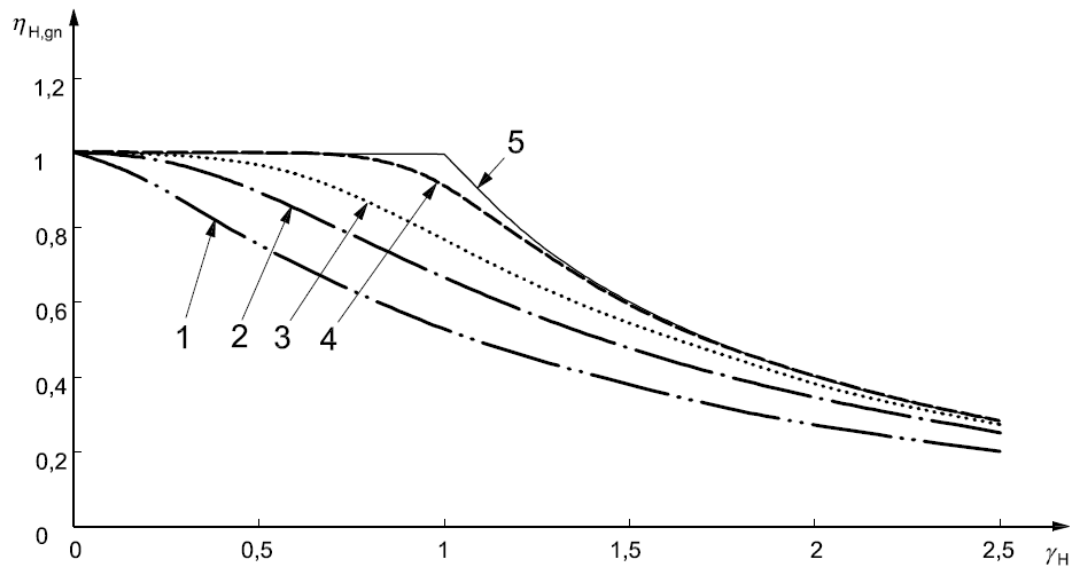
- Delle coordinate della località;
- Dell'ostruzione esterna;
- Aggetti orizzontali e verticali.



	Qsi	Qse	Totale
	[MJ]	[MJ]	[MJ]
GENNAIO	103,8	79,4	183,2
FEBBRAIO	167,0	102,6	269,6
MARZO	272,9	153,1	426,0
APRILE	366,1	182,5	548,6
MAGGIO	474,8	207,3	682,1
GIUGNO	526,5	217,9	744,4
LUGLIO	547,7	235,8	783,5
AGOSTO	439,0	203,7	642,7
SETTEMBRE	279,3	152,6	431,9
OTTOBRE	203,1	117,7	320,8
NOVEMBRE	117,8	87,2	205,0
DICEMBRE	93,8	74,9	168,7

10.4 - Consumi netti abitazione

Mese	Q_{ht} (MJ)	Q_{gn} (MJ)	γ (-)	η_{gn} (-)	Q_{need} (MJ)
Ottobre	370,45	213,3	0,66	0,98	110,643
Novembre	1056,04	205,0	0,22	1	712,378
Dicembre	1365,91	168,7	0,14	1	1017,86
Gennaio	1454,99	183,2	0,14	1	1080,74
Febbraio	1186,79	269,6	0,26	1	761,358
Marzo	1039,28	426,0	0,47	0,99	481,077
Aprile	362,79	274,3	0,87	0,98	46,3398
Tot Q_{need}					4210,4



Key

- 1 time constant of 8 h (low inertia)
- 2 time constant of 1 d
- 3 time constant of 2 d
- 4 time constant of 7 d
- 5 time constant infinite (high inertia)

Volume lordo: 107 m³

Fabbisogno di energia netta per il riscaldamento:

$$Q_{nd,tot} = 4210,4 \text{ MJ} = 1169,65 \text{ kWh}$$

Fabbisogno di energia netta specifica:

$$EPi = \frac{Q_{nd,tot}}{V_{lordo}} = \frac{1169,65}{107} = 10,9313 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right]$$

$$EPi_{invol \lim i=23} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] i$$

a) Fabbisogno energetico annuo per il riscaldamento (secondo definizione l. r. 13/07)

1° Livello

Tab. 1. Edifici residenziali della classe E1, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme (valori espressi in kWh/m²).

GG	V ≤ 500 (m ³)	V = 1000 (m ³)	V = 2000 (m ³)	V = 4000 (m ³)	V = 6000 (m ³)	V = 8000 (m ³)	V ≥ 10000 (m ³)
≤3000	70	65	60	50	45	40	35
≥5000	130	120	115	100	90	85	75

Tab. 2. Tutte le altre tipologie di edificio (valori espressi in kWh/m³)

GG	V ≤ 500 (m ³)	V = 1000 (m ³)	V = 2000 (m ³)	V = 4000 (m ³)	V = 6000 (m ³)	V = 8000 (m ³)	V ≥ 10000 (m ³)
≤3000	23	21.5	20	16.5	15	13.5	11.5
≥5000	43	40	38	33	30	28	25

2° Livello

Tab. 3. Edifici residenziali della classe E1, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme (valori espressi in kWh/m²).

GG	V ≤ 500 (m ³)	V = 1000 (m ³)	V = 2000 (m ³)	V = 4000 (m ³)	V = 6000 (m ³)	V = 8000 (m ³)	V ≥ 10000 (m ³)
≤3000	55	50	45	40	35	30	25
≥5000	110	100	90	85	80	70	65

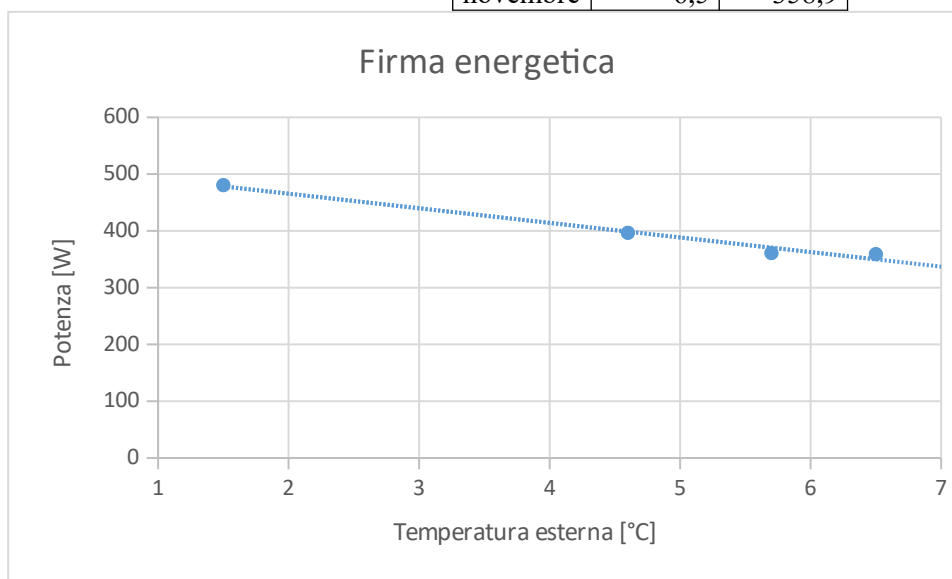
Tab. 4. Tutti le altre tipologie di edificio (valori espressi in kWh/m³)

GG	V ≤ 500 (m ³)	V = 1000 (m ³)	V = 2000 (m ³)	V = 4000 (m ³)	V = 6000 (m ³)	V = 8000 (m ³)	V ≥ 10000 (m ³)
≤3000	18	16.5	15	13.5	11.5	10	8.5
≥5000	36.5	33	30	28.5	26.5	23.5	21.5

10.5 - Firma energetica

Per completare lo studio su questa abitazione sperimentale è stata calcolata la sua firma energetica. I dati a disposizione sono limitati, ciò nonostante è stato possibile tracciare un grafico sufficientemente accurato.

	Text	Wmedio
febbraio	5,7	360,9
gennaio	1,5	480,5
dicembre	4,6	396,5
novembre	6,5	358,9



11 - CONCLUSIONI

Con lo studio effettuato si dimostra come la paglia permetta di ottenere buone prestazioni per le costruzioni in bio-edilizie sia dal punto di vista energetico sia dal punto di vista ambientale. Dal punto di vista energetico non gode delle migliori prestazioni sul mercato ma, considerando uno spessore maggiore del blocco, può raggiungere i livelli di concorrenza dei materiali artificiali. Di conseguenza la paglia sarà una valida opzione per costruire nuove abitazioni riservandole uno spazio necessario ove vi sarà possibile; non sarà una valida opzione per quanto riguarda la ristrutturazione a causa del suo ingombro.

Materiale isolante	Coefficiente di conducibilità termica $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	Spessore isolante di riferimento $[cm]$
Cotone	0,04	10

Perlite espansa	0,05	13
Argilla espansa	0,08	20
Polistirolo espanso	0,04	10
Lana di vetro	0,04	10
Schiuma di vetro	0,045	11
Poliuretano espanso	0,03	8
Paglia	0,08	20

Dal punto di vista ambientale la paglia può essere utilizzata nella bioedilizia poiché è un materiale degradabile e la sua produzione non necessita di lavorazioni industriali. Il suo riciclo potrebbe essere sfruttato dalle zone agricole per ampliare il mercato e diventare così tra i fornitori principali di questo materiale innovativo e all'avanguardia per la costruzione delle nuove abitazioni.

Dal punto di vista economico si possono fare delle considerazioni sul fatto che la vendita è a basso costo poiché la paglia rappresenta un materiale di scarto. Più nello specifico presenta dei costi che si aggirano sui 2.5 ai 3.5 euro a blocco e, considerando che per una casa di 150mq ci vogliono circa 400 blocchi, è possibile procurarsi la materia prima con 1000-1400 euro.

11 – BIBLIOGRAFIA

Simone Secchi, Caratteristiche termiche delle costruzioni, università degli studi di Firenze

Guther Gantioler, Costruire il futuro, riqualificare l'esistente, YTONG

Eros Piovesan, Costruire paglia

Freddy Astudillo, Los materiales de construcción y su aporte al mejoramiento del confort termico en viviendas perifericas de la ciudad de Loja

