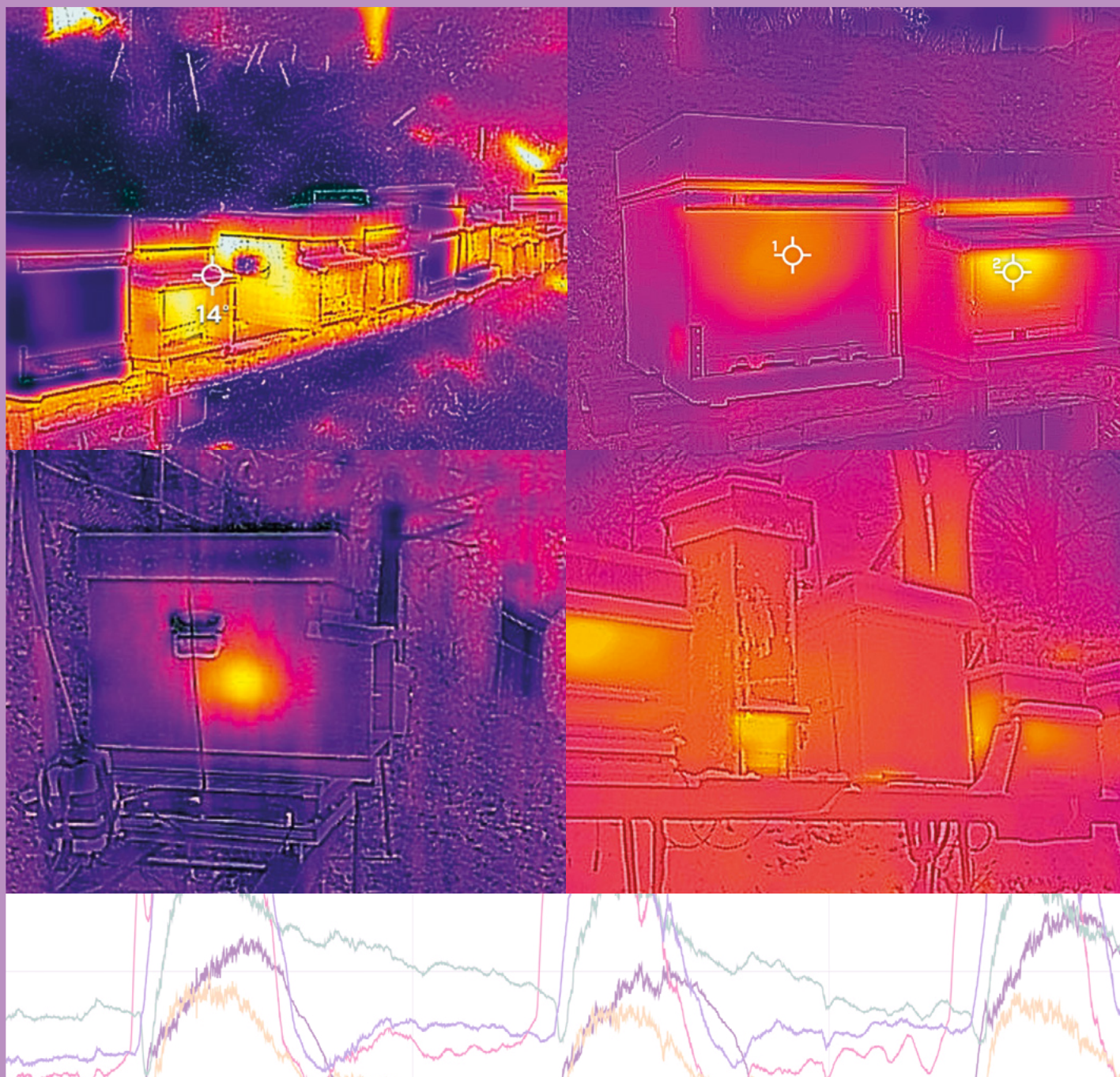


l'apis

D O S S I E R

LA COIBENTAZIONE DELL'ARNIA



S O M M A R I O

DOSSIER | LA COIBENTAZIONE DELL'ARNIA

di Daniele Besomi

Introduzione

6	Un po' di fisica della dispersione di calore
8	Il calore dall'esterno
9	Calore dall'interno
9	<i>Riscaldare dall'interno: materiali e metodo</i>
12	<i>I risultati</i>
15	<i>Discussione e rilevanza pratica</i>
16	Cosa ne pensano le api? Il comportamento della colonia durante l'inverno
16	<i>Materiali e metodo</i>
17	<i>Due colonie nel medesimo ambiente esterno</i>
23	<i>La colonia nell'arnia Warré, con e senza coibentazione</i>
24	<i>Discussione</i>
28	Conclusioni
28	<i>Conflitto di interessi</i>
29	Riferimenti bibliografici

Dossier a cura di Chiara Concari e Sara Oldani

Progetto grafico di Graziana Garbeni

Da quando Lorenzo Langstroth ha scoperto lo spazio d'api e creato l'arnia a telai mobili nel 1852, la struttura delle arnie non è cambiata gran che: **le arnie in legno in uso oggi non differiscono sostanzialmente da quelle in commercio un secolo fa**. Vi sono certo variazioni nel numero e nella dimensione dei telai, ma il materiale di costruzione è rimasto essenzialmente il medesimo, vale a dire legno morbido dello spessore di 22-25 mm.

Poiché **notoriamente questo materiale non è un buon isolante**, nei primi decenni del ventesimo secolo si raccomandava comunemente di proteggere le arnie dal vento e dal freddo ricoprendole con coperture di materiale impermeabile e isolante. **A partire dal 1940 si è cominciato a capire come le api siano in grado di regolare sia la temperatura invernale, stringendo o allargando il glomere e, quando questo non basta, producendo direttamente calore dall'interno del glomere, sia la temperatura estiva, portando dell'acqua nel nido e facendola evaporare oppure costituendo col loro corpo uno scudo protettivo per assorbire calore che poi vanno a disperdere all'aperto**. Questo ha indotto a modificare le raccomandazioni per l'invernamento: **gradualmente si è smesso di insistere sulla coibentazione esterna delle arnie, con l'eccezione delle zone più fredde del pianeta** dove queste pratiche sono sempre rimaste in vigore.

Negli ultimi anni, forse in seguito all'invenzione delle arnie in polistirene negli anni '70 ma anche grazie agli studi sui nidi naturali delle api [35]¹, **è tornato a crescere l'interesse per la coibentazione**. Sia gli apicoltori che gli studiosi sono divisi in due campi. Da una parte si hanno coloro che sostengono che la capacità delle api di regolare la temperatura, anche in condizioni estreme, rende inutile e forse anche controproducente investire nella coibentazione. **Gli apicoltori riassumono spesso con "le api non muoiono di freddo"**. L'argomento principale delle discussioni da parte di alcuni studiosi è che in inverno le api scaldano solo il glomere, non l'intera arnia, così che è irrilevante se l'arnia sia coibentata o meno mentre conta che la colonia sia sana, numerosa (tante più api ci sono, tanto più è efficiente la termoregolazione del glomere²) e abbia abbondanti scorte (scaldare richiede molta energia)³. Questo assume però che lo strato

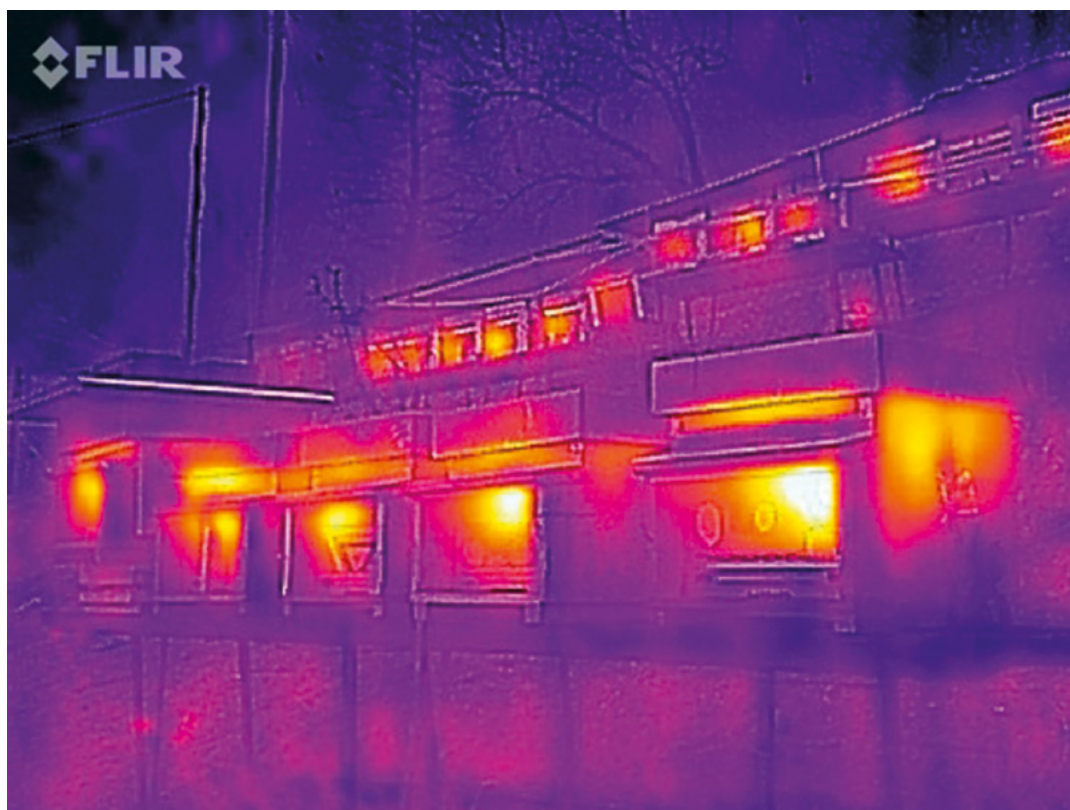


Figura 1 | L'apiario dell'autore nel febbraio 2017. I colori tendenti al bianco indicano le superfici più calde, i blu scuri le zone più fredde

¹I numeri tra parentesi quadre fanno riferimento alla bibliografia al termine del Dossier.

²Le colonie più grandi hanno un rapporto più favorevole tra il volume del glomere (cioè la fonte di calore) e la sua superficie (da cui il calore si disperde).

³Si vedano per esempio [11], Spivak e Milgrand citate in [14], [5].

esterno del glomere non disperda quantità rilevanti di calore. Tuttavia, per quanto la capacità coibentante del glomere sia molto elevata, equivalente a quella del piumino di un uccello o del sottopelo di un piccolo mammifero [38], i 9°C che si misurano alla superficie del glomere sono comunque maggiori della temperatura dell'aria circostante, a cui dunque devono cedere calore; inoltre si è stabilito che un certo numero di api che producono calore al centro occasionalmente si spostano alla superficie del glomere [41], costituendo punti rilevanti di dispersione; e infine si sa da tempo che il glomere deve espellere il CO₂ che produce il metabolismo delle api, e con esso aria calda.

Il glomere dunque cede calore all'ambiente circostante. Basta una foto termica di un'arnia in inverno per mostrare che parte del calore non solo esce dal glomere ma passa oltre i favi e si disperde nell'ambiente attraverso le pareti dell'arnia (fig. 1).

Questa dispersione di energia evidentemente costituisce un'inefficienza. Il problema è dunque quello di quantificarla, valutare se sia o meno rilevante dal punto di vista del funzionamento della colonia come da quello della sua produttività, e quantificare il risparmio energetico di una migliore coibentazione. Negli ultimi anni sono dunque stati pubblicati numerosi studi che comparano - con vari metodi - il potere isolante di diversi modelli di arnie, con e senza api⁴. Le conclusioni di questo secondo campo di studiosi sono essenzialmente concordi tra loro: **una buona coibentazione dissipa meno calore⁵, così che in inverno l'energia mantenuta all'interno permette di mantenere una temperatura maggiore nelle parti periferiche dell'arnia [33, 2, 40, 19, 16, 34], minori oscillazioni giornaliere di temperatura [33, 35, 16, 34, 2, 21], un grado di umidità relativa più vicino all'ottimale [2], un maggiore sviluppo della colonia in primavera [9, 30, 19]⁶, un minor consumo di miele [16, 34, 45]⁷, e minor mortalità, individuale o delle colonie [30]⁸. In estate⁹, simmetricamente, la coibentazione dell'arnia permette di evitare o di ridurre il surriscaldamento dell'interno, lasciando libere le api di occuparsi di altro anziché ventilare per rinfrescare [15]; ne risulta una minore necessità di acqua [3], una maggior produzione di miele [3, 15]¹⁰, un maggior numero di voli [1, 3, 15], un maggiore sviluppo della covata [1, 15], temperature più stabili [21] e più contenute nel nido [3], un minor tempo necessario per ripristinare la temperatura ottimale dopo l'ispezione del nido [16, 34].** A questi studi va aggiunta l'analisi teorica della termodinamica dei fluidi di Mitchell [22-24], che conclude fortemente a favore della coibentazione dell'arnia.

Questo dossier si pone nell'ottica di questi studi quantitativi, esaminando dapprima i flussi di calore tra arnie vuote e l'ambiente circostante, sia in estate che in inverno, poi quantificando la capacità di ritenere il calore di diversi modelli di arnia e di diverse coperture isolanti, infine esaminando come si comportano le api in semplici arnie di legno e in arnie coibentate.

⁴Diversi di questi studi sono pubblicati nell'Est dell'Europa, dove la produzione commerciale di arnie coibentate è di routine: secondo Eldarov e colleghi, ormai **quasi metà delle arnie nella Federazione Russa contengono o sono costituite di polimeri isolanti** [13].

⁵Phillips [31] e Anderson [4] hanno testato diversi materiali coibentanti inserendo una fonte di calore nelle arnie e misurando l'evoluzione verso l'equilibrio e la temperatura raggiunta a quel punto. Pohl e Rogozinski [32] e Cook et al. [10] hanno invece calcolato i valori teorici dei coefficienti di trasmissione termica di vari materiali inclusi, nel caso di [32], arnie multistrato con coibentazione tra due pannelli di legno.

⁶L'unica conclusione di segno opposto sembra essere [12], secondo cui arnie in legno danno una mortalità, sviluppo della colonia e aggressività nettamente migliori del polistirolo. Tuttavia questo risultato potrebbe dipendere da un foro di ventilazione in alto che, nel caso di materiali ben isolanti, induce un forte movimento convettivo verso l'alto che di fatto rende l'arnia più fredda anziché più calda [24, p. 179].

⁷St. Clair e colleghi [40] rilevano consumi di scorte significativamente minori nelle arnie in polistirolo rispetto al legno, ma solo a partire dall'insorgere della covata; come vedremo più avanti, ho verificato la stessa cosa. Moeller [26], rileva la diminuzione del consumo ma sconsiglia la coibentazione perché impedirebbe alle api di percepire i momenti caldi all'esterno che permetterebbero i voli di purificazione.

⁸St. Clair et al. [40] trovano una minore mortalità delle colonie ma più o meno la stessa popolazione di api nelle sopravvissute a marzo e aprile; anche Aumier e colleghi [5] trovano lo stesso numero di api in aprile, ma non avendo esaminato alcun altro parametro ne concludono che la coibentazione non ha nessun effetto.

⁹Per l'estate sono state testate diverse strategie di coibentazione o di protezione dell'arnia dal calore (dalla climatizzazione alla verniciatura in diversi colori, dalla coibentazione applicata direttamente alla struttura lignea a arnie in polistirene a scatole coibentate di copertura esterna, a volte accoppiate con meccanismi di ventilazione), che naturalmente comportano variazioni notevoli nella portata quantitativa dei risultati.

¹⁰Abou-Shaara e colleghi [1] trovano che nelle condizioni estive in Egitto le api carniche traggono vantaggio dalle arnie coibentate rispetto al legno, mentre le yemenite producono maggiormente in arnie tradizionali. Satta e Floris [34] non hanno trovato nessuna differenza significativa (ma lo strato coibente era piuttosto sottile ed applicato all'interno dell'arnia, una procedura non efficiente per schermare dal caldo estivo).

Un po' di fisica della dispersione di calore

Prima di procedere è necessario chiarire alcuni concetti sviluppati dalla fisica della trasmissione di calore. **In primo luogo, i flussi di calore si muovono sempre dal caldo verso il freddo. Non è, dunque, il freddo invernale ad entrare nell'arnia attraverso le pareti, ma il caldo ad uscire.**

Il calore si può trasmettere in tre modi, a cui corrispondono tre principi fisici diversi: **per conduzione, per convezione, per radiazione**. Un glomere disperde calore in tutti questi modi e, similmente, **anche il caldo estivo penetra nell'arnia per le medesime vie**.

La diffusione per conduzione avviene per contatto, trasmettendo agitazione molecolare dal corpo più caldo al corpo più freddo, propagandosi anche tramite l'aria. Si tratta di un processo lento. Questa è la modalità di trasmissione di calore che viene rallentata dai materiali coibentanti, che funzionano essenzialmente ammortizzando il movimento delle molecole. Ciascuna sostanza ha una propria capacità di trasmettere calore, detta **conduttività termica**; è misurata dal valore **k**, che indica il flusso di energia termica (in Watt) trasmessa perpendicolarmente attraverso un certo spessore

Conduzione e accumulazione del calore

Quando un flusso di calore in movimento dal caldo verso il freddo incontra un ostacolo, per esempio una parete in legno, in parte viene accumulato dal materiale stesso per essere poi liberato quando l'ambiente si raffredda, in parte passa attraverso. Queste due proprietà dei materiali sono fondamentali per la capacità dell'arnia di regolare la temperatura interna. La tabella seguente riporta alcuni di questi valori.

Materiale	Coefficiente di trasmissione di calore k (W/mK)	Calore specifico (J/g°C)
polistirene espanso (EPS)	0.03 - 0.033 (a dipendenza della densità)	1.3 - 1.5
polistirene estruso (XPS)	0.029 - 0.039 (a dipendenza della densità)	
poliuretano	0.03	1.8
acqua		4.18
legno di abete	0.12 - 0.2 (a dipendenza dell'umidità e della specie)	1.7
legno di larice	0.1 - 0.12 (a dipendenza dell'umidità)	1.4
legno di pino	0.09 - 1.15 (a dipendenza dell'umidità e della specie)	1.5
sughero	0.036 - 0.067 (a dipendenza della densità)	2
lana di pecora	0.034 - 0.04 (a dipendenza della densità)	2.02
miele		2.09 - 2.5 (a seconda del grado di umidità e di cristallizzazione)
favo di cera senza api	0.15 - 0.18	2.2
favo con api	0.0272	

Il coefficiente di trasmissione di calore k misura quanto calore può passare attraverso un certo spessore (in metri) di materiale tenendo conto della differenza di temperatura tra il lato più caldo e quello più freddo. **Valori piccoli di k indicano una buona capacità coibentante; questa dipende però dallo spessore: raddoppiando lo spessore del materiale, si dimezza la dispersione di calore. Il polistirene ha una capacità coibentante di 3-5 volte superiore al legno, a parità di spessore.**

Il calore specifico indica quanta energia è necessaria per accrescere di 1 °C un grammo di materiale. L'acqua è la sostanza naturale col calore specifico maggiore, ed è pertanto un grande stabilizzatore di temperatura. Il legno più umido (per esempio, un albero vivo) accumula più calore del legno secco. Il miele accumula parecchio calore. Materiali isolanti come il polistirene hanno un calore specifico paragonabile a quello del legno, ma essendo molto più leggeri a parità di volume accumulano molto meno.

(in metri) a partire da una data differenza di temperatura (in gradi Kelvin); **tanto minore è il valore k , tanto meglio la sostanza impedisce il passaggio di calore.** Nel nostro caso, k di una parete dell'arnia misura il calore che passa dal glomere attraverso la parete per disperdersi nell'aria fredda all'esterno. I valori k di vari materiali naturali e industriali rilevanti per quanto si dirà più avanti si trovano nel riquadro a pagina 6.

La dispersione per convezione consiste nella circolazione di energia nell'arnia, e poi dall'arnia verso l'esterno (in inverno), trasportata dall'aria calda generata dal glomere che tende a salire in quanto è meno densa dell'arnia fredda che risiede nell'arnia. Si tratta di un processo veloce, anche perché è aiutato dalle api stesse tramite la ventilazione (per asciugare il miele in estate, per espellere l'anidride carbonica in inverno).

La terza modalità di trasmissione del calore è per radiazione. Il calore ha la forma di onde elettromagnetiche, la maggior parte delle quali nello spettro infrarosso. Il calore si comporta pertanto come la luce: anche se non è visibile a occhio nudo, può essere misurato dalle videocamere termiche. È appunto questa forma del calore che è catturata nella figura 1. **Si diffonde radialmente e in linea retta in tutte le direzioni alla velocità della luce, dai corpi caldi a quelli più freddi; non ha bisogno di un supporto per poter viaggiare, e si trasmette pertanto anche nel vuoto (a differenza del trasporto per conduzione).** Quando queste radiazioni raggiungono un altro corpo, **possono essere assorbite oppure riflesse, a seconda del tipo di materiale.**

I materiali riflettenti respingono a specchio le radiazioni caloriche, e per questo trovano un largo impiego nell'industria e soprattutto nell'edilizia, in alternativa o quale accompagnamento ai materiali isolanti che riducono la conduzione di calore. Questi materiali, in particolare grazie al fatto di essere poco costosi e poco ingombranti, si prestano molto bene per limitare le dispersioni di calore. Un foglio d'alluminio, per esempio, riflette fino al 94% dell'energia radiante; se applicato sotto un coprifavo o su un diaframma, rimanda da dove è venuta la maggior parte del calore prima ancora che il legno o il polistirolo debba cominciare ad attutire la dispersione di energia per contatto. Quando un materiale assorbe energia calorica, si riscalda; **la capacità di assorbire energia si chiama calore specifico, ed è appunto specifico di ciascuna sostanza. Questa grandezza misura la quantità di energia (in Joules, J) necessaria per aumentare di 1 °C un grammo di massa del materiale.** Il calore così accumulato permette a certe sostanze di fungere da regolatori della temperatura: quando ricevono calore lo assorbono, diminuendo la quantità di calore che verrebbe altrimenti ritrasmesso e alla fine disperso. Quando l'ambiente circostante diventa più freddo, fungono da radiatori, liberando il calore accumulato. Nell'arnia (vedi riquadro precedente), legno, miele e cera costituiscono una riserva di energia quando sono caldi, ma da freddi richiedono quantità considerevoli di energia per poter raggiungere la temperatura dell'ambiente - per esempio, se si inserisce nell'arnia un favo di scorte conservato al fresco.

L'arnia nella quale alloggiamo le api costituisce la barriera che le separa dall'ambiente esterno e che ne filtra le fluttuazioni, diminuendole o amplificandole a seconda delle configurazioni. In un articolo precedente [6] avevo riportato come le variazioni nelle condizioni meteorologiche (pioggia o sole, estate e inverno, vento o calma) si ripercuotono sulle temperature e sull'umidità relativa misurabili all'interno di un'arnia disabitata, con e senza favi. L'esperimento, esteso l'inverno successivo ad alcuni modelli supplementari di arnie (i risultati in figura 2), consisteva semplicemente nel disporre all'aperto tipi diversi di arnie, con favi ma senza api, e confrontare i dati rilevati all'interno con quelli ambientali. Si tratta della medesima procedura seguita da T. Seeley per confrontare la stabilità delle temperature dentro un nido scavato in un albero e una cassa in legno di uguali dimensioni [35, 33].

Alcuni risultati erano prevedibili, altri invece sono stati sorprendenti. Bisognava ovviamente attendersi il fatto che una maggiore coibentazione sia delle pareti che del coprifavo ritardasse e limitasse l'ampiezza delle fluttuazioni all'interno dell'arnia, tanto della temperatura quanto dell'umidità relativa. Più sorprendente, invece, è stato l'effetto della forma dell'arnia: **strutture sviluppate verso l'alto (arnie Warré o arnette miniplus di 28 x 28 cm su 2 piani) limitano parecchio l'ampiezza delle fluttuazioni**

all'interno dell'arnia, mentre una base più larga e bassa (arnie Dadant) si è dimostrata molto meno efficiente. L'apertura o la chiusura del fondo si è rivelata poco importante, con l'eccezione dei giorni di vento sostenuto in cui la circolazione di aria secca ha diminuito, in assenza del fondo antivarroa, il grado di umidità relativa ben oltre i limiti desiderati dalle api. Anche l'orientamento del favo, parallelo o perpendicolare all'entrata, influisce poco. **La diminuzione dello spazio tra i favi, con l'uso di un distanziatore per 11 telai in un'arnia Dadant da 10 che riduce la distanza tra i telai da 12 a 9 mm, più in sintonia con quanto le api fanno in natura¹¹, contribuisce invece sensibilmente a stabilizzare le condizioni interne.**

In estate l'effetto delle condizioni esterne in caso di mancanza di coibentazione può diventare drammatico. In figura 3 si vede come, alla ancora modesta temperatura esterna di 30 °C, immediatamente sotto il coprifavo delle arnie Dadant in legno si raggiungono temperature che richiedono l'intervento delle api per raffreddare: 40 °C se il coprifavo è coibentato con della lana, e 50 °C se non lo è. A tali temperature, le api non possono sopravvivere, e devono rifugiarsi nella zona bassa del nido. Al contrario, una copertura esterna di materiale isolante (polistirene) permette di mantenere, senza sforzo alcuno da parte delle api, una temperatura confortevole per la covata.

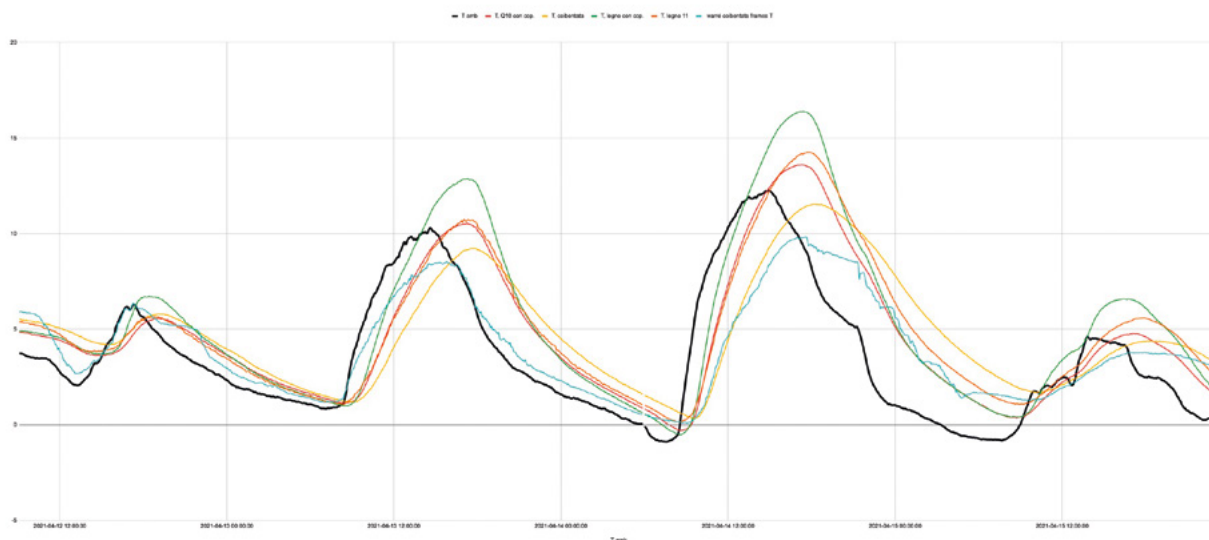


Figura 2 | Temperature registrate all'interno di alcuni tipi di arnia al variare della temperatura esterna (linea nera), aprile 2021. In ordine crescente di efficienze energetica, le arnie sono: una Dadant a 10 favi (linea verde) una Dadant da 10 favi ma con distanziatore da 11 (linea arancio), una Quarti 10 in polistirene (linea rossa), un'arnia il legno rivestita con uno strato esterno di 4 cm di polistirene estruso (linea gialla) e un'arnia Warré coibentata con 8 cm di polistirene estruso (linea azzurra)

¹¹ Da misurazioni da me effettuate in nidi artificiali (arnie di osservazione) o semi-artificiali (un'arnia di osservazione scavata in un tronco d'albero, con un lato con finestra) in cui le api non avevano vincoli dati dai telai. **Non è stupefacente, del resto, che la distanza preferita dalle api sia a metà dello spazio d'ape (tra 6 e 12 mm).** Va anche notato che, quando l'arnia è abitata, la minore distanza tra favi limita la superficie del glomere esposta al freddo e da cui il calore si disperde, permettendo dunque alle api di mantenere il calore in modo più efficiente.

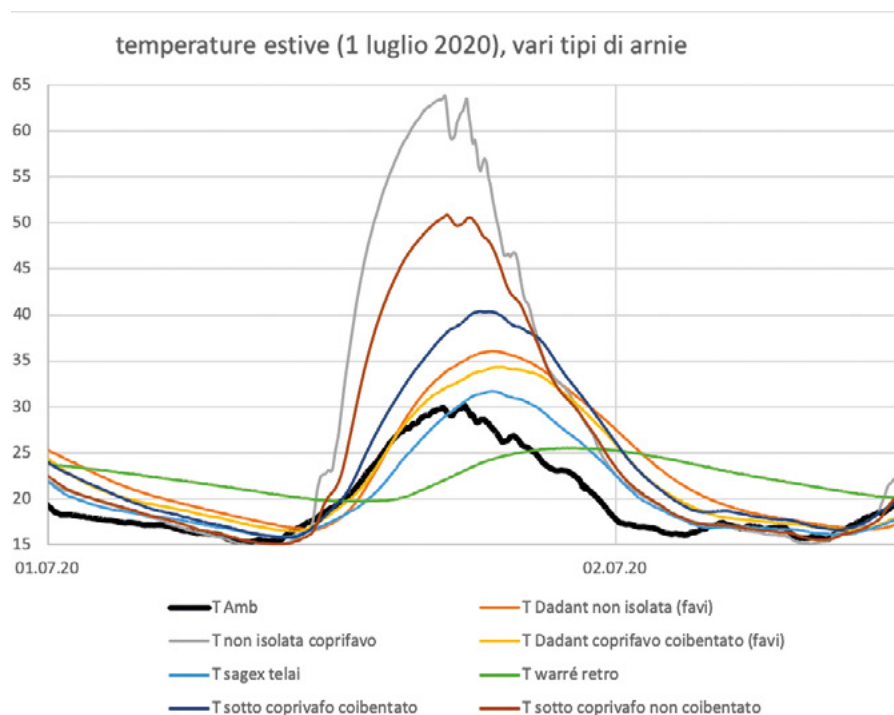


Figura 3 | Temperature registrate all'interno di alcuni tipi di arnia al variare della temperatura esterna (linea nera), luglio 2020. In ordine decrescente di efficienze energetica abbiamo la medesima Warré di figura 2, un'arnietta commerciale di polistirene, una Dadant in legno con coprifafo coibentato con lana, una Dadant simile ma col coprifafo non coibentato. Sono allarmanti le temperature registrate immediatamente sotto il coprifafo di queste due ultime, con massime che superano di gran lunga quanto tollerato dalle api

Il calore dall'interno

Questi risultati mostrano che la stabilizzazione della temperatura è un problema serio tanto in estate quanto in inverno. Tuttavia, questo approccio non permette di quantificare il risparmio energetico che sarebbe permesso da un manto isolante, e non permette neppure di rendere conto del fatto che, nelle zone temperate, i flussi principali di calore vanno dalla parte calda all'interno dell'arnia al freddo dell'ambiente esterno. Durante la stagione produttiva le api mantengono circa 35 °C nelle zone del nido con covata, durante l'inverno in assenza di covata si mantengono tra 25 e 30 °C al centro del glomere, creando per la maggior parte del tempo un divario di quasi 20 °C tra temperatura interna e temperatura esterna, con punte anche oltre 40 °C. **È dunque importante misurare anche l'effetto inverso, quello della dispersione verso l'esterno del calore generato all'interno.**

Riscaldare dall'interno: materiali e metodo

Ho condotto un laborioso ma semplice esperimento che permette non solo di stilare una graduatoria delle configurazioni più o meno dispersive di calore, ma anche (a differenza dell'esperimento descritto in precedenza) **di darne una valutazione quantitativa**. Naturalmente, è stato necessario fare ricorso a una fonte di calore controllabile, non potendo far conto su quello prodotto dalle api: poiché la colonia regola la temperatura, in particolare in presenza

di covata, neutralizza almeno in parte le eventuali maggiori o minori dispersioni di calore, nascondendo il fenomeno che si vuole misurare. **Ho impiegato un riscaldamento per terrari, consistente in una pellicola plastificata che emana calore uniforme**, di dimensioni che permettono di montarlo in un telaino da nido tagliato longitudinalmente a metà (figura 4). Il potenziometro a cui è collegato è regolato sull'apertura massima, e l'accensione e lo spegnimento sono controllati da un termostato che attiva il passaggio di corrente a 31 °C e lo disattiva a 36 °C. Il favo con il riscaldamento è messo nel quinto spazio; sui due lati si trovano dei normali favi vuoti; a fianco di questi, altri due telai da cui è ritagliato lo spazio per sistemare due datalogger (Sensirion SHT31



Figura 4 | Riscaldamento per terrari, montato in un favo da nido



Figura 5 | Posizionamento del datalogger e del sensore del termostato all'interno di un favo da nido

smart gadget) e, in uno dei due, il sensore del termostato (fissato con nastro adesivo al datalogger) (figura 5). Sui fianchi, altri favi vuoti a riempire gli spazi mancanti, tranne l'ultimo lasciato vuoto perché lo spessore del potenziometro impedisce l'inserimento di un ulteriore telaio (figura 6). Oltre ai due datalogger all'interno, la temperatura è misurata anche nel coprifavo, sul fianco e sul retro dell'arnia (figura 7), oltre naturalmente che nel laboratorio di smielatura nella quale è stato effettuato l'esperimento per verificare che la temperatura fosse approssimativamente costante: in effetti, nel corso dei 49 giorni in cui sono state effettuate le misurazioni (dall'11 gennaio al 1 marzo 2022), la temperatura ha lentamente oscillato tra 12.4 e 13.2 °C. Tutte le temperature sono state misurate a intervalli di 10 secondi. Il presupposto sul quale ho ragionato è il seguente: tanto meno calore viene disperso, tanto più velocemente la temperatura può salire quando il termostato è acceso, e

tanto più lentamente scende quando è spento. Riportando il tempo di accensione sulle 24 ore, è possibile confrontare l'efficienza energetica dei vari tipi di arnia. Confrontando le temperature registrate all'esterno delle pareti e dentro il coprifavo è possibile vedere da dove si disperde il calore. Il termostato forza dunque la temperatura interna ad oscillare tra 31 e 36 °C (con qualche piccola deviazione dovuta alla diversa inerzia termica dei materiali), ciò che cambia tra una configurazione e l'altra sono i tempi di salita e di discesa. Allo stesso modo, oscillano anche - con un ritardo variabile a seconda dei materiali che dipende dalla loro capacità coibentante - la temperatura registrata nel coprifavo e attraverso le pareti; i tempi di oscillazioni sono legati alle fluttuazioni interne, mentre il livello attorno a cui avvengono le oscillazioni muta a seconda del calore che il materiale lascia passare (e, nel caso del coprifavo, dalla presenza o meno di uno strato isolante sopra il sensore)¹². I grafici si presentano come in figura 8.

I tempi di riscaldamento e raffreddamento dipendono da diversi fattori che, congiuntamente, determinano le diverse prestazioni delle diverse arnie. **Uno di questi fattori, comune a tutte le arnie, consiste nella capacità dei favi di accumulare e cedere calore:** poiché i favi e la loro disposizione sono i medesimi per tutte le misurazioni, questo non dovrebbe creare differenze di rilievo¹³. **I fattori legati a ciascuna**



Figura 6 | Disposizione del riscaldamento e dei favi nell'arnia. L'ultimo spazio è vuoto per fare posto all'ingombrante potenziometro dell'elemento riscaldante

Figura 7 | Arnia Dadant in legno, coprifavo coibentato con lana sciolta (grezza e filata); i sensori laterale e sul retro sono inseriti in un blocchetto di polistirene intagliato, in modo che il datalogger resti isolato dall'ambiente e che l'aria che lo circonda sia riscaldata dal calore che passa attraverso le pareti. La temperatura del coprifavo è misurata direttamente sul legno, il sensore è sotto lo strato di lana



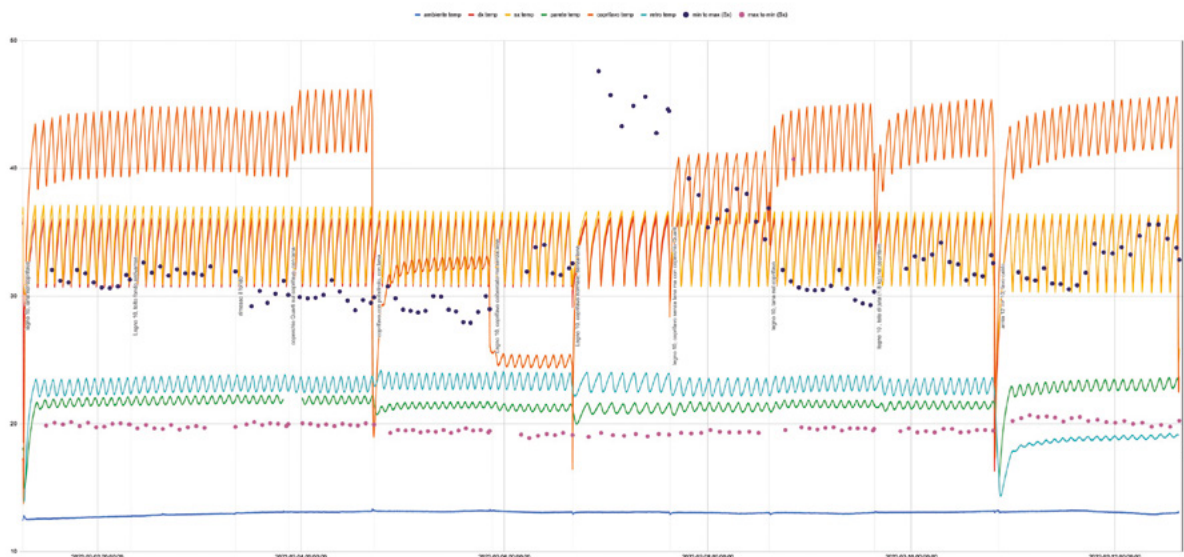


Figura 8 | Grafico relativo a 11 configurazioni dell'arnia Dadant da 10T. Si riconoscono le oscillazioni della temperatura interna (2 sensori, linee gialla e rossa), del coprifavo (linea arancio), della parete laterale (linea azzurra) e del retro (linea verde), la temperatura ambiente (linea blu). I punti rappresentano il tempo di salita da 31 a 36 °C (punti viola scuro) e di discesa da 36 a 31 °C (punti viola chiaro), i cui valori sono leggibili sulla scala di destra

specifici arnia sono almeno tre, ed è la loro risultante ad essere rilevata dai diversi tempi di salita e di discesa della temperatura.

1) Diversi materiali hanno diverse conducibilità termiche (il coefficiente k), e corrispondentemente disperdono più o meno rapidamente verso l'esterno l'energia prodotta all'interno attraverso le pareti e il coprifavo.

2) Ciascun materiale ha diversa capacità di accumulare calore nelle fasi in cui il riscaldamento è acceso, e poi di cederlo quando il riscaldamento è spento (calore specifico), contribuendo dunque in misura maggiore o minore a termoregolare rallentando sia la salita che la discesa delle temperature.

3) Il terzo fattore risiede nel fatto che la presenza di un elemento riscaldante al centro determina dei flussi convettivi: l'aria calda sale, raggiunge il coprifavo, si espande in orizzontale fino a raggiungere l'intera superficie, si raffredda gradualmente al contatto con il coprifavo e in seguito con le pareti fredde ed è dunque forzata verso il

basso dal sopraggiungere di nuova aria calda. Scendendo, a contatto con le pareti laterali si raffredda ulteriormente, e quando arriva in basso si miscela con l'aria che può liberamente entrare dall'esterno. **Questo movimento assomiglia a quello creato da un glomere di api, che però a differenza dell'elemento riscaldante ha forma di uno sferoide coibentato sulla superficie esterna dalle api stesse anziché lasciare l'aria libera di circolare.** Questo movimento circolatorio può essere leggermente differente tra una configurazione e l'altra sottoposte a test a causa delle diverse temperature delle pareti e del coprifavo, che possono rallentare o accelerare il moto convettivo. In ogni caso, **è certo che per tutte le arnie e configurazioni buona parte del calore prodotto dal riscaldamento finisce per uscire dall'arnia per moto convettivo^{14,15}.** In questo modo, i risultati concreti ottenuti da ciascuna arnia divergono molto meno rispetto a quanto presupporrebbero unicamente il calore specifico e il coefficiente di conduttività termica come calcolati in [10 e 32].

¹² A mia conoscenza, gli unici tentativi di misurare la dispersione termica di diversi tipi di arnie inserendo un elemento riscaldante risalgono a un secolo fa: Phillips [31] ha però misurato i valori di equilibrio che si stabiliscono lasciando il riscaldamento acceso per un lungo periodo in ambiente chiuso; il risultato è dunque dato in termini di differenza di temperatura tra interno e esterno dell'arnia, e al di là di pareti e fondo. La porta di volo è stata chiusa ermeticamente, così che non si registra l'effetto della convezione. Anderson [4] ha registrato i valori al variare della temperatura all'aperto. I risultati di entrambi permettono di stilare una classifica tra le varie arnie testate, ma non di dare un valore quantitativo alla loro efficienza energetica complessiva.

¹³ Si noti che se avessi usato dei favi di miele il risultato sarebbe stato diverso nella sua dimensione quantitativa: il miele, infatti, ha un alto calore specifico (si veda il riquadro) e un'importante massa, cioè un'ottima capacità di accumulare calore nella fase in cui il riscaldamento è acceso, e di cederlo quando la temperatura scende. Cook e colleghi hanno calcolato che per portare da 30 a 35 °C un'arnia con favi di miele opercolato è necessaria un'energia oltre 4 volte superiore rispetto alla medesima arnia con favi vuoti [10, tabella 1]. I tempi di riscaldamento e di raffreddamento sarebbero dunque significativamente diversi. Lo scopo dell'esercizio qui non è di misurare la differenza tra tipi di favo, ma tra tipi di arnia.

¹⁴ Questo suggerisce che gli spifferi, in particolare quelli all'entrata, siano un fattore estremamente importante nella conservazione dell'energia dell'arnia, aspetto cui non si dedica sufficiente attenzione. In effetti, Toomema e coautori [43] riportano di ricerche russe che hanno mostrato come la restrizione dell'entrata porti a una considerevole riduzione del consumo di miele.

¹⁵ Va ovviamente anche tenuto conto che le api devono respirare, espellendo anidride carbonica. Misurazioni effettuate utilizzando un anemometro a incandescenza (modello Testo 405i) il mattino del 13 dicembre 2020 dalle 07:29:00 alle 07:54:04, misurazioni ogni secondo, con temperatura esterna attorno ai 3 °C, hanno dato una velocità media di 5.2 cm/s attraverso un passaggio di 588 mm², corrispondenti a un volume totale di 110 litri all'ora, sufficienti a cambiare più volte l'aria dell'intera arnia (si tratta di un'arnia di osservazione di 57 litri, da cui però bisogna sottrarre lo spazio occupato dai favi e dalle api). Per l'estate si è stimato [17] che le api espellono 600 litri di aria ogni ora. In una modellizzazione matematica si è calcolato che a una temperatura esterna di -25 °C il flusso d'aria dall'entrata dovrebbe raggiungere i 12 cm/s [28].

Per minimizzare gli effetti delle (seppur piccole) oscillazioni nella temperatura dell'ambiente, ho scelto un'arnia di riferimento rispetto alla quale paragonare tutte le altre: una Dadant in legno da 10 telai con della lana nel coprifavo (vedi figura 7). Ogni cambiamento di configurazione è stato seguito dalla ripetizione della misura dell'arnia di controllo, e il guadagno o la perdita è stato confrontato con la media dei risultati dell'arnia di controllo. Le prime fluttuazioni di ogni ciclo non sono state considerate, in quanto le oscillazioni delle temperature interne richiedono qualche tempo per raggiungere il loro ciclo di equilibrio. Anche a quel punto, i valori presentano sempre qualche fluttuazione (sia il riscaldamento che il termostato usati non sono strumenti di alta precisione), per cui si è ritenuto il valore medio dei tempi sia di salita che di discesa.

Oltre all'arnia Dadant in legno da 10 telai, sono state considerate alcune altre arnie con diverse configurazioni (in particolare, diverse modalità di coibentazione del coprifavo), con modifiche introdotte una per volta in modo da poter acquisire informazioni sugli effetti di quella specifica alterazione. Le arnie prese in esame sono: **una Dadant in legno interamente rivestita con lastre di polistirene estruso (XPS) dello spessore di 3 cm incollate alle pareti** (un esemplare in uso ma con XPS da 4 cm è illustrato in figura 13); **una Dadant in legno da 12 favi, modificata a favo caldo**; tutte queste Dadant sono di produzione commerciale, di spessore 25 mm. Vi sono poi **una Quarti 10 in polistirene espanso (EPS) ad alta densità, spessore 25 mm**; **una Gorra Klima in polipropilene espanso (EPP) ad alta densità, spessore 27 mm**, prodotta da Leonardo arnie; e, del medesimo produttore, **una XLAM 40, in legno lamellare di larice, spessore 42 mm**. Le diverse configurazioni testate sono: **distanziatori da 11 favi anziché 10**; **con e senza fondo antivarroa**; **diversi tipi di coibentazione del coprifavo**: nulla,

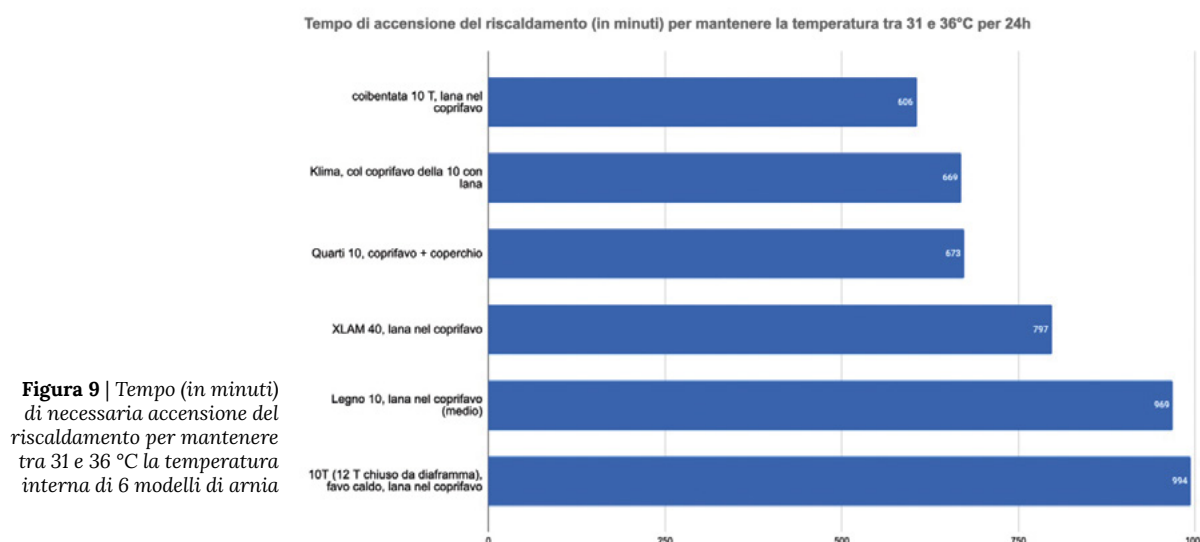
lana, juta, **un coprifavo coibentato sul lato inferiore, e un coperchio in EPS preparato per la Quarti 10 ma applicabile anche, con una piccola modifica, sopra i normali coprifavo**.

I risultati

La graduatoria della capacità delle varie arnie di trattenere il calore riflette a grandi linee la scala dell'escursione termica che risultava dai test descritti in [6]: il che, naturalmente, non è sorprendente perché la capacità di rallentare i flussi termici funziona in entrambe le direzioni, sia che il riscaldamento sia all'interno dell'arnia o all'esterno. Ora però possiamo farci un'idea degli ordini di grandezza delle differenze tra un modello e l'altro, almeno nelle condizioni in cui si è svolto l'esperimento¹⁶.

Cominciamo dal confronto tra le arnie, cercando di mantenere costanti le altre condizioni. **Tutte le misure sono state effettuate con i coprifavo coibentati con la lana, con la sola eccezione della Quarti 10, che era invece munita del suo coprifavo in EPS con relativo coperchio**. La figura 9 riporta il tempo di accensione su 24 ore, che varia dai 606 e 984 minuti, mentre la figura 10 riporta il risparmio energetico (o la perdita) percentuale rispetto all'arnia Dadant in legno usata come termine di paragone.

L'esito è molto chiaro. **La normale arnia Dadant a 10 favi comporta un elevato consumo energetico in rapporto a tutti gli altri modelli. Fa leggermente peggio solo una Dadant da 12 telai orientati a favo caldo**, ridotti a 10 tramite un diaframma a filo delle pareti e del coprifavo (la separazione, comunque, non è completamente stagna e permette un minimo di dispersione per convezione, per cui, considerata la piccola differenza, non si può concludere che il favo caldo disperde più del favo freddo). **L'arnia in legno di larice lamellare di spessore 42 mm (contro i 25 della normale Dadant) permette un risparmio energetico del 17.7%, le due**



¹⁶ Sarebbe interessante ripetere l'esperimento a diverse condizioni di temperatura ambientale e con riscaldamenti di diversa potenza; purtroppo non dispongo di un ambiente climatizzato. In teoria, il flusso di calore dall'interno (caldo) all'esterno (freddo) di ciascun materiale di un dato spessore è semplicemente proporzionale alla differenza di temperatura tra interno ed esterno e al coefficiente k di conduttività termica propria di ciascun materiale che, per materiali non metallici, è relativamente costante al variare della temperatura. Le proporzioni dunque, non dovrebbero variare (v. [10], fig. 4). Per quanto riguarda la capacità dei materiali di accumulare calore, il calore specifico del legno cresce leggermente al crescere della temperatura, per cui a temperature più basse le arnie di EPS e EPP dovrebbero mostrare un rendimento migliore in assoluto. Infine, la circolazione convettiva è probabilmente sensibile a cambiamenti nella temperatura esterna, per cui i risultati potrebbero anche differire in modo considerevole.

risparmio energetico in % rispetto all'arnia 10T in legno, tutte con lana nel coprifavo

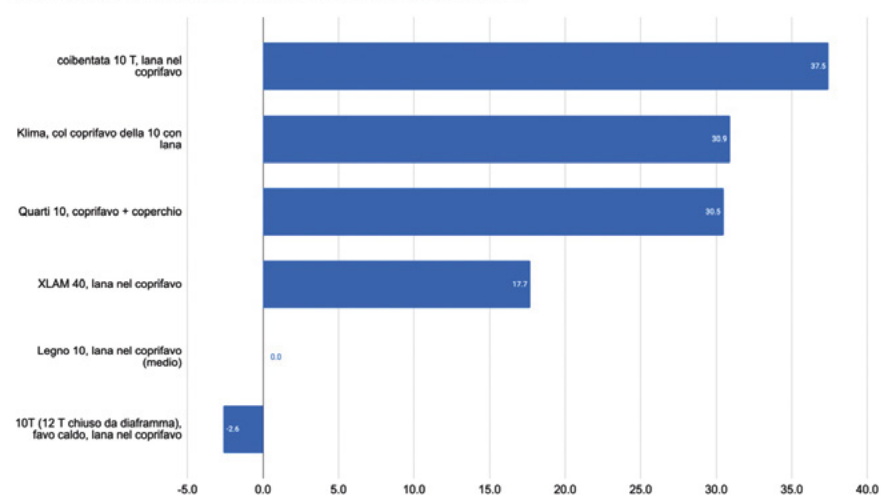


Figura 10 | Tempo di accensione del riscaldamento (vedi figura 8), riportato come percentuale dell'arnia di confronto (Dadant in legno, 10T, coprifavo coibentato con lana)

arnie in materiali sintetici (EPP e EPS) permettono risparmi energetici attorno al 30%, mentre l'arnia in legno ricoperta da uno strato di XPS consuma il 37.5% in meno.

Il risparmio energetico si realizza sia nel minor tempo di salita della temperatura tra 31 e 36 °C che nella più lenta discesa quando il riscaldamento è spento (figura 11). Poiché i coprifavo sono tutti uguali, le differenze nella dispersione dall'alto sono minime, con l'eccezione dell'estremamente efficiente coprifavo in polistirene con coperchio della Quarti. La dispersione dalle pareti laterali è riportata nella figura 12.

Veniamo ora agli effetti delle modifiche puntuali apportate alle varie arnie. Cominciamo dal distanziatore da 11 telai in luogo di quello da 10. Questo restringe a 9 mm lo spazio tra favi in alternativa ai 12 mm della normale Dadant a 10 telai. La figura 2 mostra che l'arnia Dadant a 11 favi soggetta a

fluttuazioni della temperatura esterna ha una escursione termica significativamente minore di quella dell'arnia corrispondente a 10 favi. In modo analogo, se portiamo il riscaldamento all'interno possiamo verificare che l'arnia a 11 favi ha diminuito il tempo di riscaldamento del 6.6% in un caso e del 3.5% in una seconda misura (in entrambi i casi, con lana nel coprifavo); nell'arnia coibentata con XPS incollato alle pareti, il restringimento dei favi ha portato a un ulteriore guadagno di 1.9%. Qui credo di poter congetturare che la presenza delle api modificherebbe il rendimento invernale in misura ancora maggiore: lo spazio tra i favi, infatti, è dove la superficie esterna del glomere incontra aria fredda e da cui dunque si dissipa la maggior parte del calore; riducendolo del 25%, non solo si diminuisce lo spazio fisico da cui si disperde l'energia termica, ma si 'liberano' alcune delle api che altrimenti avrebbero dovuto assumersi

Tempo di riscaldamento e di raffreddamento tra 31 e 36°C

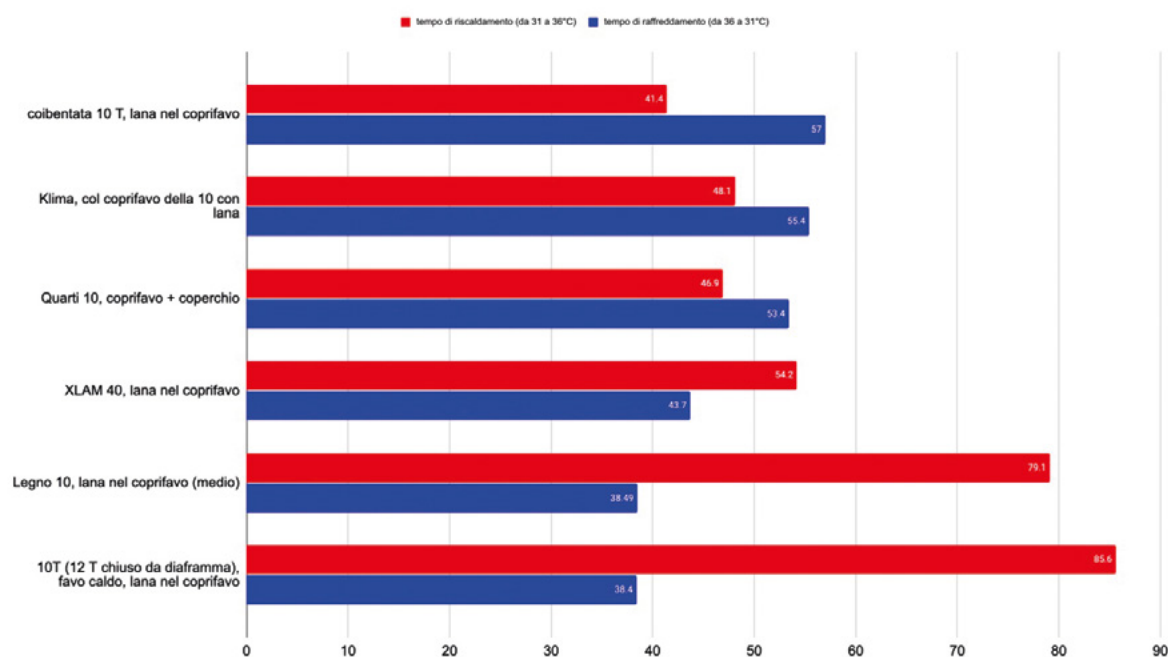
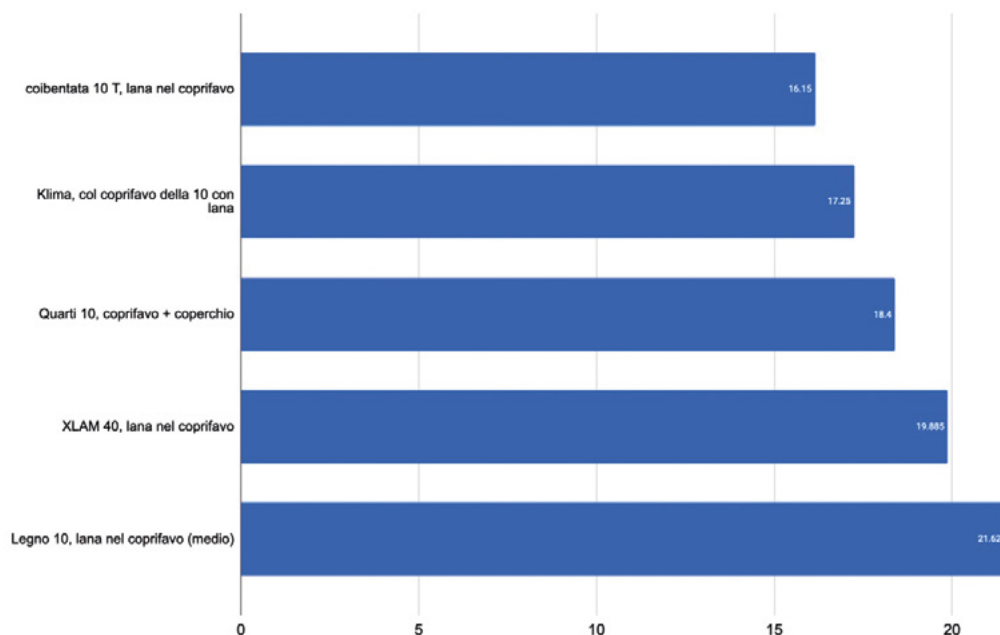


Figura 11 | Tempo di riscaldamento (rosso) e di raffreddamento (blu), in minuti, per vari tipi di arnia

temperatura registrata sul lato esterno della parete

Figura 12 | Dispersione dalla parete laterale (temperatura media)



l'incarico di fare da barriera termica, permettendo loro di occuparsi d'altro. (Considerazione pratica per chi volesse provare: la sostituzione va fatta in primavera, quando i favi sono magri. Siccome le api non possono più costruire corone spesse, occorre lasciare loro un telaio aggiuntivo per accumulare scorte per l'inverno).

La rimozione del fondo antivarroa ha prodotto una piccola perdita di efficienza, del 2.5%, confermando quanto trovato in [6]. Anche qui va ricordato che questo è l'effetto dell'arnia vuota: sulla dinamica in presenza di api occorrerà indagare separatamente.

Il coprifavo è sicuramente la componente più esposta a perdite energetiche. Le correnti convettive portano l'aria calda del riscaldamento (poco importa che sia il riscaldamento artificiale dell'esperimento o il calore prodotto dalle api) verso il coprifavo, e se non è ben coibentato causano una forte dispersione di energia. **Parte del calore sfugge attraverso il legno, parte invece esce in forma di aria calda dal foro per il nutritore se non è chiuso ermeticamente, e parte ancora dalla chiusura del foro stesso, in particolare se consiste nel disco di metallo, che conduce ottimamente il calore essendo molto sottile. Durante l'estate, il sole che batte sulla lamiera del tetto produce nel coprifavo e immediatamente al di sotto temperature elevatissime (vedi figura 3), e anche in quel caso è importante proteggere le api e soprattutto le regine.**

La mia configurazione standard (in apiario come nell'esperimento) è con lana nel coprifavo. **La lana è un ottimo isolante: togliendola, il consumo energetico cresce del 16.3%.** Usando una tela sottile di juta, ben piegata e compatta, per un peso totale di 1.8 kg, si ha una perdita del 3.7% rispetto alla lana (poiché il potere coibentante è in proporzione al peso, sacchi di juta grossolana, spiegazzati e più leggeri isolano peggio o molto peggio della situazione ideale che ho misurato). **Il coperchio in EPS prodotto**

da Quarti migliora di 8.7% l'efficienza energetica della Quarti in EPS con il solo coprifavo. Il medesimo coperchio appoggiato sopra il coprifavo in legno su una Dadant in sostituzione della lana produce un risparmio energetico del 6.1% rispetto al coprifavo non coibentato; quando il medesimo coperchio è messo sopra il coprifavo riempito di lana non comporta alcun vantaggio aggiuntivo nelle condizioni del test, ad indicare che la lana ha permesso di guadagnare praticamente tutto quanto era guadagnabile; ho però il sospetto (non suffragato da misurazioni) che in estate, quando i differenziali di temperatura sono molto elevati, il coperchio in EPS possa ridurre parecchio l'effetto nefasto del sole sul coprifavo, anche se è coibentato con la lana. **Ho provato a modificare un normale coprifavo aggiungendo 1 cm di EPS sotto il legno, ricoprendolo per protezione con un multistrato da 5 mm. Questo coprifavo permette di risparmiare il 10% di energia rispetto a un normale coprifavo non coibentato.** Aggiungendo lana nel coprifavo con EPS, il risultato praticamente non cambia, il che suggerisce che il design non è totalmente efficiente: **meglio sarebbe stato, come suggeriscono le considerazioni che si svilupperanno più avanti, mettere lo strato di EPS sopra il legno originale del coprifavo, anziché sotto.**

Infine, arnie più grandi sono nettamente meno efficienti di arnie piccole. A parità di riscaldamento, l'arnia in legno a favo caldo a 12 telai consuma il 7.4% in più della medesima arnia ridotta a 10T tramite un diaframma; **un'arnietta da nucleo da 6 telai in polistirene (Pitarresi) consuma quasi il 40% in meno rispetto alla Quarti da 10 di un materiale simile e del medesimo spessore,** per l'ovvia ragione che la medesima energia deve riscaldare un volume minore grossomodo appunto in quella proporzione. **Le implicazioni sulla decisione di dove alloggiare una famiglia piccola sono chiare.**

Discussione e rilevanza pratica

I risultati di questi test si prestano a **qualche considerazione**. Cominciamo dai materiali con cui sono costruite arnie. Le figure 9 e 10 mostrano che nonostante il legno accumuli calore nella fase di riscaldamento e poi lo ceda quando il riscaldamento è spento, l'effetto complessivo è che **le arnie lignee conservano poco il calore**; il coefficiente di trasmissione termica (0.11-0.16), nettamente peggiore in confronto a quello delle arnie di polimeri (0.027-0.035), prevale pertanto sulla migliore capacità del legno di accumulare calore. **L'arnia a favo caldo fa più fatica a scaldare rispetto all'arnia equivalente a favo freddo, ma poi conserva il calore con la medesima efficienza in fase di raffreddamento. L'arnia di 42 mm ottiene un risultato migliore delle arnie da 25 mm**, da una parte perché lo spessore maggiore riduce la trasmissione di calore verso l'esterno, dall'altra in quanto la maggiore massa accumula energia quando il riscaldamento è acceso per cederla nella fase di raffreddamento. **Polistirene e polipropilene, nonostante abbiano poca massa capace di accumulare calore, fanno valere il loro migliore coefficiente di trasmissione termica. L'arnia Klima ottiene lo stesso risultato complessivo della Quarti 10, ma in un modo leggermente diverso**. Come si mostra in figura 12, la coibentazione della parete è migliore, grazie ai 2 mm aggiuntivi di EPP. Tuttavia il coprifavo e il bordo superiore in legno, la cui funzione è di dare stabilità alla costruzione, dissipano quanto guadagnato dal polipropilene rispetto alla Quarti 10, come appurato con una foto termica. L'arnia in legno rivestita di polistirene espanso può sfruttare al massimo la capacità del legno di accumulare calore, perché questo poi non può disperdersi grazie allo strato esterno di XPS. **Questa, del resto, è la conclusione a cui sono arrivate da tempo le scienze dei materiali: per migliorare la coibentazione delle case si devono usare all'interno materiali capaci di accumulare calore, mentre ciò che conta per le pareti esterne è una bassa trasmissione di calore, che peraltro non solo impedisce la fuga di calore durante l'inverno ma evita anche il surriscaldamento durante l'estate [22]. Questo suggerisce che la soluzione tecnica migliore sia quella di usare materiali a strati multipli, con legno all'interno e materiale a bassa trasmissione di calore all'esterno** - non necessariamente sintetico: il sughero, per

esempio, o la lana, hanno coefficienti k di poco superiori a EPS e XPS (0.036-0.038). Naturalmente questo comporta costi più elevati, ma anche risparmi energetici molto significativi, che non possono che tradursi in minori consumi e/o maggiore produttività delle api; inoltre i materiali multistrato non crepano.

Lo stesso si applica al coprifavo con uno strato di EPS. Il risultato relativamente modesto che ottiene, e in particolare il fatto che l'aggiunta di lana non migliora la coibentazione complessiva, dimostra che **la coibentazione applicata direttamente alla parete interna è meno efficace dell'applicazione di uno strato isolante dopo uno strato capace di accumulare calore, in modo da contribuire a ritenere l'energia termica**. Qualora un produttore si volesse cimentare, alla luce delle conclusioni cui si è giunti per l'edilizia occorrerebbe mettere lo strato di legno più spesso direttamente sull'arnia, con la coibentazione sul lato superiore.

Che un'arnia ben coibentata permetta di risparmiare energia è evidentemente una conclusione scontata. Poter quantificare (pur con tutti i limiti della strumentazione impiegata) permette di rendersi conto che, almeno potenzialmente, i risparmi sono notevoli. Occorre però metterli in prospettiva. **Solo una parte dei circa 50 kg di zuccheri¹⁷ (circa 61 kg di miele) consumati in un anno da una colonia sono dedicati alla gestione termica dell'ambiente dell'arnia, per il riscaldamento durante l'inverno e nelle notti primaverili, e per il raffreddamento nei giorni torridi d'estate; il rimanente serve per la crescita delle larve e per il normale metabolismo delle api. La dispersione termica torna ad assumere una significativa importanza anche in un altro processo energivoro del ciclo annuale delle api: durante l'evaporazione dell'acqua in eccesso nel nettare al momento del raccolto, processo che richiede un equivalente di energia che può raggiungere il 50% del raccolto stesso. Tanto più facilmente le api riescono a mantenere una temperatura elevata nell'arnia, tanto più efficiente è il processo di essiccazione del nettare, perché l'aria più calda può raccogliere e trasportare più vapore acqueo. Una buona coibentazione, dunque, accresce il raccolto perché riduce il fabbisogno di miele da trasformare in energia per l'evaporazione dell'acqua [25].**

¹⁷ Seguendo [8], il fabbisogno totale di ciascuna larva è 58.4 mg di zuccheri per il ciclo completo di sviluppo, mentre il fabbisogno di un'ape adulta è di 4 mg al giorno; su un totale di circa 200'000 larve allevate in un anno, e calcolando una durata media di vita di 45 giorni per le api adulte si arriva a un totale di circa 50 kg.

Cosa ne pensano le api? Il comportamento della colonia durante l'inverno

Le considerazioni avanzate sin qui sono state ottenute senza il coinvolgimento delle api. Si tratta ora di esaminare come reagiscono le dirette interessate a una coibentazione migliore.

È ben noto che le api regolano la temperatura dell'arnia. Durante l'inverno, nei periodi senza covata mantengono al centro del glomere temperature tra 20 e 30 °C, alla periferia circa 9 °C; quando allevano larve - solo al centro del glomere durante l'inverno, in buona parte del nido nel periodo di massimo sviluppo - le api regolano molto finemente la temperatura della covata, tra 34.5 e 36 °C a seconda del suo stadio di sviluppo (un paio di gradi in meno quando c'è covata di api invernali). Per buona parte dell'anno, dunque, la temperatura interna è maggiore di quella esterna, e per alcuni mesi il divario può essere considerevole.

Questo ovviamente richiede lavoro da parte delle api. Intuitivamente, tanto meglio il nido è coibentato, quanto minore è la quantità di energia che si disperde nell'ambiente, e quindi minori sono la quantità di zuccheri consumata, lo sforzo che devono fare le api e, in definitiva, il grado di stress a cui sono sottoposte¹⁸. **Come abbiamo visto, un'arnia ben coibentata comporta un notevole risparmio di energia nella struttura sperimentale che ho costruito. Qualora ciò si traducesse in risparmio di miele o in maggiore attività delle api a parità di consumo, sarebbe senz'altro significativa, e dovrebbe lasciare tracce evidenti sul comportamento delle api. Si tratta ora di verificare quali differenze si possono individuare nei principali parametri fisiologici di colonie ospitate in arnie ben coibentate oppure non coibentate.**

Materiali e metodo

Ho effettuato due confronti. Il primo tra due colonie diverse, una in un'arnia Dadant ben coibentata e l'altra in una

normale Dadant in legno, i cui parametri fisiologici sono stati misurati contemporaneamente e con i medesimi strumenti. Il secondo riguarda un'unica colonia, in un'arnia Warré a cui è possibile aggiungere e togliere uno strato coibentante.

Nel primo caso abbiamo dunque due colonie diverse nelle medesime condizioni ambientali, nel secondo la medesima colonia confrontata con sé stessa in tempi diversi e dunque con condizioni climatiche diverse. Ciò nonostante, le differenze tra arnia coibentata e non coibentata sono essenzialmente simili e sistematiche. Tutte le misure sono state effettuate durante l'intero inverno 2021-22.

La figura 13 illustra le arnie del primo esperimento. L'arnia blu è una normale Dadant prodotta industrialmente (Pitarresi). La coibentazione dell'arnia bianca consiste in uno strato di 4 cm di polistirene estruso (XPS) incollato su tutte le pareti di una normale Dadant commerciale, mentre il fondo consiste in un normale lamierino antivarroa. La chiusura del coperchio, anch'esso in XPS, è ermetica in alto e chiude piuttosto bene sulla giunta con il corpo dell'arnia. Il coprifavo è riempito di lana, e sul lato inferiore è ricoperto di materiale riflettente. L'apertura della porta di volo è limitata a 6.2 x 2 cm². L'arnia contiene 11 favi, di cui uno consiste in un diaframma in polistirene estruso. Si tratta della medesima arnia testata per la penetrazione delle condizioni ambientali i cui risultati sono riportati nella figura 2, ma differisce dall'arnia simile testata per la dispersione del calore prodotto all'interno che era rivestita con soli 3 cm di XPS e non aveva lo strato riflettente nel lato a contatto con il nido del coprifavo. Anche l'arnia in legno è coibentata con lana nel coprifavo. Entrambe le arnie sono dotate di bilancia e di 5 sensori di temperatura e di umidità, sistemati a spazi alterni tra i favi, a circa 15 cm dal frontale dell'arnia e 13 cm di profondità misurati dal bordo superiore dei telai (sistema



Figura 13 | Una normale arnia Dadant in legno (blu), e un'arnia simile rivestita di un manto isolante di 4 cm di XPS

¹⁸ Il sovraccarico energetico, sommato alle altre fonti di stress a cui le api sono soggette per parassitosi, patogeni, pesticidi, dieta carente ecc. può contribuire al collasso di colonie in equilibrio precario, o comunque a un ulteriore indebolimento che le renderà più suscettibili ad altre difficoltà.



Figura 14 | Un'arnia Warré, con e senza manto isolante (8 cm di XPS)

Due colonie nel medesimo ambiente esterno

Le figure da 15 a 19 riportano l'andamento delle temperature nelle due arnie Dadant nei mesi da novembre a marzo 2021-22. Le temperature dell'arnia coibentata sono sempre indicate con colori con toni rossi, quelli dell'arnia non coibentata in blu; i toni più marcati si riferiscono alle temperature più alte, situate al centro del glomere, quelli più pallidi alla periferia dell'arnia. A novembre, la colonia dell'arnia non coibentata ha avuto covata (indotta

dalla somministrazione di acido ossalico il 28 ottobre: v. [7]) fino al 22 novembre, riconoscibile dall'andamento piuttosto costante e superiore a 30 °C della curva del sensore centrale. A dicembre entrambe le colonie sono state prive di covata fino a fine mese quando, in corrispondenza di un periodo molto caldo e dell'abbondante disponibilità di polline (nocciolo), la colonia non coibentata ha iniziato la deposizione. La colonia nell'arnia coibentata ha seguito una settimana dopo, l'8 di gennaio; non al centro dell'arnia, però, bensì su un sensore laterale. Mentre i sensori dell'arnia non coibentata hanno segnalato temperature costanti e superiori a 30 °C solo sul sensore centrale, l'altra colonia ha raddoppiato pochi giorni dopo, il 14 gennaio, sul sensore successivo, verso il centro. Questa situazione si è protratta fino a metà marzo, quando entrambe le colonie hanno mostrato l'estensione della covata su un ulteriore sensore, la colonia non coibentata sempre mantenendo il centro termico al centro dell'arnia mentre la colonia coibentata per forza di cose sta estendendo il centro termico dalla periferia in direzione del centro dell'arnia.

<http://beepro.ch>, dati registrati ogni 2 minuti).

La figura 14 illustra l'arnia che ospita la colonia che ha fornito il secondo insieme di dati, con e senza la copertura esterna (8 cm di XPS). Anche il suo coprifavo è riempito con della lana, e il coperchio in polistirene è rimasto a protezione della pioggia per tutto il periodo. Le dimensioni dell'arnia sono più o meno quelle di un'arnia Warré: ciascun piano ospita 8 favi a favo caldo il cui spazio utile entro la cornice è metà di quello di una Dadant; il volume disponibile è dunque pari a circa 80% di quello di un'arnia Dadant, ma con strutturazione verticale anziché orizzontale. Le pareti sono di compensato marino, spessore 3 cm. Come indicato in [6], questa struttura - oltre ad avere una forma più simile a quella del nido naturale in un tronco d'albero (alto e stretto) - aiuta a disperdere meno calore rispetto ad arnie basse, strette e più voluminose come la Dadant. Le temperature e l'umidità relativa sono state misurate ogni minuto con due sensori Sensirion SHT31 smart gadget, posizionati al centro dello spazio tra terzo e quarto telaio, uno al piano basso e uno nel corpo alto dell'arnia.

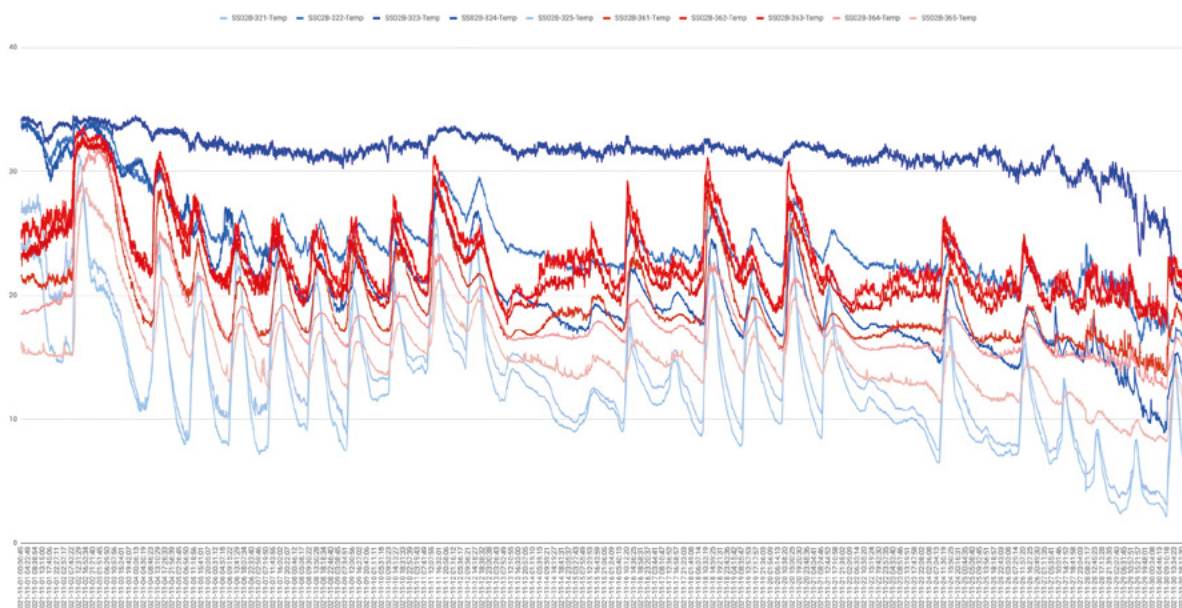


Figura 15 | Le temperature nelle arnie Dadant coibentata (linee rosse) e non coibentate (linee blu), novembre 2021. Ciascuna arnia è munita di 5 sensori, collocati negli spazi dispari tra telai. L'arnia non coibentata ha avuto covata fino al 22 novembre, come indicato dal sensore centrale con temperature quasi costanti > 30 °C

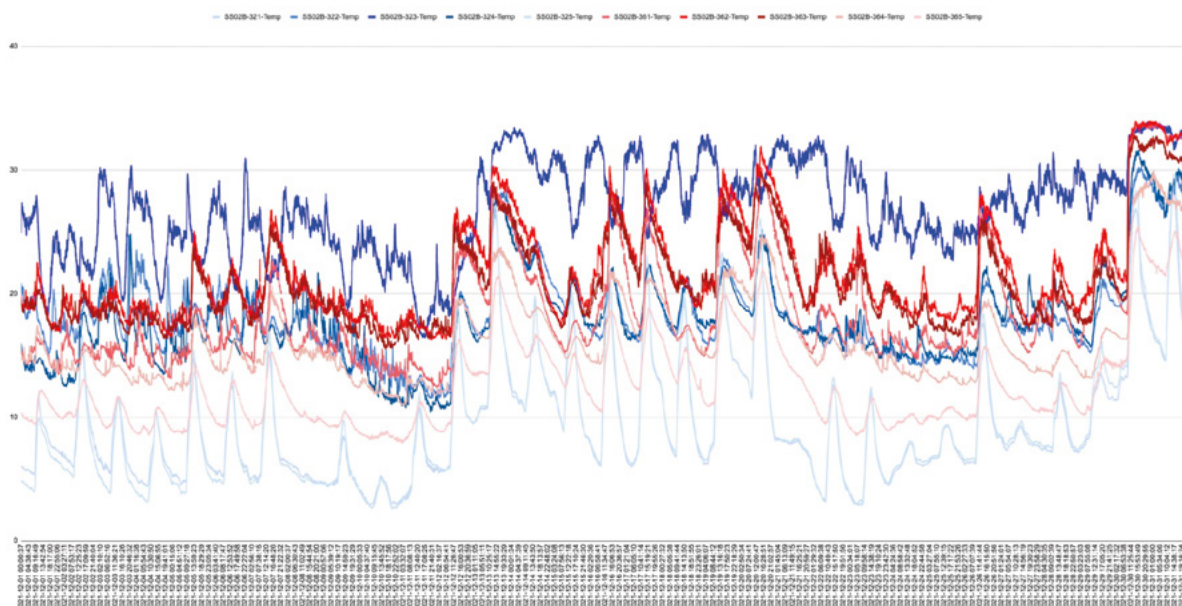


Figura 16 | Le temperature nelle arnie Dadant coibentata (linee rosse) e non coibentate (linee blu), dicembre 2021. Entrambe le arnie sono state prive di covata per quasi tutto il mese; il 28, nell'arnia non coibentata è iniziata la deposizione

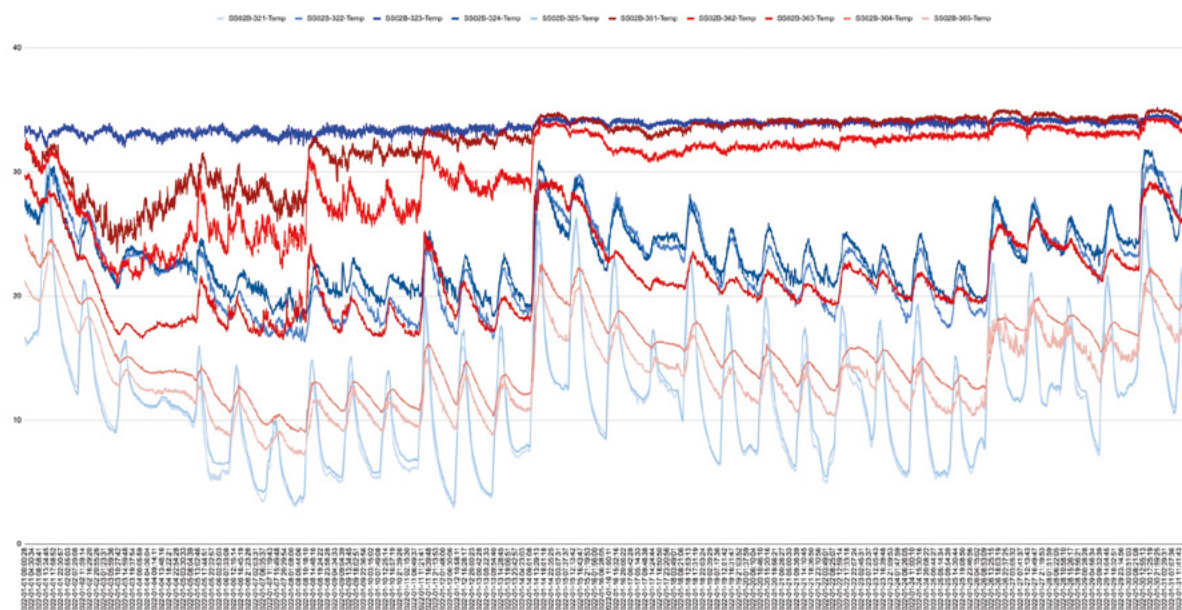


Figura 17 | Le temperature nelle arnie Dadant coibentata (linee rosse) e non coibentate (linee blu), gennaio 2022. Deposizione in entrambe le arnie, come indicato dalle temperature costanti e ben superiori a 30 °C dei sensori al centro termico (un solo sensore nell'arnia non coibentata, due in quella coibentata)

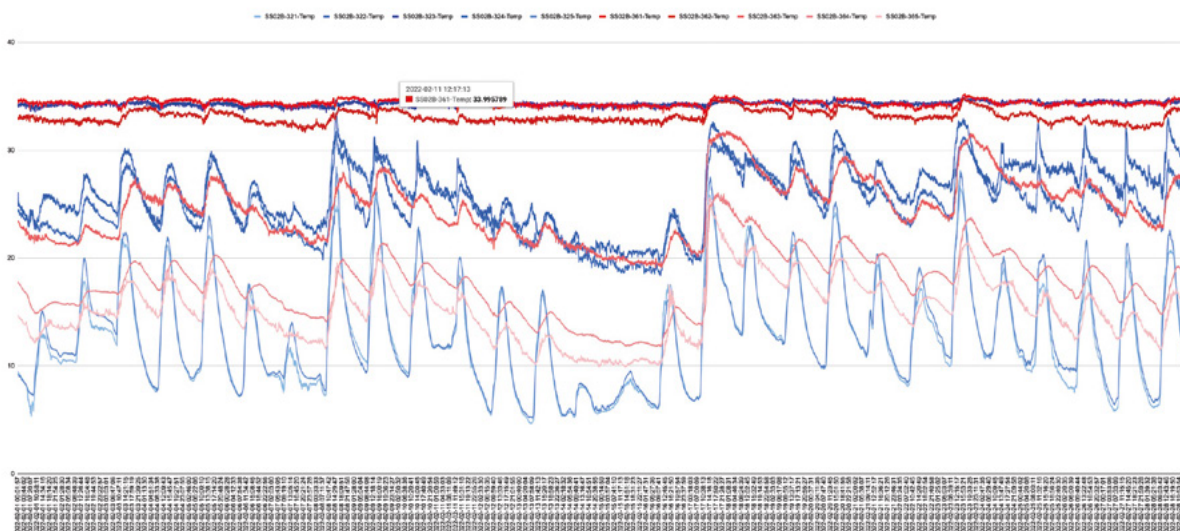


Figura 18 | Le temperature nelle arnie Dadant coibentata (linee rosse) e non coibentate (linee blu), febbraio 2021

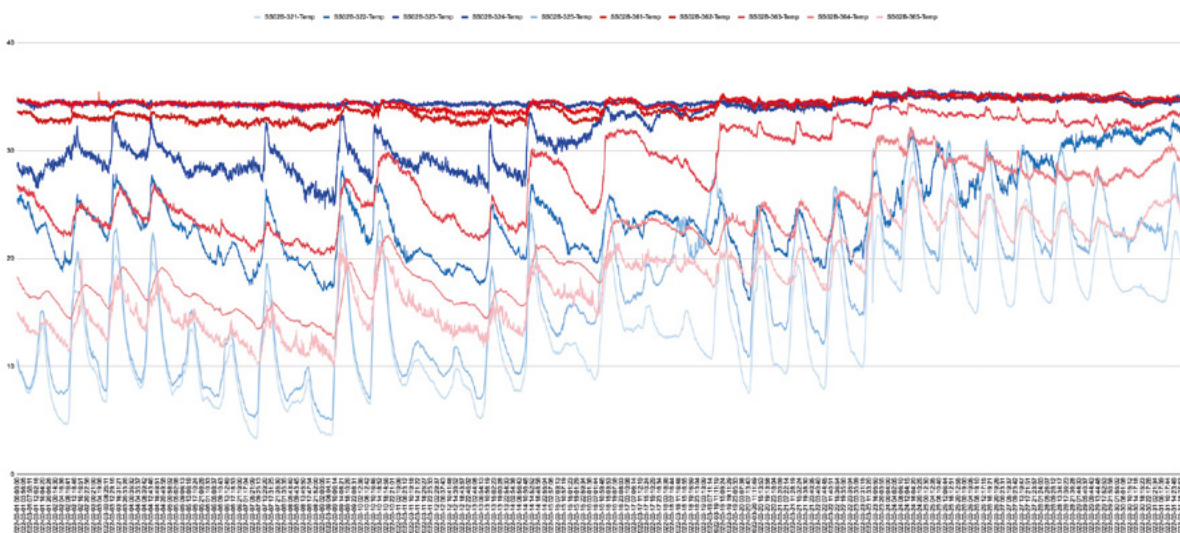


Figura 19 | Le temperature nelle arnie Dadant coibentata (linee rosse) e non coibentate (linee blu), marzo 2022. Dalla metà del mese, l'arnia non coibentata ha covato su due sensori, quella coibentata su 3

Mentre il limite superiore della temperatura è dato dalle esigenze della covata, arrivando a gravitare attorno ai 35 °C circa con pochissime deviazioni, i telai meno presidiati dalle api mostrano fluttuazioni molto più ampie, con diverse caratteristiche ben riconoscibili:

- 1) i sensori periferici indicano fluttuazioni più ampie che al centro (anche quando non c'è covata), essenzialmente seguendo l'andamento della temperatura esterna;
- 2) le fluttuazioni nell'arnia non coibentata sono più ampie di quelle dell'arnia coibentata;
- 3) l'escursione termica nell'arnia non coibentata è maggiore di quella delle temperature esterne, mentre nell'arnia coibentata è minore di quella esterna;
- 4) tra l'andamento della temperatura esterna e quella interna c'è un ritardo, molto maggiore nell'arnia coibentata rispetto a quella dell'arnia non coibentata;
- 5) infine, la temperatura minima nell'arnia coibentata è

parecchio maggiore di quella dell'arnia non coibentata.

Per illustrare meglio questi risultati, le figure da 20 a 24 riportano i dati relativi a un periodo più breve nel quale entrambe le colonie erano prive di covata. La figura 20 riporta i dati assoluti relativi alle due arnie tra l'1 e il 7 dicembre, con l'aggiunta della temperatura esterna (valori negativi di notte, fino a -5-7 °C di giorno). La figura 21 mostra l'andamento dei valori medi di ciascuna delle due arnie, e dello scostamento dalla media (*deviazione standard*), mostrando da un lato che mentre i valori medi sono abbastanza simili nelle due arnie, la *deviazione standard* è nettamente inferiore nell'arnia coibentata. Questo indica che nell'arnia coibentata le temperature sono molto più uniformi di quelle nell'arnia non coibentata.

La figura 22 riporta la **differenza tra temperatura massima e minima registrate all'interno di ciascuna arnia**. Nell'arnia coibentata è nettamente minore, e più costante, rispetto

a quella della colonia nell'arnia non coibentata: nella prima, la media delle differenze tra il punto più caldo e quello più freddo dell'arnia è di circa 9 °C, nell'arnia non coibentata di circa 17 °C, con sbalzi notevoli tra notte (valori quasi sempre superiori a 20 °C) e giorno, quando le api si muovono per qualche tempo dal centro alla periferia, uno spostamento del centro termico che invece non si registra nell'arnia coibentata. La figura 23 mostra come la differenza tra la temperatura minima nell'arnia e quella esterna sia nettamente maggiore nell'arnia coibentata (9 °C contro circa 5 °C), cosa che si traduce nella figura 24 in una differenza tra le temperature minime delle due colonie, con la famiglia dell'arnia coibentata che gode durante la notte di 4-5 °C più della famiglia nell'arnia di legno, differenza che si

annulla di giorno quando le api dell'arnia non coibentata si trasferiscono verso la periferia a prendere cibo, cosa che la famiglia al calduccio non ha bisogno di fare in modo così precipitoso perché sono più libere di muoversi.

La differenza di comportamento tra le due colonie è evidente: nell'arnia non coibentata, le api sono obbligate a mantenere il glomere stretto nelle ore più fredde durante la notte, con temperatura molto elevata al centro (tra 20 e 25 °C) e i telai di periferia non presidiati, dunque soggetti a temperature molto basse. Nell'arnia coibentata, il glomere è più rilassato: il centro termico oscilla tra 17 e 20 °C, e la periferia è mantenuta a 14-15 °C; solo lo spazio più periferico è abbandonato, e comunque riesce a mantenere una temperatura minima attorno ai 10 °C. Questo ha

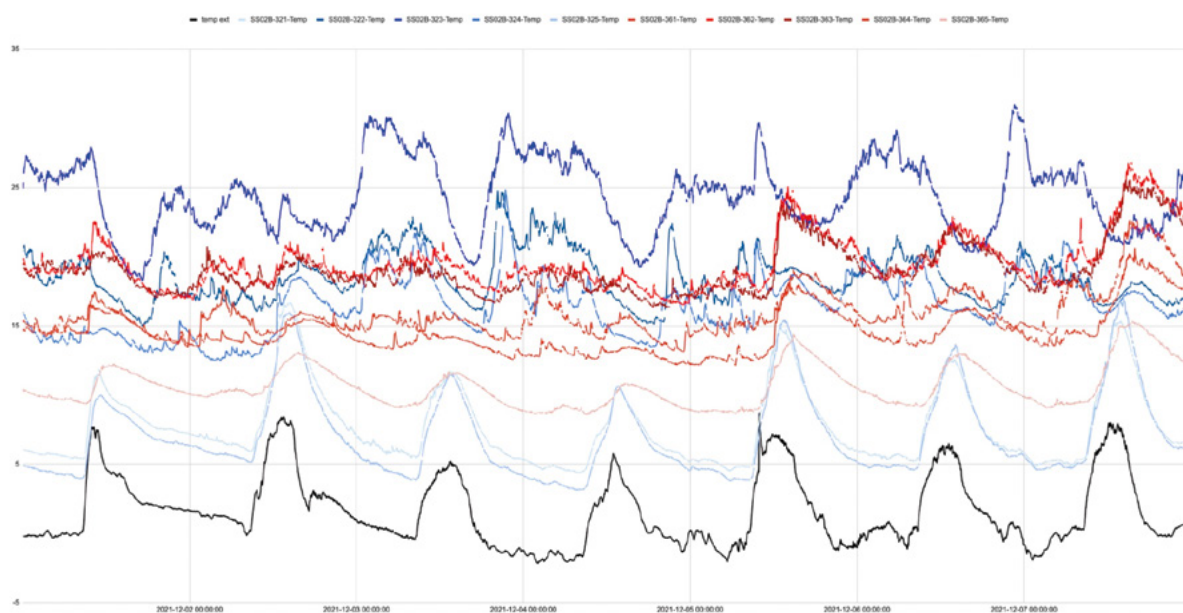


Figura 20 | Temperature nell'arnia coibentata (linee rosse), non coibentata (linee blu) e all'esterno (linea nera), tra 1 e 7 dicembre, entrambe le colonie sono prive di covata. Dati registrati ogni 2 minuti

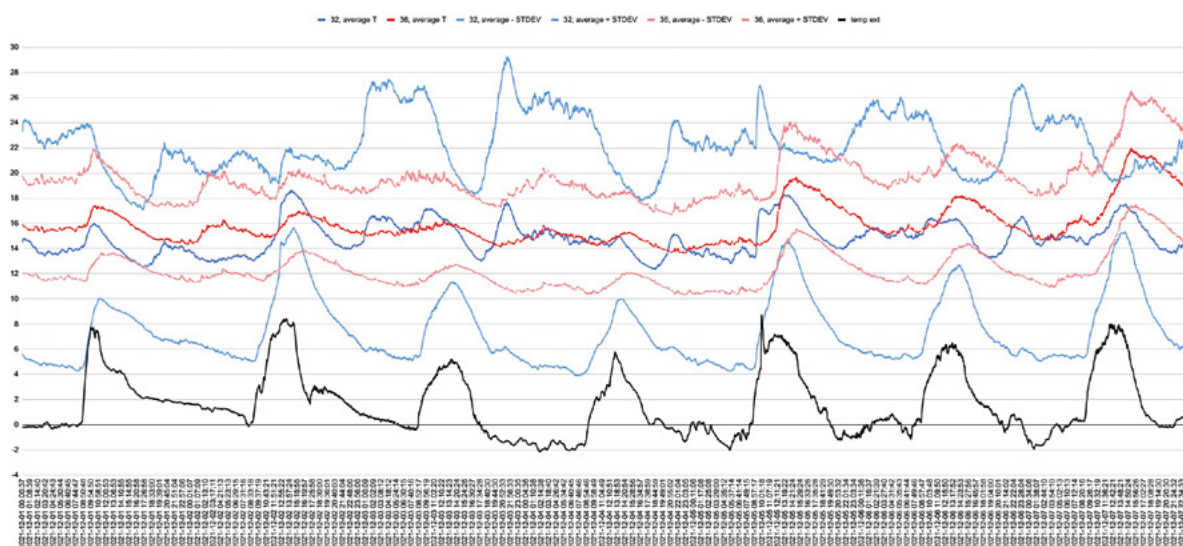


Figura 21 | Temperatura media (linee rossa e blu più marcate) e valore medio $\pm$ la deviazione standard dei dati di ciascuna misurazione (linee più leggere) nelle due colonie della figura 14. Nell'arnia non coibentata, le api sono concentrate attorno al centro termico, mentre nell'arnia coibentata le temperature sono molto più uniformi, con poca dispersione attorno alla media

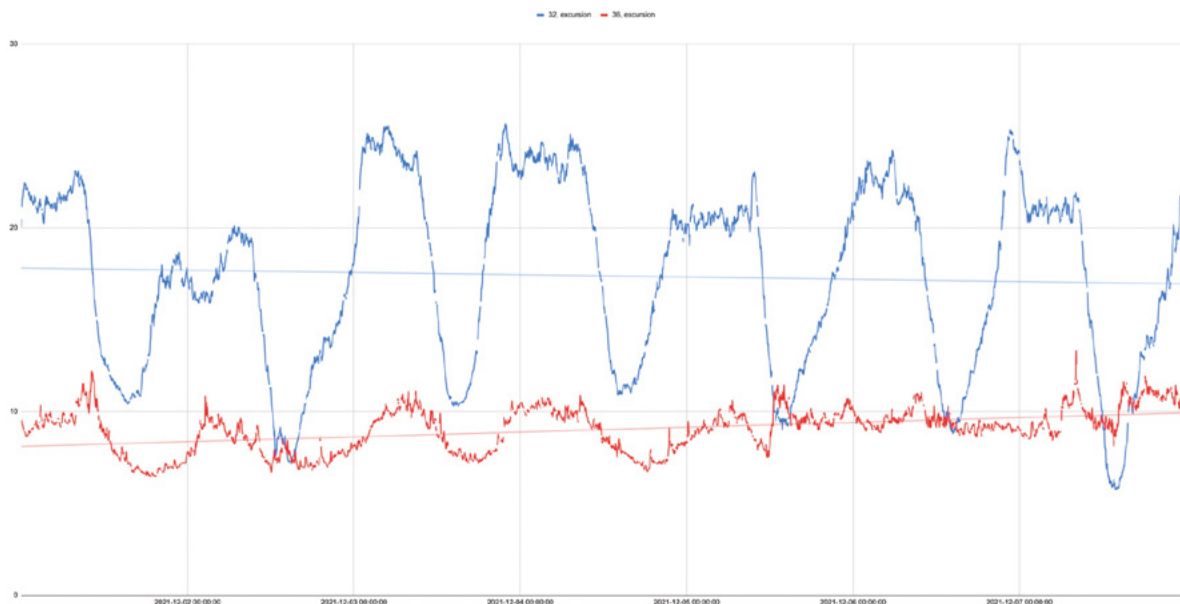


Figura 22 | Escursione termica (differenza tra le massime e le minime) registrata in ciascuna delle due arnie. Nell'arnia coibentata (linee rosse) la differenza media è attorno ai 9 °C, con poche deviazioni tra giorno e notte. Nell'arnia non coibentata (linea blu) la differenza media è di circa 17 °C, con punte fino a 25 °C durante la notte

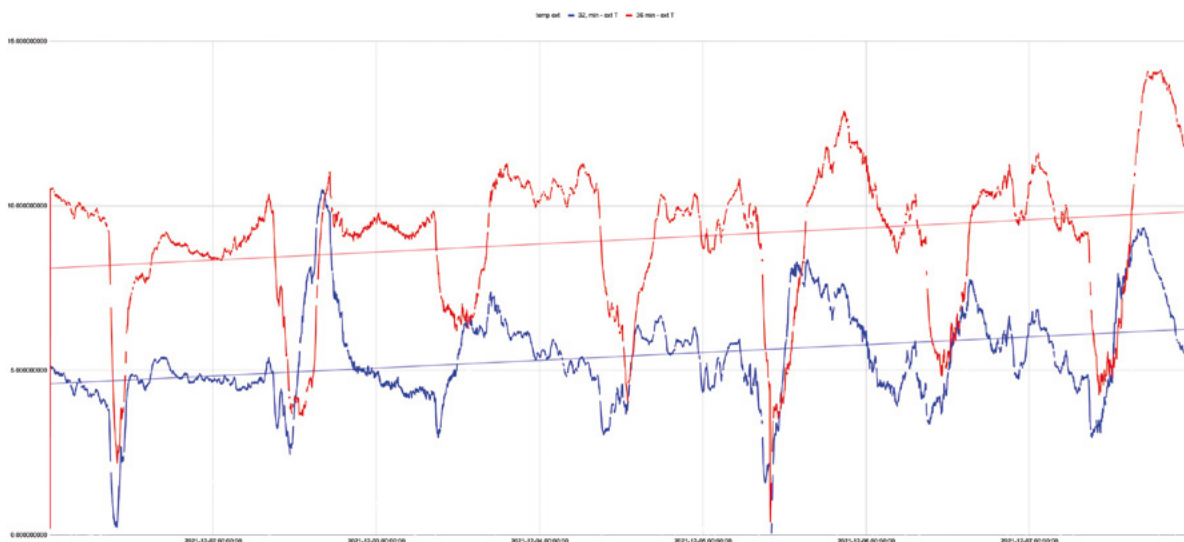


Figura 23 | Differenza tra le minime di ciascuna arnia e la temperatura esterna. Nell'arnia non coibentata (linea blu) la temperatura interna è mediamente di 5.4 °C superiore a quella esterna, nell'arnia coibentata di 9 °C

implicazioni di non poco conto: **nell'arnia non coibentata, le api si possono muovere solo se la temperatura esterna è sufficiente; in caso di freddo intenso e persistente, non si potrebbero muovere per andare a prendere scorte, e rischiano di morire di fame (ma a causa del freddo). Le api nell'arnia coibentata corrono molto meno questo rischio, essendo in grado di spostarsi più facilmente.**

Rimane una questione importante: se il calore prodotto dalle api si disperde meno grazie a una migliore coibentazione, mantenere la medesima temperatura media (in assenza di covata) dovrebbe permettere un certo risparmio energetico, esattamente come accade alle nostre abitazioni. I dati relativi al peso delle due arnie non sempre sono utilizzabili per diversi motivi, come l'applicazione di zavorre antivento o la nutrizione. Sono però privi di queste difficoltà i dati della seconda metà di dicembre, quando entrambe le colonie erano prive di covata, e dal 6 al 31 gennaio, quando

entrambe le colonie avevano covata. La figura 25 riporta i consumi di dicembre: **fintanto che nessuna delle due colonie aveva covata, i consumi sono stati piuttosto simili.** Sorge una divergenza negli ultimi due giorni del mese, quando solo la colonia nell'arnia non coibentata ha iniziato la covata - dovendo quindi mantenere una temperatura più elevata e avendo qualche bocca in più da sfamare. La figura 26 mostra **invece una netta divergenza nell'andamento del consumo a gennaio: quando i differenziali di temperatura tra interno ed esterno del glomere si sono fatti più seri in seguito alla presenza di covata, l'arnia coibentata ha mostrato la sua maggiore efficienza energetica, permettendo alla colonia che ospita di consumare il 40% in meno rispetto all'altra (50.6 contro 84.4 grammi al giorno), nonostante nell'arnia coibentata vi sia presenza di covata attorno a 2 sensori a partire dal 14 gennaio mentre nell'altra solo un sensore indichi covata.**

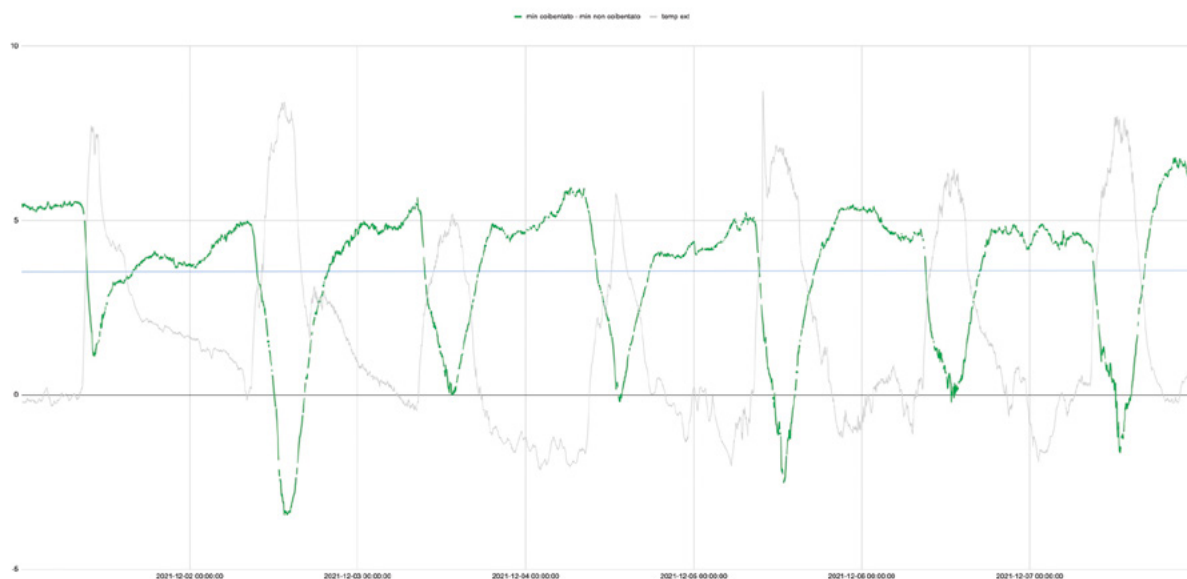


Figura 24 | Differenza tra le temperature minime registrate in ciascuna arnia nella prima settimana di dicembre 2021; in grigio, le temperature esterne. Durante la notte, l'arnia coibentata è di circa 5 °C più calda rispetto all'arnia non coibentata. Nelle ore più calde del giorno le differenze si livellano, la media è di 3.6 °C

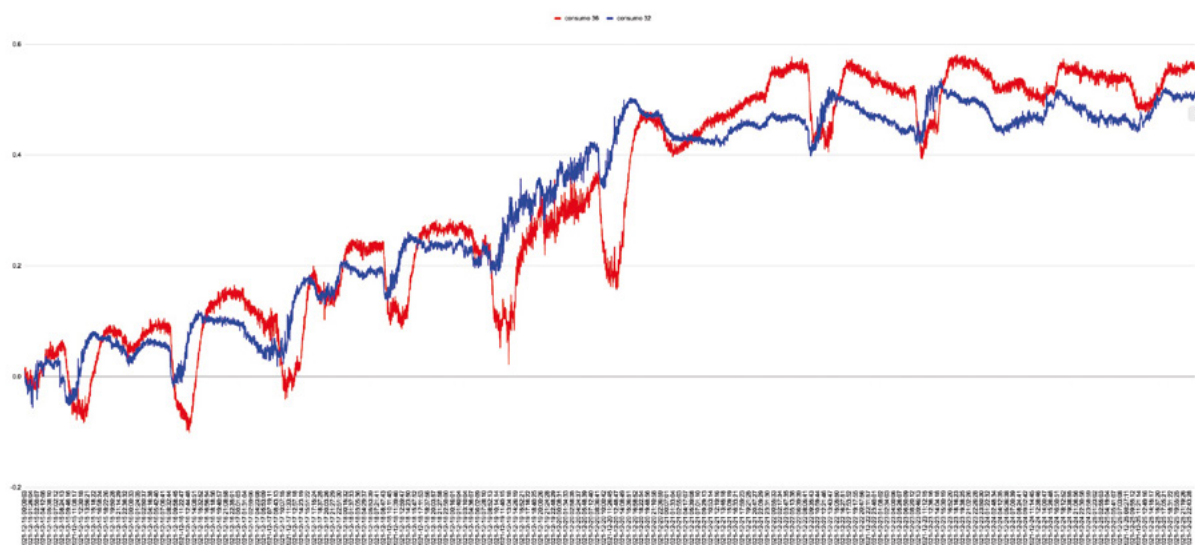


Figura 25 | Consumo dell'arnia coibentata (linea rossa) e non coibentata (linea blu) tra il 15 e il 25 dicembre 2021. Entrambe le colonie sono prive di covata. In questi 11 giorni, la colonia nell'arnia coibentata ha consumato 554 g (50.4 g al giorno), quella nell'arnia non coibentata 504 g (45.8 g al giorno)

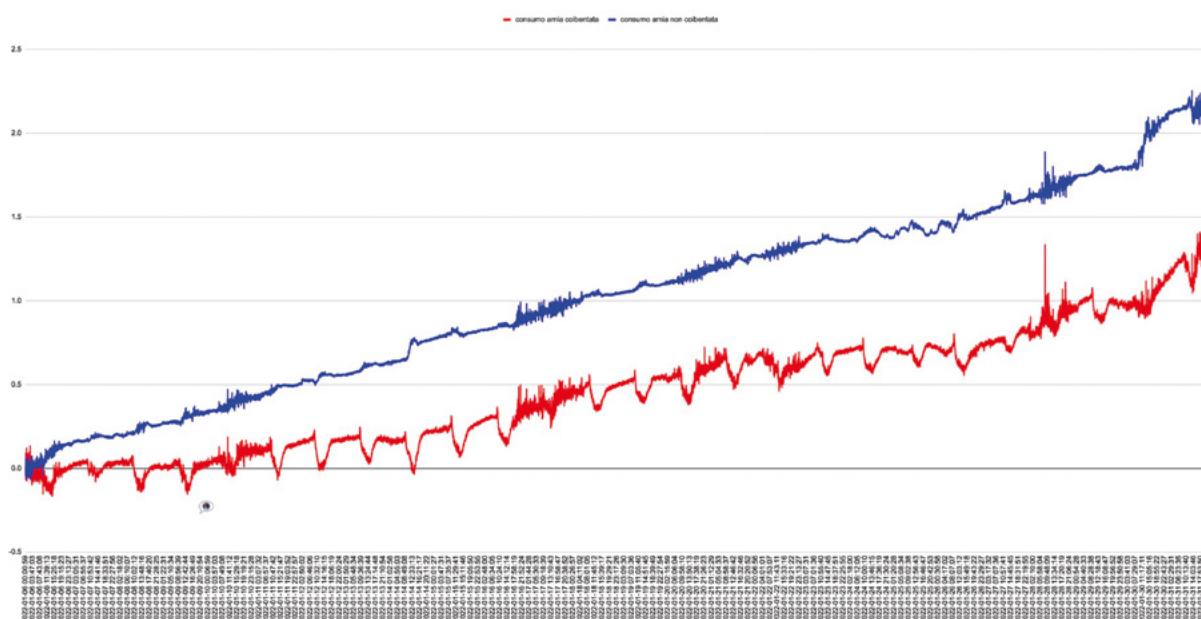


Figura 26 | Consumo dell'arnia coibentata (linea rosso) e non coibentata (linea blu) tra il 6 e il 31 gennaio 2022. Entrambe le colonie hanno covato. In questi 26 giorni, la colonia nell'arnia coibentata ha consumato 50.6 g al giorno, cioè come a dicembre (nonostante la covata), quella nell'arnia non coibentata 84.4 g al giorno, cioè quasi il doppio di dicembre

La colonia nell'arnia Warré, con e senza coibentazione

Le regine delle due colonie discusse nei paragrafi precedenti non sono parenti tra loro. Le differenze di comportamento potrebbero pertanto essere attribuite alle caratteristiche genetiche delle due famiglie. **Il secondo gruppo di misurazioni si riferisce invece ad un'unica famiglia, di cui si registrano le reazioni a condizioni esterne mutevoli.**

La figura 27 riporta le temperature registrate dai sensori del corpo alto (linea gialla), basso (linea rossa) e esterno (linea azzurra), e indica i periodi nei quali l'arnia portava il manto coibentante (dal 26 dicembre 2021 al 9 gennaio 2022, e ancora dal 19 gennaio al 5 febbraio 2022) o ne era priva (9-19 gennaio). La stabilizzazione della temperatura al

di sopra di 30 °C e la diminuzione delle sue fluttuazioni nel corpo alto a partire dal 18 gennaio indicano l'inizio della deposizione. Nel corpo basso dell'arnia, in presenza della coibentazione la temperatura minima raramente scende, di notte, al di sotto di 10 °C, indicando la presenza di api; senza coibentazione, le minime si avvicinano sensibilmente alla temperatura esterna, e scendono spesso al di sotto di 5 °C, indicando che le api hanno abbandonato la postazione e hanno stretto il glomere, spostandosi nella parte alta dell'arnia. **Questa prima indicazione conferma che una migliore coibentazione permette alle api di mantenere il glomere più rilassato.** Nel seguito ci concentreremo sulla temperatura nel corpo basso: in effetti, si vede molto bene

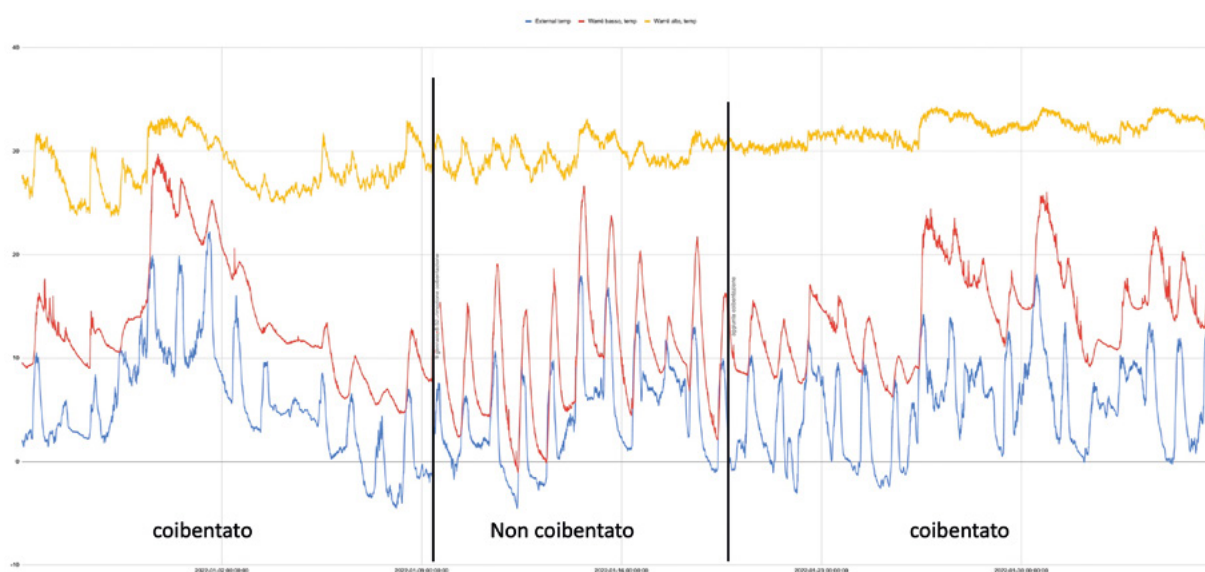


Figura 27 | Le temperature registrate nell'arnia Warré nel corpo alto (linea gialla), nel corpo basso (linea rossa) e all'esterno (linea azzurra), con l'indicazione della presenza o meno di coibentazione esterna

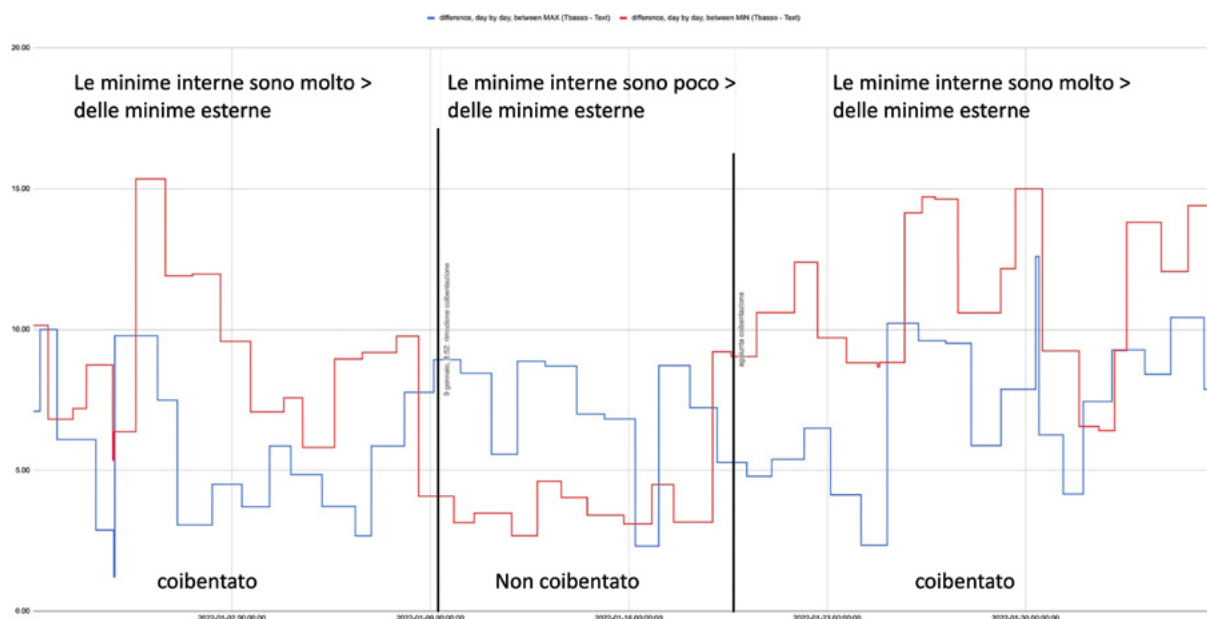


Figura 28 | Differenza, giorno per giorno, tra le massime del sensore nel corpo basso (periferico) dell'arnia Warré e della temperatura esterna (linea blu), e tra le minime all'interno e all'esterno (linea rossa)

che in alto la temperatura segue una linea di tendenza molto precisa, con una crescita regolare dal 4 gennaio che indica la preparazione e poi la stabilizzazione della covata. La figura 28 riporta la differenza, giorno per giorno, tra il massimo della temperatura indicata dal sensore in basso, e il massimo della temperatura esterna (linea blu), e tra i rispettivi minimi (linea rossa). Lo scopo del riferirsi ai massimi e minimi anziché calcolare la differenza tra interno e esterno punto per punto è di neutralizzare il fatto che le curve non sono sincrone, poiché gli effetti delle variazioni di temperatura all'esterno si fanno sentire con ritardo all'interno: ritardo che cresce sensibilmente con l'aggiunta della coibentazione. La linea blu della differenza tra i massimi oscilla giorno per giorno, ma attorno a un livello grossomodo costante. La linea rossa, invece, presenta un netto calo nel periodo in cui la coibentazione è assente, quando la differenza tra i minimi oscilla attorno ai 3 °C contro i 7-12 °C dei periodi con coibentazione. **La coibentazione garantisce dunque tra 4 e 9 °C in più nei momenti più freddi della giornata.**

La figura 29 riporta l'escursione termica all'esterno e all'interno dell'arnia, sempre con riferimento al corpo basso. Anche in questo caso, la differenza tra presenza e assenza di coibentazione è netta: quando l'arnia è termicamente bene isolata, le temperature interne oscillano meno di quanto non facciano le temperature dell'ambiente circostante l'arnia. In mancanza di coibentazione, invece, le fluttuazioni interne sono più ampie di quelle esterne. La coibentazione garantisce dunque una maggiore stabilità termica: **nell'arnia isolata, la differenza tra massime e minime si aggira attorno ai 5-7 °C, mentre senza coibentazione il divario è mediamente attorno ai 15 °C.**

Discussione

La coibentazione dell'arnia sembra indurre notevoli differenze nel comportamento delle api, sia che si confrontino allo stesso tempo due colonie diverse in

arnie con diverso grado di coibentazione nelle medesime condizioni ambientali o che si consideri la medesima famiglia in un'arnia a cui, in tempi diversi e con condizioni ambientali diverse, viene applicata o removed uno strato coibentante.

Considerazioni fisiche suggeriscono che un'arnia coibentata deve disperdere dalle pareti e dal coprifavo meno calore rispetto ad un'arnia della medesima forma ma priva di strato isolante. In effetti, le misurazioni effettuate su due arnie simili a quelle considerate nel primo gruppo di misure mostrano che **quella coibentata permette un risparmio energetico del 40% nel compito di far oscillare la temperatura interna tra 31 e 36 °C a circa 13 °C di temperatura ambiente. Questo significa che del calore prodotto dalle api, un quantitativo significativo è trattenuto nell'arnia dalla coibentazione.**

Come si traduce questa proprietà in comportamento delle api? **A dicembre, con temperature invernali non troppo rigide e in assenza di covata, le api mantengono una temperatura media simile nelle due arnie, ma in un modo molto diverso: nell'arnia non coibentata, le api mantengono un glomere stretto nei momenti più freddi della giornata e lo rilassano nei momenti caldi, approfittandone per andare a recuperare cibo nei favi periferici, trasferendo così calore dal centro alla periferia del nido. Nell'arnia coibentata, le api mantengono un glomere più largo, distribuendo meglio il calore all'interno del nido, dove hanno comunque una temperatura minima nettamente superiore a quella dell'arnia non coibentata e all'ambiente esterno. L'escursione termica tra i momenti più caldi e più freddi della giornata è molto minore rispetto a quella dell'arnia non coibentata. Senza covata, dunque, le api dell'arnia coibentata mantengono un glomere più rilassato e hanno più libertà di movimento; in questo periodo, il consumo di miele non differisce molto tra una colonia e l'altra.**

Diversa è la situazione quando le api allevano covata: questo le obbliga a mantenere una notevole differenza di

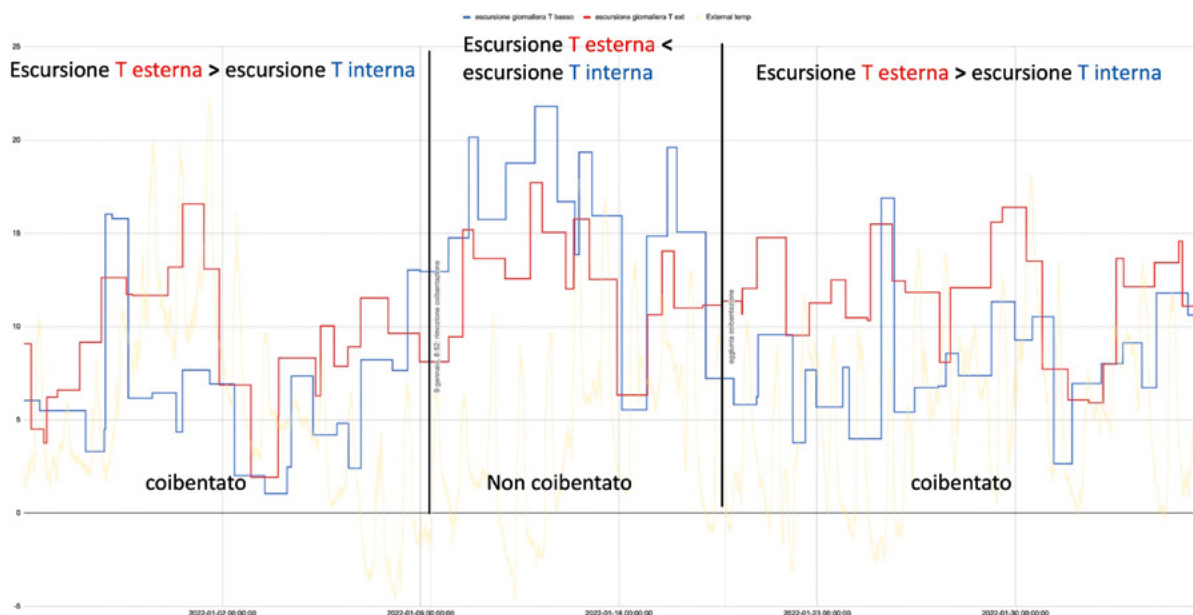


Figura 29 | Escursione termica all'interno del corpo basso dell'arnia Warré (linea blu) e all'esterno (linea rossa)

temperatura tra il centro del glomere e quella dell'aria a immediato contatto con il glomere. A questo punto, **anche le api della colonia coibentata si compattano, e anziché mantenere una configurazione del glomere più rilassata possono trasformare il beneficio del manto isolante in risparmio energetico. Mentre senza covata il consumo di ciascuna arnia è tra 45 e 50 grammi al giorno, nella fase con covata la colonia nell'arnia coibentata ha continuato a mantenere il medesimo consumo, mentre l'altra è stata obbligata ad aumentarlo e portarlo a 84 grammi al giorno** (vedi figure 25 e 26).

La compattezza del glomere si può misurare indirettamente tramite la *deviazione standard*, una misura statistica della dispersione dei dati rispetto alla media. La figura 30 riporta la *deviazione standard* delle temperature delle due colonie (rossa è sempre quella dell'arnia coibentata) in dicembre e gennaio. Nella prima metà del grafico, entrambe le colonie erano prive di covata. La deviazione standard della curva rossa è a un livello molto più basso rispetto a quella della linea blu, indicando che la colonia **nell'arnia coibentata mantiene una temperatura abbastanza uniforme nell'arnia**, con poca differenza tra le temperature nei favi più caldi e quelli più freddi, mentre la famiglia **nell'arnia non coibentata è già costretta a compattarsi** al centro del glomere e di notte non presidia i favi periferici. Le oscillazioni più ampie della curva blu indicano che nelle ore più calde della giornata il glomere si rilassa, le temperature al centro diminuiscono e quelle in periferia aumentano, diminuendo così la dispersione attorno alla media. A metà del grafico, corrispondentemente

alla prima settimana di gennaio quando le due colonie hanno iniziato la deposizione, entrambe le curve salgono: di poco quella blu, di parecchio quella rossa, indicando che la colonia nell'arnia non coibentata le api hanno fatto fronte all'aumento del divario tra temperatura esterna e interna, compattando ulteriormente il glomere, nei limitati margini ancora a disposizione, e **iniziando a produrre attivamente calore endotermico al centro. Nell'arnia coibentata, invece, le api avevano ancora un ampio margine per compattare il glomere, e l'hanno fatto senza avere bisogno di produrre calore endotermico** (come indicato dai consumi rimasti costanti): hanno semplicemente aggiunto il potere coibentante del glomere a quello dell'arnia¹⁹.

Come interpretare questa conclusione nel contesto di quanto si sa sul funzionamento del glomere invernale? Le indagini termiche sulle temperature invernali dell'arnia²⁰ hanno permesso di capire che il glomere è uno strumento essenziale per le api per combattere il freddo. **Le api reagiscono a cali di temperatura all'esterno formando il glomere quando la temperatura attorno a loro scende sotto i 15 °C circa**²¹. Mettendosi una vicina all'altra, evitano di esporre l'intera superficie del loro corpo all'aria fredda²². **Quando la temperatura dell'aria con cui sono a contatto scende o sale, le api reagiscono compattando o rilassando il glomere: tanto più il glomere è stretto, tanto minore è la superficie a contatto con l'aria e tanto maggiore il potere isolante del suo strato esterno, riducendo così la dispersione del calore che le api producono con il loro metabolismo.** Questo movimento di contrazione ed espansione avviene

¹⁹ Si noti che, coibentazione o meno, al culmine della stagione, quando vi è covata quasi su tutti i favi, la temperatura in tutte le arnie diventa praticamente uniforme a circa 35 °C o poco meno; la deviazione standard a quel momento cadrà vicina a zero.

²⁰ Il primo studio di dettaglio, basato su centinaia di termocoppie sistemate nell'arnia in una stretta griglia che ha permesso di individuare le isoterme in 3 dimensioni, risale a [29]. Owen aveva già notato che un'arnia coibentata tende ad avere il glomere meno compatto rispetto ad arnie non protette.

²¹ [39]; [20] indicano 14 °C, [36] riportano che il processo di aggregazione inizia a 18 °C, e che 14 °C è la soglia al di sotto della quale il glomere ha uno strato esterno compatto di api immobili.

²² Southwick [39] calcola che il semplice fatto di costituire un glomere riduce il rapporto tra massa e superficie esposta al freddo di quasi 23 volte.

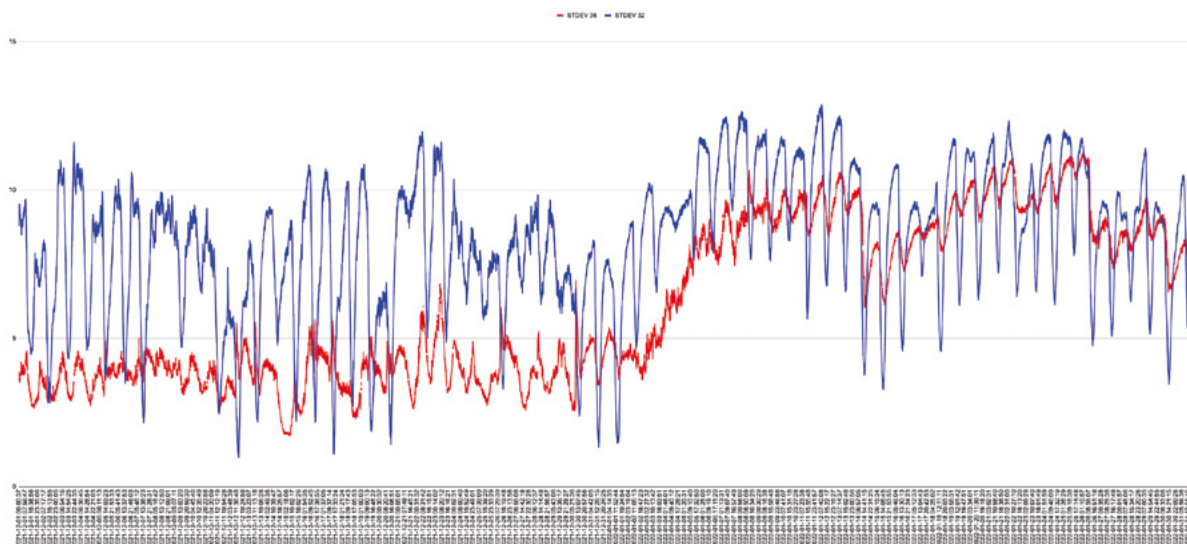


Figura 30 | La dispersione della temperatura attorno alla media (deviazione standard), dicembre 2021 (senza covata) e gennaio 2022 (con covata): entrambe le curve salgono con l'allevamento di covata, poco quella dell'arnia non coibentata (blu), molto quella dell'arnia coibentata (rossa)

sia a medio termine, quando si alternano periodi più caldi e più freddi, che in risposta alle fluttuazioni di temperatura tra giorno e notte: nei giorni relativamente caldi, le api si allontanano dal glomere per prendere cibo [36,p.211]. **Le api devono garantire che la temperatura dello strato periferico del glomere sia superiore a quella che impedirebbe alle api di restarvi attaccate, cioè attorno ai 7-9 °C. All'interno la temperatura varia tra i 18 e i 30 °C circa quando non c'è covata, e tra 34.5 e 36 °C quando invece ci sono larve e pupe (quando le api allevano api invernali, la temperatura è un po' più bassa, attorno ai 34 °C). Poiché il calore metabolico prodotto dalle api è sempre il medesimo, quanto più il glomere è compatto, tanto maggiore è la temperatura al centro.** Nei rilievi termometrici abbiamo dunque temperature elevate al centro e basse in periferia durante la notte, mentre col tepore del giorno il glomere si rilassa o addirittura si scioglie facendo crescere la temperatura in periferia e lasciando raffreddare, relativamente, il centro (vedi figura 20, in particolare le linee blu)²³.

Questo meccanismo è estremamente efficiente grazie all'ottimo potere coibentante del manto esterno del glomere, ma solo fino ad un certo punto: tra -3° e +8 °C circa (si parla sempre dell'ambiente immediatamente circostante il glomere), le api riescono a mantenere la temperatura desiderata semplicemente riducendo la dispersione del proprio calore metabolico²⁴. Al di sotto della soglia minima, sono obbligate a produrre calore addizionale²⁵: alcune di loro fanno vibrare la potente muscolatura del dorso, incrementando il loro metabolismo al di là di quanto necessario semplicemente per vivere, convertendo zucchero in movimento e dunque in energia calorica. Questa viene in buona parte conservata all'interno del glomere, che

ovviamente in queste condizioni è mantenuto stretto.

I dati esposti nei grafici sono coerenti con i risultati degli studi esistenti sul funzionamento del glomere, con l'eccezione di un aspetto specifico. Rispetto a una normale arnia in legno, un'arnia coibentata conserva una quota maggiore del calore che fuoriesce dal glomere per conduzione, per irradiazione e per convezione, aumentando in tal modo la temperatura al suo interno: come abbiamo visto nella figura 24, **la temperatura minima all'interno dell'arnia coibentata è mediamente di 3.6 °C superiore a quella dell'arnia non coibentata, così come il divario tra interno ed esterno (figura 23). Poiché il fattore percepito dalle api non è la temperatura esterna, ma quella vicino al glomere, la coibentazione ritarda di parecchio tempo l'insorgere delle condizioni che obbligano le api dapprima a formare il glomere, poi a stringerlo, ed infine ad iniziare a produrre calore al di là del proprio metabolismo.** Fintanto che entrambe le colonie si trovano nella zona nella quale possono limitarsi a mantenere la temperatura desiderata compattando il glomere, troveremo che il consumo di miele riflette esclusivamente il normale metabolismo della colonia. In queste condizioni, la famiglia nell'arnia coibentata ha un glomere meno stretto di quella dell'arnia non coibentata. Questa è situazione in cui entrambe le arnie si trovano a dicembre, in assenza di covata (figura 21).

Quando entrambe le colonie hanno covata, i dati mostrano un evidente aumento del grado di compattazione nella colonia coibentata (precedentemente rilassata), e un leggero aumento nella colonia non coibentata (già compattata in precedenza); per quanto riguarda i consumi, si registra un aumento molto marcato solo dell'arnia non coibentata, mentre le api nell'arnia coibentata continuano

²³ In assenza di covata vi è dunque una relazione inversa tra temperatura al centro e la temperatura ambiente in corrispondenza delle fluttuazioni tra giorno e notte, dalle quali dipende la contrazione del glomere: [36], p. 212.

²⁴ In questo intervallo, il metabolismo delle api è al minimo; l'intervallo viene appunto individuato misurando il metabolismo. Tuttavia, sull'ampiezza dell'intervallo c'è molta variabilità nella letteratura, probabilmente a dipendenza di altrettanta variabilità fra colonie di api (per caratteristiche genetiche, ma soprattutto per il numero di individui nel glomere); si veda una discussione in [18], pp. 483 e seguenti.

²⁵ Questa intuizione ha un lungo pedigree [18], ma per la dimostrazione si è dovuto attendere il lavoro di Stabentheiner e coautori, che hanno potuto misurare il calore prodotto individualmente dalle api per mezzo di fotocamere termiche [41].

a consumare lo stesso quantitativo di scorte (figure 13 e 14). Questo suggerisce che, grazie alla coibentazione, le api dell'arnia coibentata avevano ancora un margine di compressione del glomere sufficiente a garantire i 34 °C e oltre necessari alla covata. Questo mette in evidenza un fatto non rimarcato nella letteratura: il volume del glomere e/o il consumo della colonia sono solitamente espressi in funzione della *temperatura* ai margini del glomere stesso²⁶, ma qui entra in gioco un altro fattore: **la covata aumenta il differenziale di temperatura tra l'esterno e quanto desiderato dalle api** (mantenere una temperatura adeguata a restare vive, cioè almeno 18-20 °C circa al centro del glomere e 9 °C in periferia, quando non c'è covata, e 32-34 °C almeno al centro e i soliti 9 °C in periferia quando c'è covata). **Poiché i flussi di calore dipendono non dalla temperatura assoluta ma dalla differenza di temperatura, è chiaro che questa è la grandezza che conta:** la dispersione di calore dal glomere è certamente maggiore se la temperatura al centro è di 35 °C piuttosto che di 25 °C, ed è contro questa dispersione che le api devono tutelarsi, restringendo il glomere (finché hanno margini a sufficienza per farlo) e/o producendo calore endotermico. Questo è esattamente quanto è successo alle nostre due colonie: **al momento di iniziare la covata, la famiglia nell'arnia coibentata aveva ancora abbastanza margine per permettersi di proteggersi dalle fughe di calore semplicemente restringendo il glomere, senza necessità di produrre calore al di là del normale metabolismo.** Hanno dunque compattato il glomere, avvicinandosi al centro e riducendo la presenza sui telai periferici, il che ha aumentato la temperatura al centro e ridotto relativamente quella in periferia così che la *deviazione standard* delle temperature

dalla media è cresciuta parecchio. Al contempo, grazie a questa manovra le api hanno potuto mantenere i loro consumi al livello precedente. **Al contrario, le api nell'arnia coibentata non avevano più molto margine di manovra: hanno ristretto ulteriormente il glomere già molto contratto in precedenza, e corrispondentemente la deviazione standard è salita ma di poco; e per il resto hanno dovuto cominciare a scaldare, e i consumi sono corrispondentemente quasi raddoppiati.**

Qual è dunque il ruolo della coibentazione in questo meccanismo? Le relazioni principali sono descritte nello schema di figura 31. La temperatura esterna e l'architettura dell'arnia (in particolare la sua forma, volume e coibentazione) determinano i flussi di calore dall'esterno verso l'interno (quando fa caldo d'estate, e in inverno quando c'è il sole e le api non hanno covata) o dall'interno verso l'esterno (nei momenti freddi delle giornate invernali o quando le api hanno covata, durante la primavera e l'autunno, e nelle notti e i giorni piovosi d'estate). La produzione di calore (metabolico o endotermico) da parte delle api determina i flussi di calore dal glomere verso la parte non occupata dell'arnia e, alla fine, verso l'esterno. Di nuovo, l'architettura dell'arnia determina quanto di questo calore viene disperso all'esterno e in quanto tempo, e quanto invece rimane all'interno. Le api cercano un equilibrio tra questi flussi in modo tale da poter mantenere la temperatura desiderata al centro e alla periferia del glomere. Lo fanno adattando la concentrazione del glomere e, se necessario, producendo calore endotermico. La dinamica delle temperature dell'arnia dipende dall'interazione tra le fluttuazioni della temperatura esterna e dai tentativi delle api di regolare.

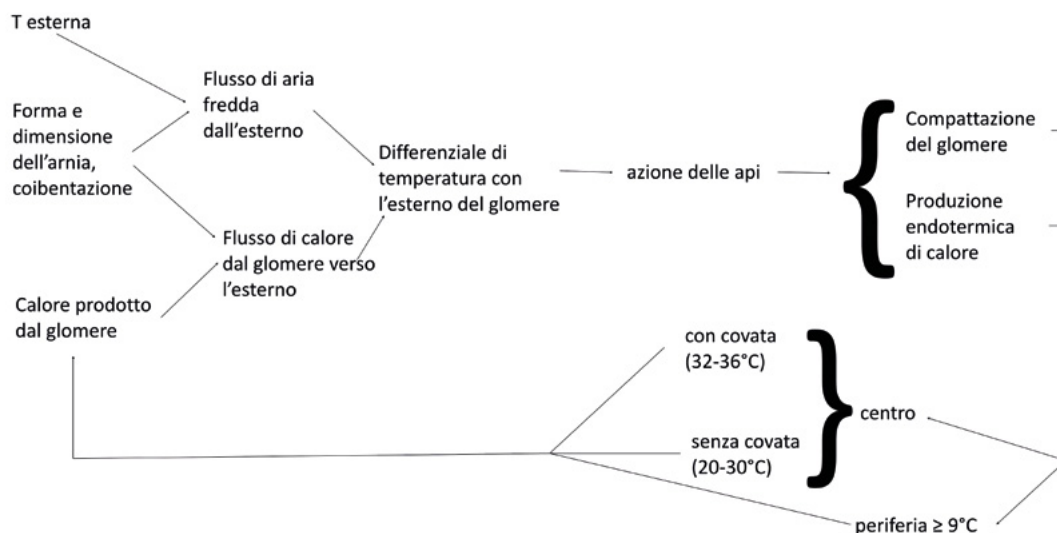


Figura 31 | Schema semplificato delle relazioni termiche tra glomere, temperatura esterna, e proprietà termiche dell'arnia. Va comunque ricordato che la temperatura interagisce con l'umidità: evaporazione e condensazione non solo dipendono dalla temperatura, ma a loro volta la influenzano. Occorre anche considerare che la produzione di calore tramite la combustione degli zuccheri del miele da parte delle api comporta come sottoprodotto rilevanti quantità di acqua, parte della quale evapora, parte è assorbita dalla covata, parte va evacuata

²⁶ Southwick [39], per esempio, esprime la produzione di calore come funzione lineare della temperatura vicino al glomere (p. 455), mentre Severson e Erickson esprimono volume e superficie del glomere in funzione della temperatura ambiente [37], p. 2. Anche nella modellistica matematica si assume che la temperatura del glomere dipenda dalla configurazione che le api assumono rispondendo a variazioni della temperatura ambiente, p. es. [42]. Se le api sono sempre senza covata, la temperatura del glomere (e dunque anche il differenziale con la temperatura esterna) dipende dalla stessa temperatura esterna. Ma se le api cambiano regime e iniziano ad allevare covata, la temperatura interna diventa grossomodo costante e rimane indipendente dalla temperatura ambiente. Se avviene questo cambio di modalità, è necessario adattare l'equazione di riferimento.

La coibentazione gioca un duplice ruolo. Da una parte, una migliore coibentazione smorza le conseguenze all'interno delle variazioni ambientali: come abbiamo visto in [6] e riassunto sopra, tanto migliore è la coibentazione e tanto minori e più ritardate sono le fluttuazioni di temperatura all'interno. Dall'altra, limitando la dispersione verso l'esterno del calore prodotto dalle api, la coibentazione tende a diminuire sia l'ampiezza delle fluttuazioni interne che il divario tra la temperatura dell'aria vicino al glomere e la temperatura del glomere stesso. Questo richiede un intervento meno drastico da parte delle api, facilitandole nel minimizzare le fluttuazioni di temperatura interna e permettendo loro di resistere a qualche grado addizionale di freddo all'esterno prima di far scattare la necessità di compattare il glomere e soprattutto di produrre calore endotermico. In quest'ultima fase (quando la temperatura esterna è molto bassa e/o le api allevano covata), **la coibentazione permette di risparmiare parecchia energia (e dunque miele), mentre nei periodi in cui la compressione del glomere è sufficiente per mantenere il calore metabolico le api traggono dalla coibentazione maggiore possibilità di movimento rispetto al glomere più stretto che devono mantenere nell'arnia non coibentata.**

La coibentazione porta inoltre vantaggi più indiretti: gestendo più facilmente le temperature durante la seconda parte dell'inverno e l'inizio della primavera, le api possono mantenere più covata, e rischiano meno di doverne sacrificare in caso di un ritorno di freddo. Dovendo lavorare meno per riscaldare, inoltre, le api delle arnie coibentate ossidano in misura minore la loro muscolatura alare e prolungano la loro durata di vita [27,44], e inoltre riducono il livello di stress dell'intera colonia, spiegando così la minore mortalità rilevata in letteratura [30,40]. Consumando meno miele, le api producono meno CO₂ e meno acqua di scarto metabolico, e hanno dunque meno urgenza di liberarsene.

Se i vantaggi sono chiari, va anche tenuto conto che coibentare arnie esistenti, o sostituirle con arnie nuove in polistirene o materiali simili, ha un costo monetario e/o di lavoro. **Un bilancio costi-benefici alle nostre condizioni ancora non è stato fatto, ma almeno i benefici in termini di salute delle api suggeriscono che vale comunque la pena fare qualche tentativo sperimentale**, che cerchi di coniugare i risultati empirici qui illustrati con la propria

prassi operativa e logistica. **Gli interventi più efficaci, peraltro, riguardano la coibentazione del coprifavo, che è la faccia più dispersiva delle casse in cui teniamo le api perché è il primo punto di separazione tra l'aria calda che sale dal glomere e il freddo esterno**, tende ad essere più sottile del resto della costruzione, e il buco per il nutritore è destinato a trasformarsi in un camino, mentre d'estate è sotto una lamiera che amplifica l'effetto dei raggi solari. **Usando un buon coibentante (come la lana, ormai praticamente un prodotto di scarto dell'allevamento) si può risparmiare parecchia energia sia d'inverno che d'estate a costo quasi zero. Sempre a basso costo, si può anche provare a sperimentare coi materiali riflettenti, come le coperte d'emergenza: non ho trovato letteratura in proposito, ma i francesi le usano da anni. Costano molto poco anche i distanziatori da 11 favi per arnie da 10, che permettono di compattare gli spazi e ridurre la dispersione di calore in inverno.**

Costruzioni più elaborate sono più complicate e costose, e occorre stare attenti a evitare di lasciare dei punti freddi o dei ponti termici che diventerebbero dei condensatori per l'umidità più elevata che si trova nelle arnie coibentate: umidità che non dà fastidio ed è anzi apprezzata dalle api finché rimane sciolta nell'arnia (cosa resa possibile dalle temperature più elevate) ma che potrebbe condensare a contatto con un punto freddo. **La soluzione ideale, naturalmente, è che intervenga l'industria di produzione di materiali apistici impiegando pannelli sandwich, con uno strato consistente di legno all'interno che svolga la funzione di accumulatore di calore, seguito da uno strato coibentante (meglio naturale, naturalmente), e infine uno strato esterno di protezione.** I costi sarebbero maggiori di quelli di una normale arnia in legno, ma anche la durata e i benefici. Se arnie simili sono abbastanza diffuse nell'Est europeo, non c'è ragione per le quali non possano esserlo anche da noi.

Conflitto di interessi

Le arnie Quarti 10 con il rispettivo coperchio, Gorri Klima e XLAM mi sono state gentilmente concesse in vista dei test dai rispettivi produttori, senza porre nessun vincolo o condizione. Per questo li ringrazio. I risultati riportati sono quelli che emergono dalle misurazioni effettuate, senza alcuna modifica.

- [1] H. F. Abou-Shaara *et al.*, Honey bee colony performance [enhanced] by newly modified beehives, *Journal of apicultural science* vol. 57 :2, 2013, pp. 45-57.
- [2] M. Alburaki e M. Corona, Polyurethane honey bee hives provide better winter insulation than wooden hives, *Journal of Apicultural Research*, 2022, vol. 61:2, pp. 190-196.
- [3] M. A. Al-Rajhi, Effect of shading and ventilation on the amount of water consumed for cooling beehive during summer season, *Misr Journal of Agricultural Engineering*, vol. 34:4, October 2017, pp. 1857-1868.
- [4] E.J. Anderson, Hive humidity and its effect upon wintering of bees, *Journal of Economic Entomology*, 41: 4, agosto 1948, pp. 610-611.
- [5] P. Aumeier e altri, Kälte, Nässe, nichts als Sorgen? *Schweizerische Bienenzeitung* 10/2021.
- [6] D. Besomi, L'ape e l'architettura, *l'apis*, novembre e dicembre 2020, gennaio 2021.
- [7] D. Besomi, Effetti a breve termine dell'acido ossalico sulle api, *l'apis*, gennaio 2022.
- [8] R. Brodschneider e K. Crailsheim, Nutrition and health in honey bees, *Apidologie* 41: 3, May-June 2010, pp. 287-294.
- [9] A. R. Bykov e G. A. Zaitsev, Impact of the design and material of the hives on honey production of bees, 2021 *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 839 022011.
- [10] D. Cook *et al.*, Thermal impacts of apicultural practice and products on the Honey Bee colony, *Journal of Economic Entomology*, 114(2), 2021, 538-546.
- [11] R. Conrad, To insulate or not to insulate?, *Bee Culture*, Sept. 2022, pp. 40-41.
- [12] A. Dodoglu *et al.*, Colony condition and bee behavior in honey bees (*Apis mellifera*) housed in wooden or polystyrene hives and fed 'bee cake' or syrup, *Journal of Apicultural Research* 2004, 43:1, pp. 3-8.
- [13] B. A. Eldarov *et al.*, Assessment of Wintering of the Caucasian Bee in Polypeneurethane and Wood Hives from a Comparative Perspective, *AIP Conference Proceedings* 2442, 020001 (2021).
- [14] J. Ellis, Insulating honey bee hives, *American Bee Journal* Aprile 2021, p. 373.
- [15] Y. Erdoğan, Comparison of colony performances of honeybee (*Apis Mellifera* L.) housed in hives made of different materials, *Italian Journal of Animal Science* 2019, vol. 18:1, pp. 934-940.
- [16] Floris *et al.*, The use of cork in the thermoregulation of the hive: an innovation attempt to enhance non-wood products and beekeeping in Mediterranean forests, *Annals of Silvicultural Research*, 2020, vol. 45:1, pp. 99-104.
- [17] E. H. Hazeloff, Ventilation in a bee-hive during summer, *Physiologia Comparata et Oecologia* 3: 4, 1954, p. 349.
- [18] B. Heinrich, The hot-blooded insects. Strategies and mechanisms of thermoregulation, *Berlin: Springer*, 1993.
- [19] B. E. Hemeida *et al.*, Effect of the internal size and thermal insulation of the hive on bee colonies [strength] and productivity, *J. Soil Sci. and Agric. Eng.*, Mansoura Univ., 2015, Vol. 6 (1), pp. 117-127.
- [20] T. S. K. Johansson e M. P. Johansson, The Honeybee colony in winter, *Bee World*, vol. 60: 4, 1979, p. 157.
- [21] T. Lepkova *et al.*, Studing the temperature microclimate in beehives made out of different materials, *Innovations* 2022, vol. X: 2.
- [22] L. Long e H. Ye, The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials: a simulation study, *Scientific Reports* 6:24181 | DOI: 10.1038/srep24181.
- [23] D. Mitchell, Ratios of colony mass to thermal conductance of tree and man-made nest enclosures of *Apis mellifera*: implications for survival, clustering, humidity regulation and Varroa destructor, *Int J Biometeorol* (2016) 60, pp. 629-638.
- [24] D. Michell, Engineering in the Honey Bee's relationship with the hive, in P. Nelson, *Variations on a beehive*, Hebdon Bridhe: Northern Bee Books, 2019.
- [25] D. Mitchell, Thermal efficiency extends distance and variety for honeybee foragers: analysis of the energetics of nectar collection and desiccation by *Apis mellifera*, *Journal of the Royal Society Interface*, 16 (150), 2019.
- [26] F. Moeller, *Overwintering of honey bee colonies*, US Dept of agriculture, 1977.
- [27] A. Neukirch, Dependence of the life span of the honeybee (*Apis mellifica*) upon flight performance and energy consumption, *Journal of Comparative Physiology B*, 1982, 146, pp. 35-40.
- [28] S. V. Oskin e D. A. Ovsyannikov, Modeling the Main Physical Processes in Beehives, *Biophysics*, 2019, Vol. 64, No. 1, pp. 129-136.
- [29] C. D. Owen, The thermology of wintering honey bee colonies, *USDA*, Technical Bulletin 1429, 1971.
- [30] S. Pătruică, e M. Bura, Researches on the Influence Exerted by Beehive Type on Bee Family Hibernation. *Scientific Papers: Animal Science & Biotechnologies / Lucrari Stiintifice: Zootehnie si Biotehnologii*, 2017, Vol. 50: 1, pp. 202-205.
- [31] E. F. Phillips, The insulating value of commercial double-walled beehives, *USDA*, Dept. Circular 222, 1922.
- [32] P. Pohl e T. Rogozinski, Influence of wall construction on thermal-insulating of Wielkopolski beehive, *Pszczelnicze Zeszyty Naukowe*, 1999, vol. 43:1, pp. 71-77.
- [33] R. W. Radcliffe e T. D. Seeley, Thinking outside the box: Temperature dynamics in a tree cavity, wooden box, and Langstroth hives with or without insulation, *American Bee Journal*, agosto 2022, pp. 893-898.
- [34] A. Satta e I. Floris, Effetti del sughero sull'isolamento termico e sulla termoregolazione dell'alveare, *APoidea* Vol. 1, 2004, pp. 80-87.
- [35] T. Seeley, *La vita delle api*, ed. Montaonda, 2020.

- [36] T.D. Seeley e B. Heinrich, Regulation of temperature in the nest of social insects, in B. Heinrich, *Insect thermoregulation*, New York: Wiley, 1981.
- [37] D. Severson e E. Erickson Jr., Quantification of cluster size and low ambient temperature relationships in the Honey bee, *Apidologie*, 1990, 21: 2.
- [38] E. E. Southwick, Thermal conductivity of wax comb and its effect on heat balance in colonial honey bees (*Apis mellifera* L.), *Experientia* 4111, 1985, pp. 1486-1487.
- [39] E. E. Southwick, Overwintering in Honey Bees: Implications for Apiculture, in R. E. Lee e D. L. Denlinger, *Insects at low temperature*, New York: Chapman & Hall, 1991.
- [40] A. St. Clair *et al.*, Honey bee hive covers reduce food consumption and colony mortality during overwintering, *PLoS ONE* 17(4): e0266219, 2022.
- [41] Stabentheiner e altri, Endothermic heat production in honeybee winter clusters, *Journal of Experimental Biology* 206, 2003, pp. 353-358.
- [42] D. J. T. Sumpter e D. S. Broomhead, Shape and dynamics of thermoregulating Honey bee clusters, *Journal of theoretical Biology* 204, 2000.
- [42] K. Toomemaa *et al.*, Determining the amount of water condensed above and below the winter cluster of honey bees in a North—European Climate, *Journal of Apicultural Research*, 52:2, 2003, pp. 81-87.
- [43] J. B. Williams *et al.*, Age and natural metabolically-intensive behavior affect oxidative stress and antioxidant mechanisms, *Experimental Gerontology* 43 (2008), pp. 538-549.
- [44] I. Zhelyazkova e S. Lazarov, Food consumption and winter mortality in bee colonies wintering in hives made from different materials with lattice and solid bottom, *Agricultural Science and Technology*, Vol. 13: 3, pp. 272-275, 2021.

