POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Biomedica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea Magistrale

Realizzazione di un sistema per il monitoraggio della temperatura e dell'umidità per la valutazione del comfort microclimatico

Relatore:

.....
Prof. Alberto VALLAN

Candidato:

.....
Michele TROTTA

Correlatore:

.....
Ing. Riccardo GASSINO

Dicembre 2018

INDICE

ABSTRACT **4**
INTRODUZIONE **5**
CAPITOLO 1. Fisiologia della termoregolazione umana **7**
1.1 Meccanismi di generazione del calore corporeo 8
1.2 Meccanismi di smaltimento del calore corporeo 9
1.3 Patologie legate alle variazioni della temperatura corporea 10
CAPITOLO 2. Metodi di valutazione del benessere termo-igrometrico **11**
2.1 Cenni di termodinamica 11
2.2 Comfort termoigrometrico: il modello di Fanger 14
2.3 Predicted Mean Vote (PMV) 17
2.4 Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) 17
2.5 Il microclima nei capi d'abbigliamento: analisi bibliografica 18
2.5.1 STUDIO 1: Benessere termoigrometrico in condizioni di sforzo fisico 18
2.5.2 STUDIO 2: Benessere termoigrometrico in presenza di escursioni termiche 21
2.5.3 STUDIO 3: Benessere termoigrometrico in ambienti freddi 25
CAPITOLO 3. Stato dell'arte **28**
3.1. Sensori di temperatura 28
3.1.1. Termocoppie 28
3.1.2. Termoresistenze 29
3.1.3. Termistore 30
3.2. Sensori di umidità relativa 31
3.2.1. Sensori di umidità relativa capacitivi 32
3.2.2. Sensori di umidità relativa resistivi 32
3.3. Sensori di temperatura e di umidità integrati 32
3.4. Manichini termo - riscaldati 35
3.5. MSR 147 WD Wireless Data Logger with plug-in Sensors 36
3.6. MSR 145 Mini Data Logger for Temperature, Humidity, Pressure, Light, Acceleration 38
3.7. iButton 40
CAPITOLO 4. Sistema di acquisizione **42**
4.1 Prototipo 42
4.1.1 Microcontrollore 44

4.1.2 Batteria LiPo 45
4.1.3 Adafruit SHT31-D Temperature & Humidity Sensor Breakout 46
4.1.4 Adafruit BME280 Humidity, Barometric Pressure, Temperature Sensor Breakout 48
4.1.5 Adafruit MMA8451 Accelerometer Breakout 48
4.1.6 Adafruit DHT22 Sensor 49
4.1.7 Termistori 50
4.2 Hardware definitivo 54
CAPITOLO 5. Realizzazione dei contenitori tramite stampa 3D 57
5.1 Realizzazione del contenitore per il trasmettitore 57
5.2 Realizzazione del contenitore per il ricevitore 58
5.3 Realizzazione dei contenitori per i sensori SHT31D e BME280 60
5.3.1 Realizzazione del contenitore per il sensore SHT31D 60
5.3.2 Realizzazione del contenitore per il sensore BME280 61
CAPITOLO 6. Sviluppo del software 63
6.1 Codice del microcontrollore trasmettitore 63
6.2 Codice del microcontrollore ricevitore 66
6.3 Codice acquisizione dati tramite linea seriale 67
CAPITOLO 7. Risultati 70
7.1 Prova 1: Test su volontario per la deteminazione della sensazione del discomfort. 70
7.2 Prova 2: Confronto con dispositivi commerciali. 90
Conclusioni e sviluppi futuri 97
Appendice 99
A1. Codice Trasmettitore 99
A2. Codice Ricevitore 104
A3. Codice Matlab per l'acquisizione ed il monitoraggio dei dati 105
Bibliografia 112

ABSTRACT

Body temperature and relative humidity are parameters that reflect the health state of an individual. In the medical literature, it is possible to find out different diseases related to an excessive increase or decrease of temperature from its normal value of 37°C. Nevertheless, the body temperature depends also on the physical activity done by the subject.

People doing sport activities are subjected to an increase in temperature and moisture. In this case a breathable sportswear must be taken into account in order to avoid a stagnation of sweat and a consequent discomfort sensation. Another field of study regards workers that need a protective clothing against, for example, biological agents, ionizing radiation or chemical substances. Since these kind of clothing are not breathable an increase of temperature and sweat is expectable. If this condition lasts over time, thecardiovascular system suffers excessive fatigue.

From this point of view, smart garments have been studied and developed in order to give a neutral thermal sensation to the wearers. Some of these researches have been mentioned in this work.

This master thesis work proposes the realization and the test of a wearable device that records temperature and relative humidity in seven parts of the human body thanks to four thermistors and three digital sensors. It sends the recorded data via radio. No wires are required. An internal rechargeable battery powers the device. The device is joined to a software that allows a real time monitoring of those parameters. The results of the first test on a volunteer have been compared with those of the Conconi test in order to determine the conditions characterized by the maximum temperature and relative humidity values in terms of power and heart rate. In the second test the device has been compared with two commercial solutions in order to determine the quality of the device itself.

INTRODUZIONE

La determinazione della temperatura corporea è un aspetto che viene associato, nell'immaginario collettivo, alla sola pratica clinica con lo scopo di identificare determinate condizioni patologiche. Al contrario la letteratura scientifica offre molti studi il cui scopo è quello di analizzare il comfort microclimatico. Le condizioni di neutralità termica sono quelle per cui la temperatura cutanea del tronco è compresa tra i 31°C ed i 33°C, mentre l'umidità relativa è inclusa tra il 40% ed il 60%. Questi studi si rivolgono principalmente a due tipologie di applicazioni.

La prima riguarda lo sviluppo e la produzione di indumenti per l'utilizzo sportivo. Questi devono saper coniugare da un lato leggerezza e versatilità per garantire i movimenti dell'atleta, dall'altro devono consentire un adeguato smaltimento del calore corporeo per poter garantire le migliori condizioni di esecuzione dell'attività. La seconda tipologia di applicazione è strettamente correlata alla medicina del lavoro e si rivolge, in particolare, a tutte quelle figure professionali che svolgono attività in ambienti in cui sono richiesti indumenti protettivi (agenti chimici/corrosivi, radiazioni ionizzanti, agenti biologici…). Quest'ultima applicazione, a differenza della prima, risulta molto più critica a causa della tipologia di questi tipi di indumenti. Siccome sono protettivi, talvolta ermetici, la traspirazione del sudore e lo smaltimento del calore corporeo risultano compromessi. Il sudore, infatti, gioca un importante ruolo termoregolatore solo nel caso in cui questo può evaporare. Diversamente si ha un ristagno tra la pelle e l'indumento con conseguente aumento della temperatura cutanea e corporea. Indipendentemente dall'applicazione, una temperatura corporea superiore al suo valore fisiologico per tempi prolungati può essere causa di patologie a carico del sistema nervoso e del sistema cardiocircolatorio.

Si rivela quindi importante sviluppare un sistema indossabile che consenta il monitoraggio di tali parametri per intervalli di tempo prolungati in maniera tale da saper identificare la condizione che, se protratta nel tempo, possa costituire un pericolo per l'individuo. Questi dispositivi risultano di grande aiuto anche nella progettazione di indumenti intelligenti svolgendo un ruolo attivo nel preservare una condizione di comfort microclimatico. Ad oggi è stato possibile perfezionare tali indumenti dotandoli degli stessi dispositivi di monitoraggio in maniera tale da intervenire specificatamente ad una determinata variazione di temperatura e umidità.

In questo lavoro di tesi vengono presentate ed illustrate tutte le fasi di realizzazione di un dispositivo indossabile per poter valutare il comfort microclimatico. Il Capitolo 1 descrive i modi in cui il corpo umano genera calore e come questo può essere associato a determinate patologie. Il Capitolo 2, dopo una serie di richiami termodinamici, si occupa della descrizione di un modello matematico il cui scopo è quello di valutare il comfort microclimatico. Tale Capitolo è accompagnato da un'analisi bibliografica sul microclima nei capi d'abbigliamento. Nel Capitolo 3 viene condotta una panoramica

sullo stato dell'arte dei sensori e dei dispositivi commerciali utilizzati per valutare il comfort microclimatico. Il Capitolo 4 illustra l'hardware del dispositivo, oggetto del lavoro, sia in fase di prototipo che in fase ultimata. Il Capitolo 5 tratta la progettazione di un contenitore esterno con lo scopo di conferire protezione ai componenti elettronici e facilità di utilizzo. Il Capitolo 6 è dedicato allo sviluppo dei software di acquisizione e visualizzazione dei dati acquisiti. Seguono la discussione dei risultati nel Capitolo 7 e le conclusioni. In Appendice sono riportati i codici di programmazione dell'hardware e del programma di gestione e rappresentazione dei dati.

CAPITOLO 1. Fisiologia della termoregolazione umana

Gli esseri umani sono degli organismi omeotermi in grado cioè di mantenere la temperatura corporea costante attorno ai 37 °C anche in presenza di variazioni della temperatura ambiente.
Questa peculiarità vale principalmente per il tronco, mentre gli arti seguono una tendenza eteroterme risultando più sensibili alle variazioni della temperatura ambiente [1.1].
La temperatura corporea viene tuttavia influenzata da una serie di fattori:

- attività fisica;
- digestione;
- sesso dell'individuo: le donne in età fertile hanno una temperatura basale maggiore di 0.5 °C durante la seconda metà del ciclo mestruale rispetto a prima dell'ovulazione;
- periodo della giornata: la temperatura basale ha un'oscillazione circadiana media di 0.6 °C al giorno [1.1] [1.2];
- presenza di condizioni febbrili.

Un qualunque organismo è in equilibrio termico con l'ambiente circostante quando il flusso di potenza termica entrante (contributo proveniente dall'ambiente) eguaglia quello uscente (contributo proveniente dall'organismo).
Come mostra la figura 1.1 il calore generato dall'organismo proviene essenzialmente da due fonti: metabolismo basale e contrazione muscolare. Questo viene rilasciato all'ambiente circostante attraverso meccanismi di irraggiamento termico, conduzione, convezione ed evaporazione [1.2].

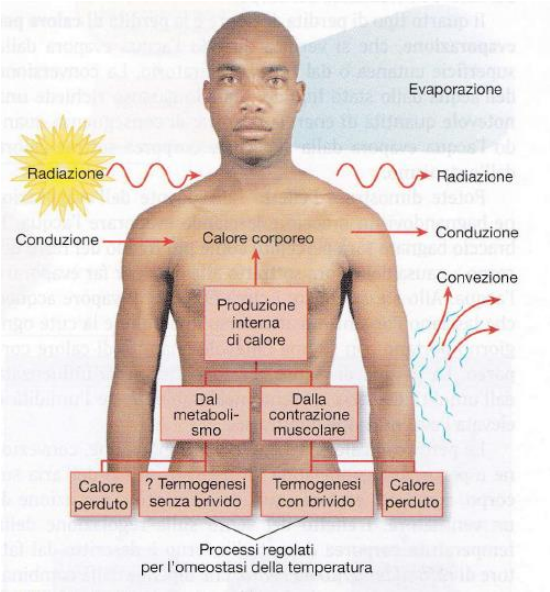


Figura 1.1 Meccanismi di emissione del calore [1.2]

1.1 Meccanismi di generazione del calore corporeo

Una buona aliquota del calore generato dal corpo umano deriva dal metabolismo energetico giornaliero. Un individuo sano in condizioni di riposo ha un fabbisogno giornaliero di circa 7 MJ/die (~ 80 W). Gli organi interni provvedono per circa il 56% alla produzione del calore, gli arti ed i muscoli per il 18%. Durante uno sforzo fisico il fabbisogno può aumentare fino a 11 MJ/die (~127 W) aumentando il contributo muscolare fino al 90% [1.1].

In particolari circostanze, in cui la temperatura ambiente è inferiore a quella corporea, l'organismo umano attua una serie di risposte fisiologiche per contrastare un'eccessiva dispersione termica. Queste risposte fanno parte di un processo noto come termogenesi. Esistono due tipologie di termogenesi:

- Termogenesi con brivido. La produzione di calore viene resa possibile sfruttando le contrazioni della muscolatura scheletrica. Tale fenomeno, parzialmente controllabile dall'individuo, può generare una quantità di calore 5 volte maggiore rispetto a quello generato dallo stesso muscolo a riposo;

- Termogenesi senza brivido. Il calore viene prodotto a partire dal tessuto adiposo bruno. Sfruttando il disaccoppiamento mitocondriale, l'energia accumulata durante la respirazione cellulare per la sintesi dell'ATP viene rilasciata sotto forma di calore [1.2].

La figura 1.2 riassume i meccanismi di smaltimento e produzione del calore in seguito ad una variazione di temperatura esterna.

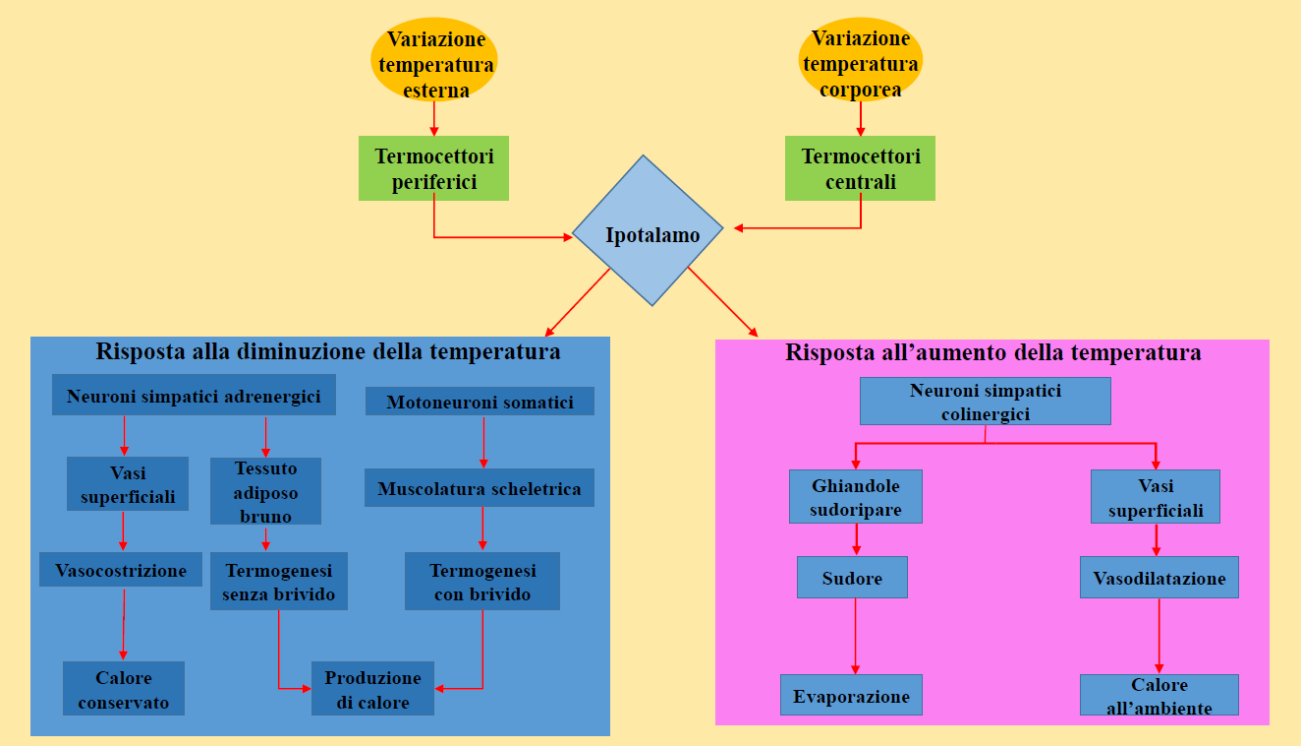


Figura 1.2 Meccanismi di risposta dell'organismo ad una variazione della temperatura ambiente [1.2]

1.2 Meccanismi di smaltimento del calore corporeo

A seconda della temperatura ambiente ciascuno dei quattro meccanismi (convezione conduzione, evaporazione, irraggiamento) è più preponderante rispetto agli altri. In particolare, ad una temperatura ambiente di circa 20 °C, l'emissione totale di calore avviene mediante irradiazione (61%), seguita poi dalla conduzione/convezione (26%) ed infine dall'evaporazione (13%). Ad una temperatura ambiente superiore ai 36 °C l'emissione totale di calore avviene esclusivamente per evaporazione [1.1].

La regolazione della temperatura in maniera automatica avviene nell'ipotalamo tramite i termocettori posti sotto la cute e nel centro dell'ipotalamo. L'ipotalamo ha un funzionamento molto simile a quello di un termostato: confronta il calore proveniente dall'ambiente, percepito con i termocettori sotto la cute, con quello proveniente dal tronco. Se la temperatura dell'ambiente è inferiore a quella corporea, l'organismo cerca di ridurre le dispersioni termiche attraverso la vaso costrizione e la termogenesi (con e senza brivido). Viceversa, quando la temperatura dell'ambiente è maggiore di quella corporea, l'organismo promuove il rilascio di calore attraverso la sudorazione e la vaso dilatazione [1.2].

Nel dettaglio il sistema nervoso autonomo regola la dilatazione e la restrizione dei vasi tramite i neuroni simpatici colinergici e adrenergici. I primi, tramite il rilascio di

sostanze vaso dilatatrici come l'ossido nitrico e l'istamina, promuovono l'aumento del flusso sanguigno nei vasi superficiali; i secondi causano un aumento della resistenza dei vasi superficiali convogliando il flusso ematico nei vasi più interni del corpo [1.2].

1.3 Patologie legate alle variazioni della temperatura corporea

Il discostamento della temperatura corporea dai suoi valori fisiologici (35.5 °C e 37.7 °C) può essere fonte di alcune patologie. Le patologie possono essere suddivise in ipertermie ed in ipotermie.
Fra le ipertermie si annoverano:

- Collasso di calore. Il collasso di calore è caratterizzato da una temperatura corporea compresa tra i 38 °C ed i 39°C. Si manifesta negli individui anziani in quanto la termoregolazione non è particolarmente efficace, negli individui adulti che svolgono attività fisica esponendosi ad elevate temperature ambientali e negli individui non acclimatati [1.2].

- Colpo di calore. Con una probabilità di morte pari al 50% dei casi, il colpo di calore rappresenta la forma di ipertermia più severa. Gli individui sono caratterizzati da una temperatura corporea superiri a quelle del collasso e sono privi di sensi. Diviene fondamentale intervenire per raffreddare l'organismo al fine di abbassare la temperatura in quanto, se la condizione persistesse nel tempo, potrebbe causare una denaturazione di alcune proteine dell'organismo con possibili danni cerebrali permanenti [1.2].

- Ipertermia maligna. È una condizione patologica di natura genetica dovuta ad una malformazione del canale calcio delle cellule della muscolatura scheletrica. Queste rilasciano una quantità eccessiva di ioni calcio nel citoplasma che vengono trasportati nel reticolo sarcoplasmatico e nei mitocondri per avviare l'idrolisi dell'ATP in ADP. La reazione di idrolisi è accompagnata da una produzione di calore responsabile dell'aumento della temperatura corporea[1.2]. L'incidenza di questa patologia è 1:400 individui [1.3]

Diversa condizione è rappresentata dall'ipotermia che consiste in una diminuzione della temperatura. Minore è la temperatura corporea minore risulta il consumo metabolico di ossigeno. Se tale condizione in cui versa l'organismo si protrae nel tempo si rischia la perdita di coscienza e possibili lesioni cerebrali [1.2].

CAPITOLO 2. Metodi di valutazione del benessere termo-igrometrico

Questo Capitolo è dedicato alla termodinamica degli scambi di calore volto all'ottenimento dell'equazione del benessere. Segue una trattazione sul modello di Fanger per la valutazione del comfort microclimatico. In ultima analisi vengono proposti 3 studi incentrati sulla caratterizzazione di alcuni capi di abbigliamento per il mantenimento del comfort termo igrometrico.

2.1 Cenni di termodinamica

In termodinamica per descrivere la quantità di calore da fornire ad un corpo per variare la propria temperatura si utilizza la capacità termica C_T [2.1], definita come:

$$C_T = \frac{Q}{\Delta T} \quad (J/°C)$$

In un organismo metabolicamente attivo la variazione di energia termica Q può essere espressa come [2.2]:

$$C_T\,\Delta T = (M - L) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + Q_c + Q_r + Q_k + Q_{ev}) \quad (2.1)$$

Dove:

- M: energia metabolica prodotta. Da non confondete questa grandezza con il "met" (1 met = 58.2 W/m^2). Il "met" è un flusso di potenza e viene misurato attraverso il metodo della calorimetria indiretta respiratoria determinando la quantità di calore prodotto dal corpo in base al consumo di ossigeno [2.2];
- L: lavoro meccanico svolto dall'organismo;
- $Q_{c,res}$: calore scambiato per convezione attraverso le vie respiratorie;
- $Q_{ev,res}$: calore scambiato per evaporazione attraverso le vie respiratorie;
- Q_c: calore scambiato per convezione attraverso la pelle;
- Q_r: calore scambiato per irraggiamento attraverso la pelle;
- Q_k: calore scambiato per conduzione attraverso la pelle;
- Q_{ev}: calore scambiato per evaporazione attraverso la pelle [2.2].

L'equazione (2.1) può essere espressa come funzione delle seguenti variabili:

$$C_T\Delta T = f(M,\ I_{cl},\ t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r, t_s, Q_{ev}) \quad (2.2)$$

Dove:

- I_{cl}: resistenza termica dell'abbigliamento. Spesso viene riferita con l'unità di misura "clo" (1 clo = 0.155 $\frac{m^2\,°C}{W}$). Questa variabile rappresenta la resistenza al flusso di calore generata dagli indumenti e dallo strato di aria presente tra il corpo e gli indumenti. Per valutare questo parametro si utilizzano dei manichini termo riscaldati posti in una camera climatica in condizionidi temperatura e umidità fissate. Il manichino viene riscaldato fino a raggiungere una temperatura superficiale pari a quella raggiunta da un volontario in condizioni di omotermia [2.2]. Misurando il calore rilasciato per convezione ed irraggiamento (Q_{CR}) è possibile ricavare la resistenza termica dell'abbigliamento:

$$I_{CL} = \frac{T_{PELLE} - T_{INDUMENTO}}{Q_{CR}} \tag{2.3}$$

Le Tabelle 2.1 e 2.2 riportano le resistenze termiche di alcune combinazioni di indumenti e dei singoli capi rispettivamente (normativa di riferimento: UNI EN ISO 9920 in materia di valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dei capi d'abbigliamento).

Abbigliamento	**I_{cl} (clo)**	**I_{cl} (m^2°C/W)**
Da lavoro		
Mutande, tuta da lavoro, calzini, scarpe	0.70	0.110
Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0.75	0.115
Mutande, camicia, tuta da lavoro, calzini, scarpe	0.80	0.125
Mutande, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	0.85	0.135
Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe	0.90	0.140
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1.00	0.155
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, tuta, calzini, scarpe	1.10	0.170
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante, tuta, calzini, scarpe	1.85	0.285

Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, giacca termica per l'esterno e pantaloni, calzini, scarpe	2.20	0.340
Giornaliero		
Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali	0.30	0.050
Slip, camicia a maniche corte, gonna, calze, sandali	0.55	0.080
Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe	0.60	0.095
Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe	0.70	0.105
Slip, camicia, gonna, maglione a girocollo, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe	0.90	0.140
Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1.00	0.155
Slip, blusa, gonna lunga, giacca, calze, scarpe	1.10	0.170
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, giacca, calzini, scarpe	1.30	0.200
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, cappotto, calzini, scarpe	1.50	0.230

Tabella 2.1. Resistenze termiche di alcune combinazioni di indumenti [2.2].

Capo di abbigliamento	I_{cl} (clo)
Maglieria intima	
Slip	0.03
Maglia a maniche corte	0.09
Maglia a maniche lunghe	0.12
Camicie	
Leggera, a maniche corte	0.15
Leggera, a maniche lunghe	0.20
Di flanella, a maniche lunghe	0.30
Pantaloni	
Corti	0.06
Leggeri	0.20
Normali	0.25
Abiti – gonne	
Gonna leggera (estiva)	0.15
Gonna pesante (invernale)	0.25

Abito leggero, a maniche corte	0.20
Abito invernale, a maniche lunghe	0.40
Maglioni	
Gilet	0.12
Maglione leggero	0.20
Maglione pesante	0.35
Giacche	
Giacca leggera (estiva)	0.25
Giacca pesante (invernale)	0.35
Accessori	
Calzini	0.02
Calzini pesanti lunghi	0.10
Calze di nylon	0.03
Scarpe (suola sottile)	0.02
Scarpe (suola spessa)	0.04

Tabella 2.2. Resistenze termiche dei singoli capi d'abbigliamento [2.2].

- t_a: temperatura dell'ambiente;
- p_a: pressione parziale del vapor d'acqua;
- v_{ar}: velocità dell'aria;
- $\bar{t}_r$: temperatura media radiante;
- t_s: temperatura superficiale della pelle [2.2].

L'equazione (2.2) lega variabili che dipendono dall'individuo (energia metabolica prodotta e resistenza termica dell'abbigliamento), dal microclima esterno (temperatura dell'ambiente, pressione parziale del vapore d'acqua, velocità dell'aria, temperatura media radiante), dalla temperatura superficiale della pelle e dal calore scambiato per evaporazione attraverso la cute.
In condizione di equilibrio termico ($\Delta T = 0$) l'organismo è nella condizione di omotermia. Tale condizione si traduce con l'affermare:

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r, t_s, Q_{ev}) = 0 \qquad (2.4)$$

Tuttavia la condizione di omotermia non implica una condizione di benessere termoigrometrico. Nel 1970 lo studioso Fanger ha proposto una definizione analitica di comfort termoigrometrico [2.2].

2.2 Comfort termoigrometrico: il modello di Fanger

Il modello di Fanger consente di affermare che la temperatura superficiale della pelle (t_s) e il calore scambiato per evaporazione attraverso la pelle (Q_{ev}) non sono delle

grandezze indipendenti ma dipendono dalle attività svolte dall'individuo in modo tale che maggiore è l'attività fisica, maggiore sarà la sudorazione e minore sarà la temperatura cutanea [2.2]. Fanger, tramite formule empiriche, ha permesso di stimare queste due variabili fisiologiche/metaboliche attraverso le formule (2.5) e (2.6) in condizioni di benessere:

$$t_s = 35.7 - 0.028(M - L) \tag{2.5}$$

$$Q_{ev} = \ 0.42\ [(\mathrm{M} - \mathrm{L}) - \ 58.15\ ] \tag{2.6}$$

Esprimendo t_s e Q_{ev}, come riportato nelle equazioni (2.5) e (2.6), e sostituendoli nell'equazione di bilancio (2.2) si ottiene l'equazione di benessere:

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r) = 0 \tag{2.7}$$

L'equazione di benessere consente di determinare quel valore di temperatura dell'aria, di temperatura media radiante, di umidità relativa, di velocità relativa dell'aria o di energia metabolica prodotta, noti gli altri quattro dati, a cui corrisponde una condizione di benessere termoigrometrico [2.2]. Le figure 2.1, 2.2 e 2.3 consentono di determinare rispettivamente il valore della velocità relativa dell'aria, della temperatura dell'aria e dell'energia prodotta dal metabolismo a cui corrisponde una condizione di benessere termico.

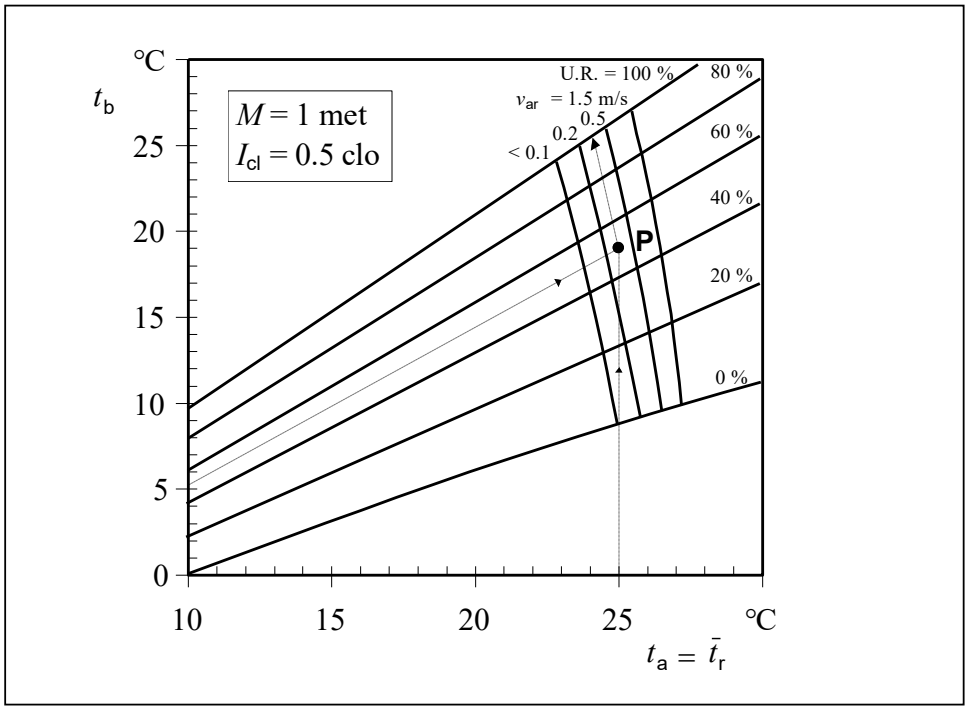


Figura 2.1 Condizione di comfort termico a temperatura aria di 25 °C, U.R.=50%. In queste condizioni il comfort termico viene ottenuto quando la velocità dell'aria $\boldsymbol{v_{ar}}$= 0.35 m/s [2.2]. Nel riquadro sono riportate le condizioni di test.

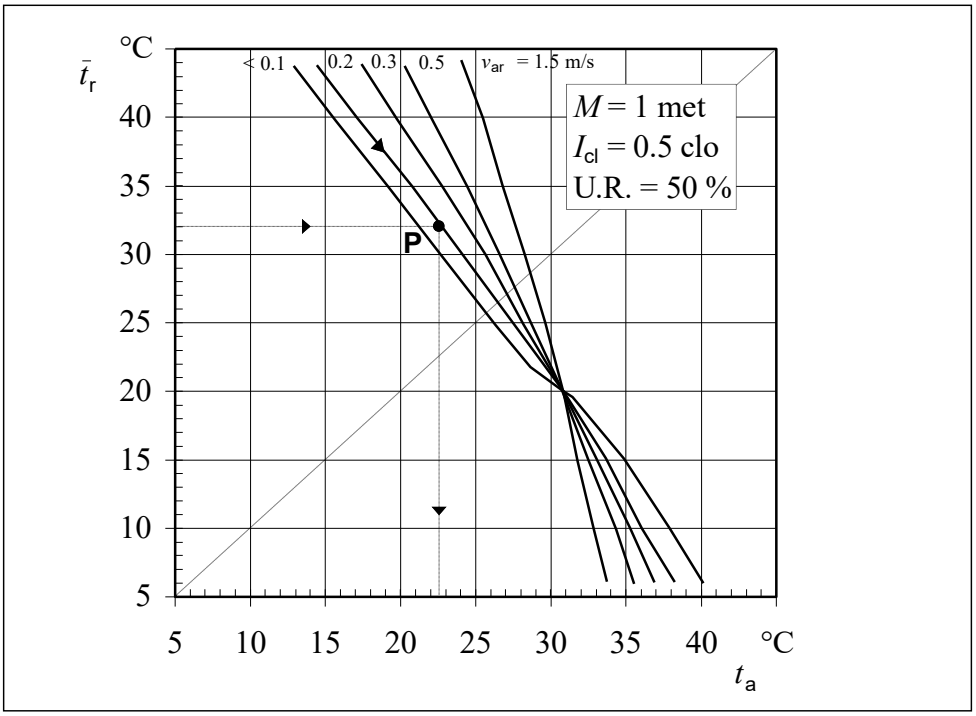


Figura 2.2 Condizione di comfort termico a temperatura aria di 22.5 °C e U.R.=50% e velocità dell'aria pari a 0.2 m/s. In queste condizioni il comfort termico viene ottenuto quando la temperatura media radiante è di 32°C[2.2]. Nel riquadro sono riportate le condizioni di test.

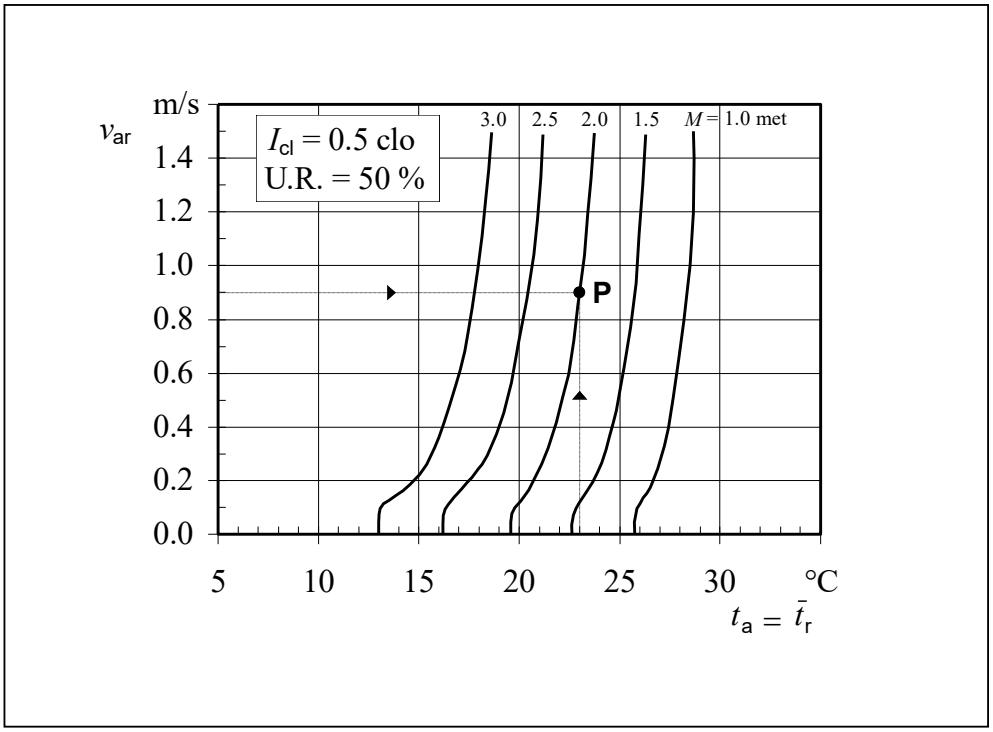


Figura 2.3 Condizione di comfort termico a temperatura dell'aria pari a 20°C e velocità dell'aria pari a 0.9 m/s. In queste condizioni il comfort termico viene raggiunto quando l'energia prodotta dall'organismo è pari a 2.0 met (116.4 W/m^2) [2.2]. Nel riquadro sono riportate le condizioni di test.

2.3 Predicted Mean Vote (PMV)

Introdotto da Fanger come risultato di un'indagine sperimentale su 1296 volontari il PMV è un indice che viene utilizzato per assegnare un valore numerico ad una specifica sensazione termica percepita dall'individuo. Come mostrato nella tabella 2.3 questo indice prevede una scala di sette livelli di giudizio che spaziano da una sensazione di freddo a caldo severi [2.2].

INDICE ASSEGNATO	SENSAZIONE
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Tiepido
0	Neutro
-1	Fresco
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Tabella 2.3. Assegnazione del valore dell'indice PMV alla sensazione termica percepita [2.2].

È possibile esprimere il PMV in funzione del calore prodotto dal metabolismo (M) e del carico termico (Q) come riportato nella seguente formula:

$$PMV = (\,0.303\, e^{-0.036\, M} + \,0.028)\, Q \tag{2.8}$$

Il carico termico è definito come la differenza tra il calore prodotto dall'organismo per una certa attività ed il calore ceduto all'ambiente nel compiere la medesima attività in una condizione di benessere termoigrometrico [2.2].

2.4 Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

Uno dei limiti del PVM risiede nel fatto che i giudizi negativi di una parte dei volontari (Molto caldo, Caldo, Freddo e Molto freddo) vengono fortemente mascherati dal giudizio medio a cui è stato sottoposto l'intero campione di individui. Il PPD è un indice che riporta, per ogni sensazione di comfort termico PVM la percentuale di volontari che riferiscono di una sensazione di discomfort classificando come "insoddisfatti" tutti quei volontari che assegnano un punteggio pari a +3, +2, -2, -3 [2.2].
È possibile determinare il PPD a partire dal PVM attraverso la relazione 2.9:

$$PPD = 100 - 95\, e^{(\,-0.03353\, PMV^4 - \,0.2179\, PMV^2)} \tag{2.9}$$

Andando a rappresentare, in figura 2.4, l'equazione (2.9) si può osservare che anche in condizioni di comfort (PVM=0) la percentuale di volontari insoddisfatti è pari al 5% [2.2].

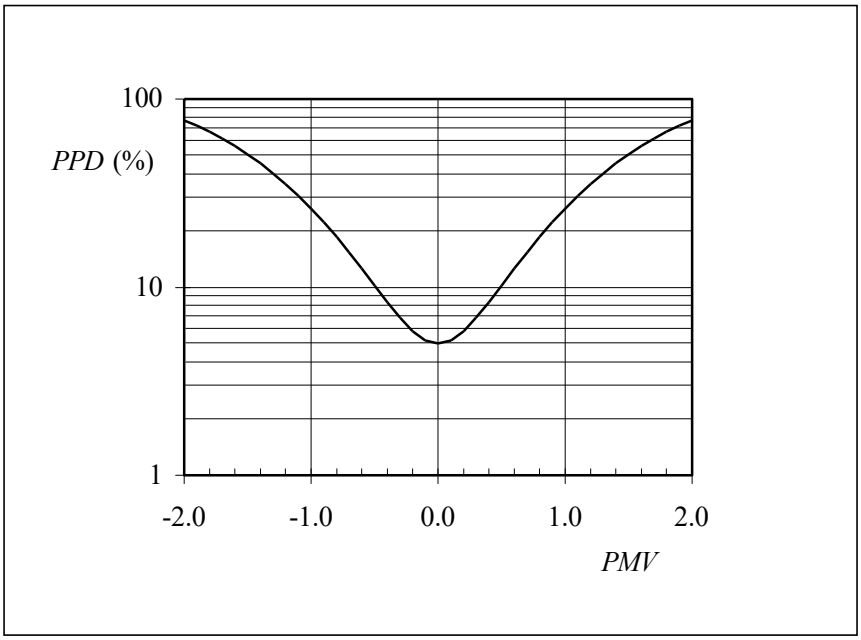


Figura 2.4 Percentuale di insoddisfatti (PPD) in funzione del Voto previsto medio (PMV) [2.2].

2.5 Il microclima nei capi d'abbigliamento: analisi bibliografica

Nei paragrafi precedenti è emerso che una variazione eccessiva di temperatura e umidità rispetto alla condizione di riposo può causare una sensazione di discomfort climatico. Per l'umidità relativa, ad esempio, valori compresi tra il 70% e l'80% causano eccessiva sudorazione e dispnea [2.3]. Molte risorse si concentrano sullo studio di tessuti che vengono utilizzati nella realizzazione di indumenti protettivi cercando di garantire una traspirazione del sudore ed uno smaltimento del calore prodotto. Questo ambito è molto critico in quanto spesso l'indumento per essere protettivo non consente in alcun modo la traspirazione causando, inevitabilmente, discomfort climatico.
Nei tre successivi sotto paragrafi verranno illustrati tre studi volti a valutare il benessere termoigrometrico in condizioni di sforzo fisico (studio 1), in presenza di ampie escursioni termiche (studio 2) ed in ambienti freddi (studio 3).

2.5.1 STUDIO 1: Benessere termoigrometrico in condizioni di sforzo fisico

In presenza di sforzi fisici l'articolo "Influence of undergarment structure on the parameters of the microclimate under hermetic protective clothing" di G. Bartkowiak [2.3] esamina le variazione di temperatura e umidità in funzione del tempo su individui che indossano degli indumenti in tessuto multistrato. I risultati ottenuti vengono confrontati con un indumento in cotone di uguale massa considerato come riferimento.

Il modello di tessuto multistrato prevede due strati ripartiti nel seguente modo:

- strato interno (quello più prossimo alla pelle) in tessuto idrofobico per favorire la diffusione del vapore acqueo rimanendo così il più possibile asciutto;
- strato esterno in materiale non-tessuto idrofilico ad elevato tasso di assorbimento dei liquidi provenienti dallo strato interno.

L'intero sistema ha una densità di 316 g/m^2 molto simile a quella del tessuto riferimento in cotone a due strati (299 g/m^2) [2.3]. In figura 2.5 è rappresentata una schematizzazione del sistema multistrato.

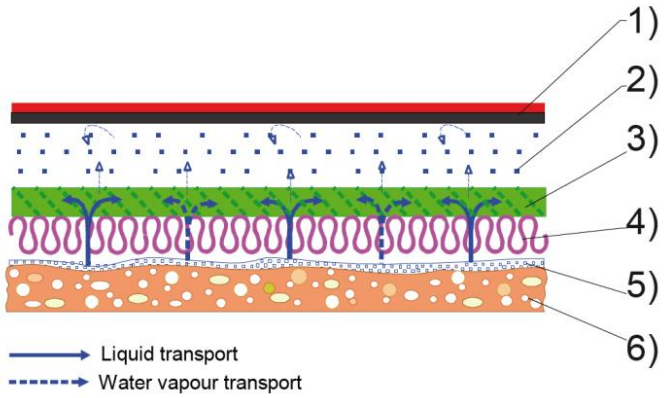


Figura 2.5 Modello del sistema a due strati. 1) barriera, 2) vapore acqueo, 3) strato assorbente, 4) strato conduttivo e diffusivo, 5) sudore, 6) pelle [2.3].

Il protocollo di test prevede di effettuare una serie di esercizi per una durata complessiva di 75 minuti ripartiti in: 10 minuti di riposo in posizione seduta, 60 minuti di pedata su cyclette con carico di 60 W e 5 minuti di riposo. Gli esercizi sono stati condotti in una camera microclimatica a 22°C, 40% di umidità relativa e velocità dell'aria pari a 0.2 m/s su 4 volontari. I sensori di temperatura e umidità sono stati posizionati sulla schiena, sul petto, sulla spalla sinistra e sulla coscia sinistra. Gli andamenti di temperatura e umidità ottenuti con l'indumento a due strati sono identificati dal codice A2, quelli ottenuti con l'indumento in cotone hanno il codice A1 [2.3]. Le figure 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 mostrano gli andamenti della variazione di temperatura e umidità con entrambi i sistemi di abbigliamento.

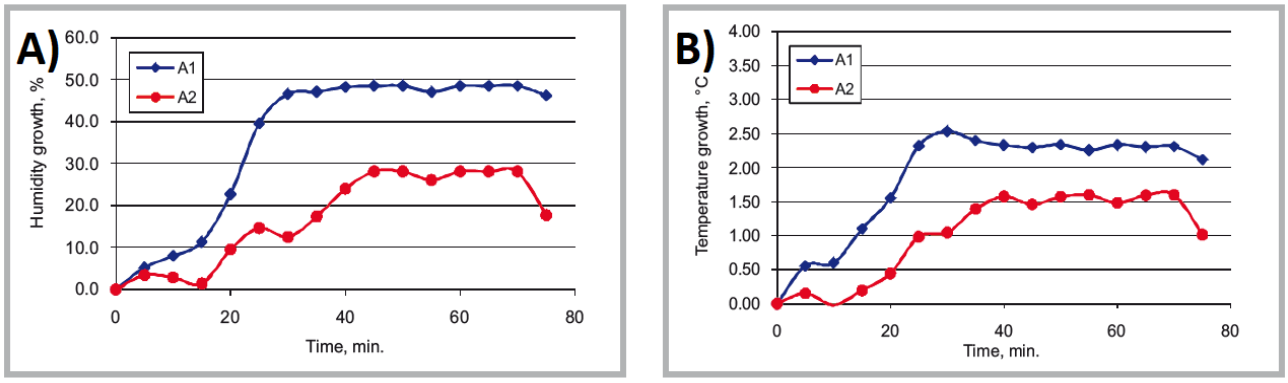


Figura 2.6 Andamento della variazione dell'umidità (A) e della variazione di temperatura (B) in funzione del tempo sulla schiena [2.3].

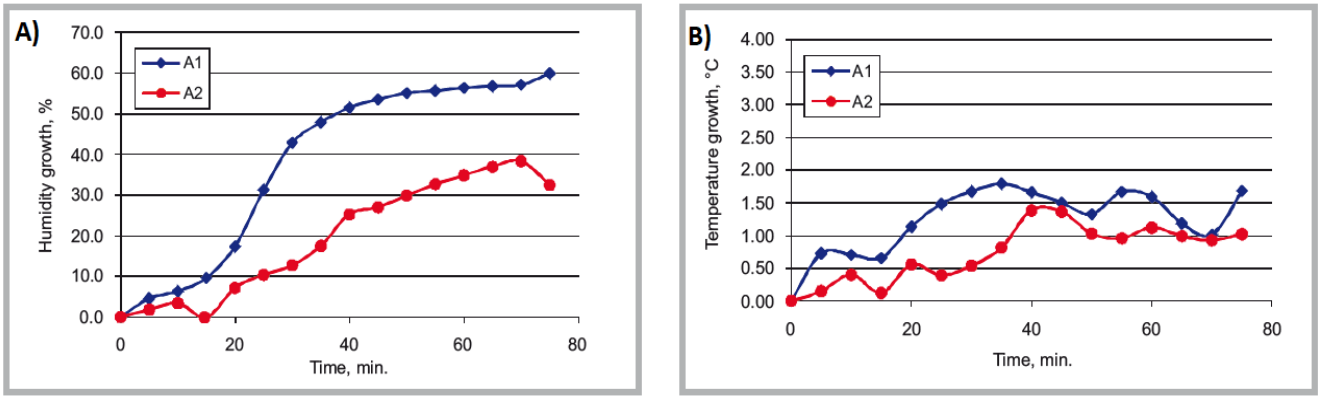


Figura 2.7 Andamento della variazione dell'umidità (A) e della variazione di temperatura (B) in funzione del tempo sul petto [2.3].

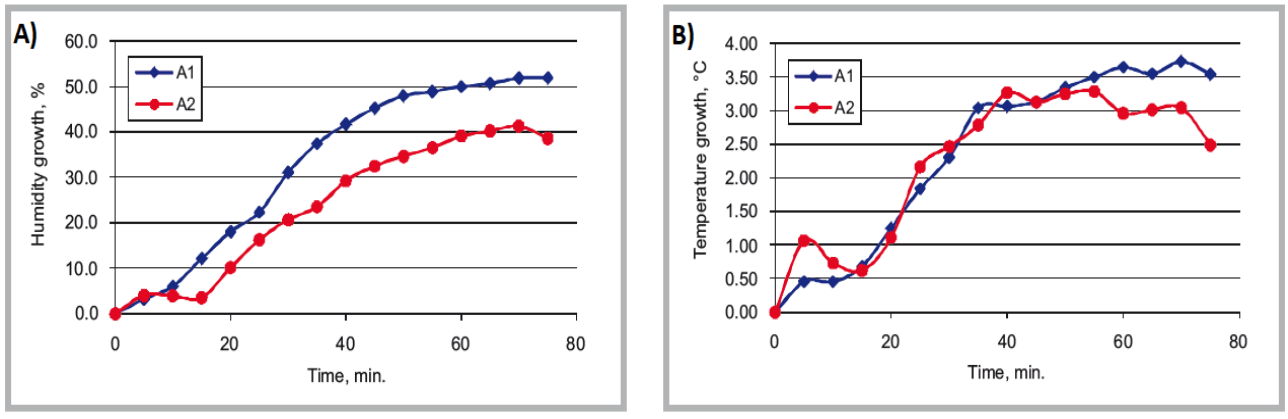


Figura 2.8 Andamento della variazione dell'umidità (A) e della variazione di temperatura (B) in funzione del tempo sulla spalla sinistra [2.3].

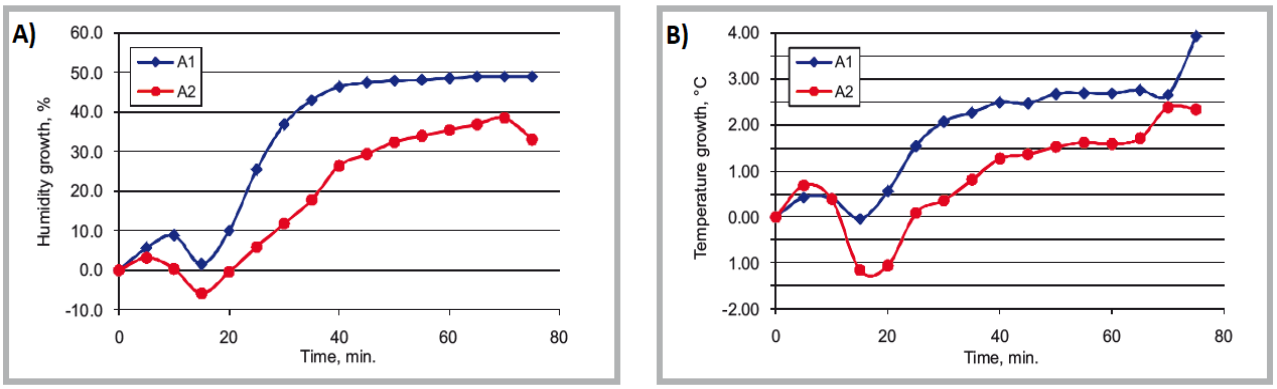


Figura 2.9 Andamento della variazione dell'umidità (A) e della variazione di temperatura (B) in funzione del tempo sulla coscia sinistra [2.3].

Per quanto concerne l'umidità relativa si osserva che la variazione è sempre inferiore al 40% per l'indumento A2. Tale evidenza implica una sensazione di comfort migliore rispetto all'indumento di cotone che presenta valori pari al 60% sul petto e al 50% sugli altri siti di misurazione. Tale differenza è spiegata dal fatto che lo strato interno, diversamente dal cotone, favorisce la traspirazione e consente l'allontanamento del sudore dalla pelle. In riferimento alle variazioni di temperatura si osserva un andamento simile: sono inferiori per l'indumento A2 rispetto a quello in cotone [2.3].
In conclusione questo studio ha dimostrato la fattibilità di ridurre il discomfort climatico causato dall'utilizzo di indumenti protettivi potendo utilizzare degli indumenti multistrato in grado di rimuovere il sudore dalla pelle.

2.5.2 STUDIO 2: Benessere termoigrometrico in presenza di escursioni termiche

Spesso il discomfort microclimatico è causato da una permanenza prolungata in un ambiente eccessivamente freddo o caldo. Questa tematica viene studiata nell'articolo "Thermal properties of combat uniforms treated with micro encapsulated octadecane and change in clothing microclimate via thermal manikin" di E. Lee, S. Han, K. Lee, J. Lee, G. Cho [2.4]. Nell'articolo vengono messe a confronto tre tipologie di uniformi da combattimento militari realizzate con altrettanti tipi di tessuto. Le uniformi vengono testate su manichini.
L'intero test ha una durata di 720 minuti in cui la temperatura viene fatta oscillare tra 0°C e 35°C. In particolare per i primi 180 minuti la temperatura viene mantenuta attorno a 0°C. Per i successivi 180 minuti la temperatura aumenta fino a raggiungere i 35°C, vi rimane per 120 minuti ed, infine ritorna a 0°C [2.4]. La figura 2.10 mostra l'andamento della variazione di temperatura nel tempo.

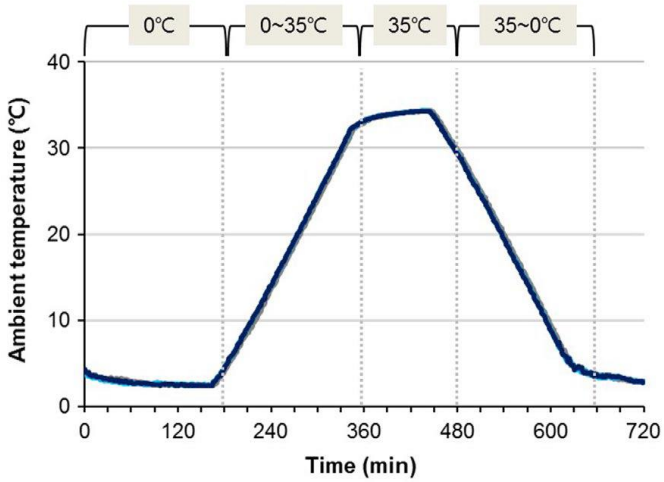


Figura 2.10 Variazione della temperatura ambiente in funzione del tempo [2.4].

I materiali con cui vengono realizzate le tre uniformi sono poliestere e cotone. Due delle tre uniformi sono trattate con ottadecano ($C_{18}H_{38}$) rispettivamente all'8% e al 16%. La presenza dell'ottadecano consente di ottenere un materiale a cambiamento di fase (PCM – Phase Change Material). I PCM sono in grado, in funzione della temperatura/umidità esterna, di assorbire o rilasciare calore attraverso una transizione di fase solido – liquido [2.4].

La figura 2.11 mostra la capacità di rilasciare o trattenere il calore della fibra poliestere/cotone in funzione della concentrazione di ottadecano. In generale all'aumentare della concentrazione di ottadecano aumentano le proprietà termiche del tessuto, ossia migliora la capacità di raffreddare o riscaldare l'indumento. In corrispondenza dei 20°C si ha una reazione esotermica in risposta al raffreddamento dell'ambiente con conseguente rilascio di calore all'organismo. Dualmente in corrispondenza dei 30°C si ha una reazione endotermica in risposta al riscaldamento dell'ambiente con conseguente assorbimento di calore [2.4].

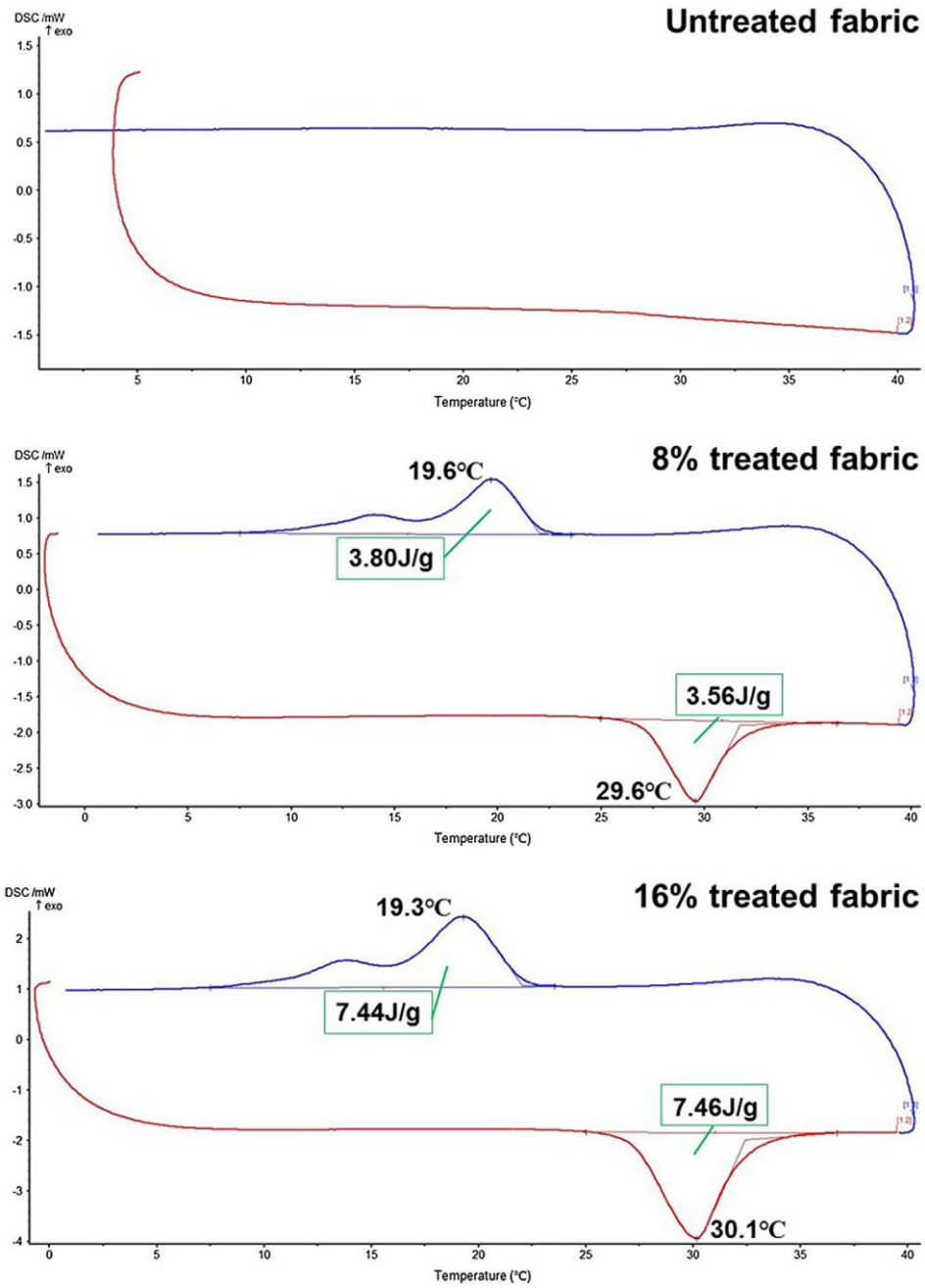


Figura 2.11 Diagrammi di calorimetria differenziale a scansione (DSC) per diverse concentrazioni di ottadecano [2.4].

I parametri misurati durante la prova sono la temperatura della pelle e l'umidità relativa prelevate in sei punti diversi del manichino: petto, schiena, addome, braccio superiore destro, coscia destra e polpaccio. Tramite dei codici sono stati identificati le tre tipologie di indumenti secondo quanto segue:

- G0: fibra in poliestere/cotone non trattata con ottadecano;

- G1: fibra in poliestere/cotone con ottadecano all'8%;
- G2: fibra in poliestere/cotone con ottadecano al 16% [2.4].

Nella figura 2.12 vengono riportati gli andamenti di temperatura, misurati sotto le unformi (temperatura del microclima), in funzione del tempo evidenziando, contemporaneamente, gli intervalli di tempo a cui corrispondono le variazioni della temperatura ambiente.

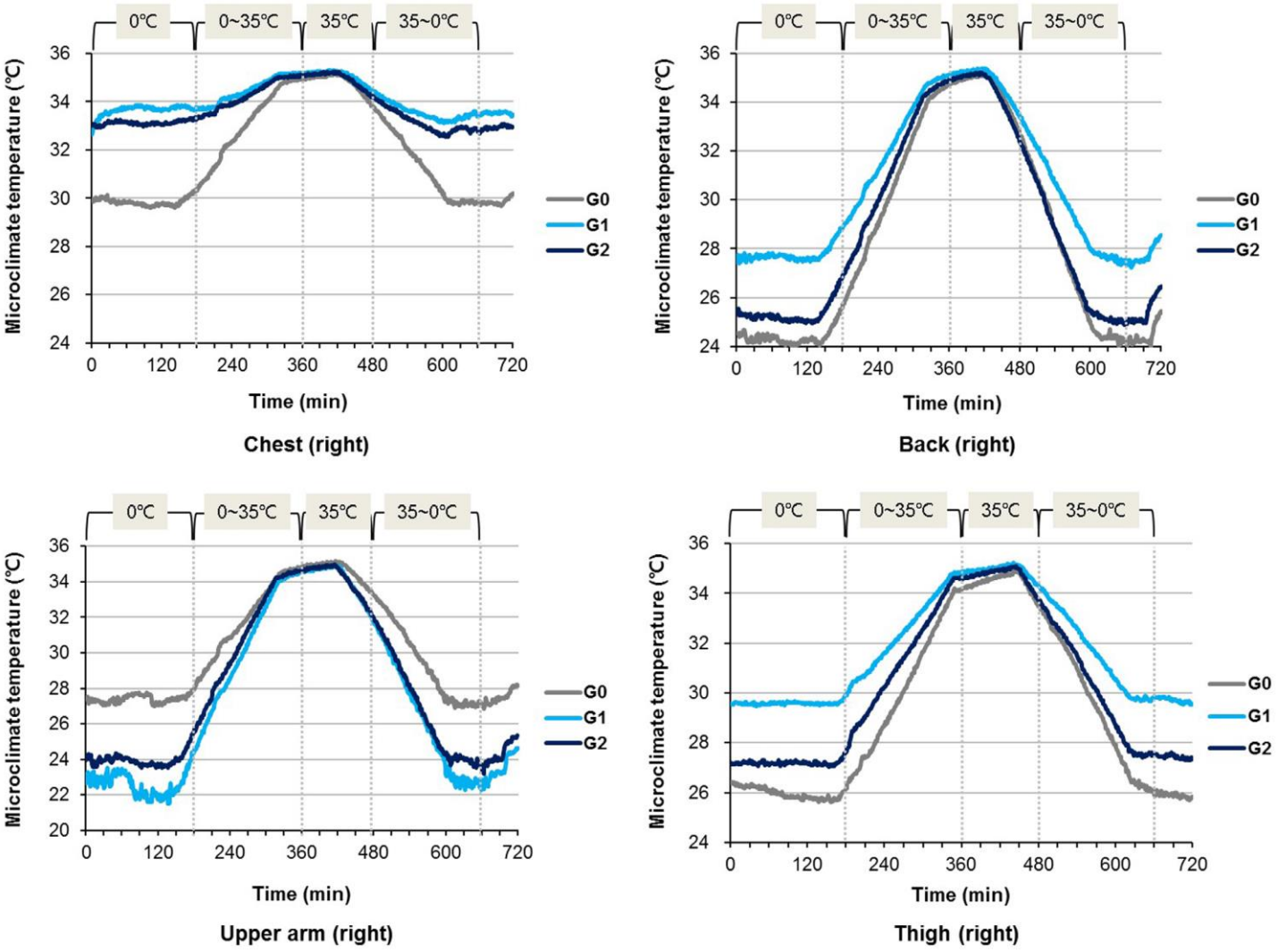


Figura 2.12 Andamento della temperatura del microclima in funzione del tempo in diverse parti del corpo[2.4].

Dall' ultima figura è emerso che i tessuti trattati con ottadecano all'8% consentono di ottenere delle proprietà termiche migliori di quelle al 16%, in quanto le temperature sono più prossime ai 30°C. Sebbene questo vada in disaccordo con quanto detto sin ora (cfr. figura 2.11) c'è da tenere presente che una concentrazione di ottadecano maggiore causa un irrigidimento del tessuto ed ostacola il transito del vapore acqueo e del sudore

poiché va a modificare la trama del tessuto base di poliestere/cotone [2.4]. Gli autori dell'articolo considerano altresì importanti anche gli aspetti fisiologici non simulabili con il manichino in quanto le sole informazioni riguardanti la trama del tessuto non risultano sufficienti.

2.5.3 STUDIO 3: Benessere termoigrometrico in ambienti freddi

In questo paragrafo viene trattata l'analisi e lo studio di una soluzione che ha lo scopo di garantire un comfort microclimatico indossando dei particolari indumenti in grado di variare la temperatura interna in funzione delle condizioni ambientali esterne.
Lo studio in esame è stato condotto da A. Kurczewska e J. Leśnikowski nell'articolo "Variable – Thermoinsulation Garments With a Microprocessor Temperature Controller" [2.5]. Lo scopo consiste nella realizzazione di un indumento protettivo per gli ambienti freddi costituito da una giacca e da un paio di pantaloni. Entrambi gli indumenti sono composti da quattro strati di materiale con resistenza termica di 0.2 $\frac{m^2K}{W}$.
La giacca è costituita da quattro piastre riscaldanti ciascuna di 20 x 20 cm^2 disposte in coppia sotto le maniche e all'altezza del petto; i pantaloni dispongono di una coppia di piastre poste in corrispondenza delle gambe. Tutte le piastre sono alimentate da un sistema di batterie ricaricabili poste nella parte inferiore della giacca [2.5].
Il sistema di misura consente di effettuare tre misure di temperatura (una esterna e due della temperatura corporea) ed una misura, opzionale, del battito cardiaco. In base ai valori misurati di temperatura e di battito il sistema abilita o disabilita il riscaldamento delle piastre [2.5]. La figura 2.13 mostra lo schema a blocchi del sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati. La Tabella 2.4 elenca le condizioni di attivazione o disattivazione delle piastre dettate dall'algoritmo.

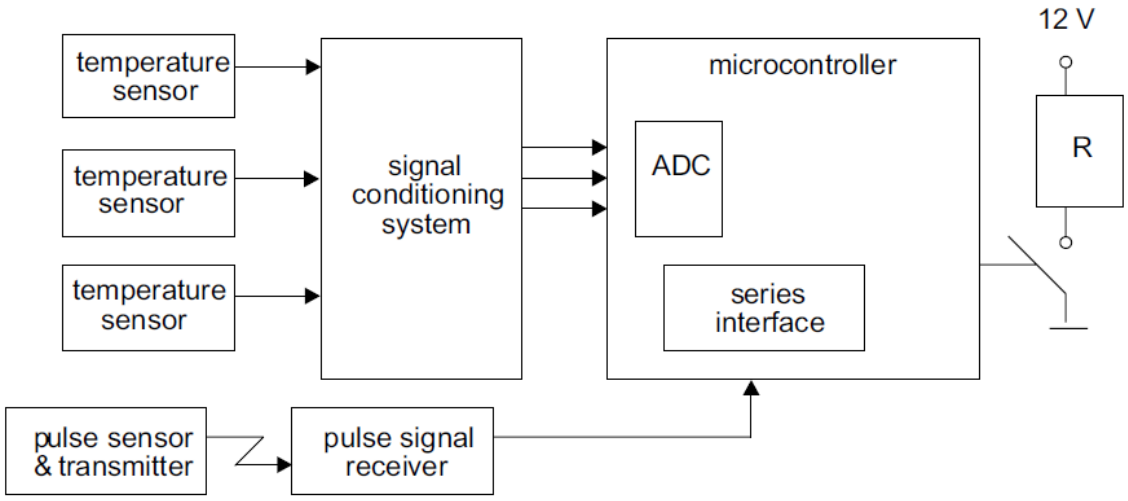


Figura 2.13 Sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati. Il dispositivo denotato con la lettera R rappresenta la piastra riscaldante [2.5]

Condizione 1	Condizione 2	Condizione 3	Condizione 4	Riscaldamento
T_C-T_{OC}<T_{min}	v-v_0<z_1	-	-	ON
T_S-T_{OS}<T_{min}	v-v_0<z_1	-	-	ON
T_C-T_{OC}<T_{min}	v-v_0>z_2	-	-	OFF
T_S-T_{OS}<T_{min}	v-v_0>z_2	-	-	OFF
T_C-T_{OC}>T_{max}	v-v_0<z_1	-	-	OFF
T_S-T_{OS}>T_{max}	v-v_0<z_1	-	-	OFF
T_C-T_{OC}=0	v-v_0<z_1	T_z<T_{OUT}	L_{T2}>5 min	ON
T_C-T_{OS}=0	v-v_0<z_1	T_z<T_{OUT}	L_{T2}>5 min	ON

Tabella 2.4Condizioni di attivazione edisattivazione delle piastre riscaldanti. $\mathbf{T_C}$: temperatura finale della pelle sulla clavicola; $\mathbf{T_{OC}}$: temperatura iniziale della pelle sulla clavicola; $\mathbf{T_{min}}$: temperatura minima sulla clavicola/scapola; $\mathbf{T_S}$: temperatura finale della pelle sulla scapola; $\mathbf{T_{OS}}$: temperatura iniziale della pelle sulla scapola; $\mathbf{T_{max}}$: temperatura massima sulla clavicola/scapola; **v**: frequenza cardiaca finale; $\mathbf{v_0}$: frequenza cardiaca iniziale; $\mathbf{z_1}$:primo preset frequenza cardiaca; $\mathbf{z_2}$: secondo preset frequenza cardiaca; $\mathbf{T_z}$: temperatura esterna; $\mathbf{T_{OUT}}$: temperatura esterna al primo preset; $\mathbf{L_{T2}}$: durata della variazione di temperatura esterna [2.5].

L'intero sistema è stato successivamente testato su sei volontari di sesso maschile in un ambiente a -24°C ± 2°C sottoponendoli a due tipi di lavori:

- lavoro leggero (LW): camminata a 0.5 m/s con produzione metabolica pari a 110 W/m^2;
- lavoro moderato (MW): camminata a 1.0 m/s trasportando un peso di 8 kg per 3 m per 10 minuti con produzione metabolica pari a 165 W/m^2.

I due tipi di lavoro sono stati condotti con due diversi tipi di abbigliamento:

- variante I: sistema di riscaldamento disattivato;
- variante II: sistema di riscaldamento attivato [2.5].

Per valutare la condizione di benessere percepita durante i test, su ciascun volontario viene eseguito il test di Fanger. In figura 2.14 sono riportati i valori della sensazione termica dopo aver svolto un lavoro leggero in entrambe le varianti. Dopo 45 minuti di attività i soggetti hanno riportato un punteggio di Fanger corrispondente ad una sensazione di benessere compresa tra caldo e tiepido [2.5].

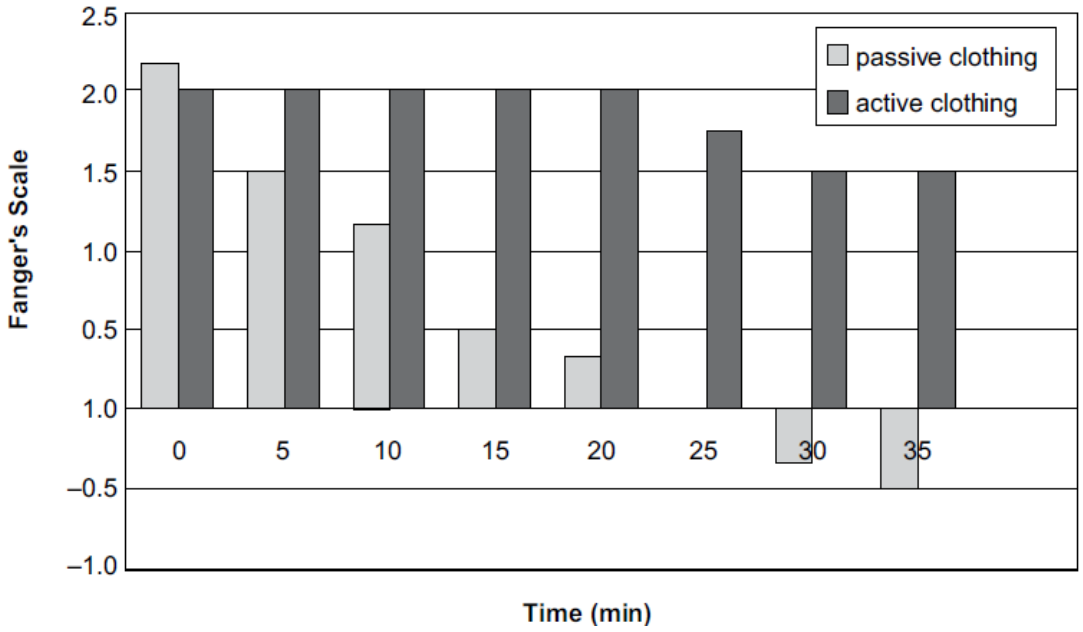


Figura 2.14 Scala di Fanger in funzione dell'abbigliamento attivo (grigio scuro) e passivo (grigio chiaro) dopo aver svolto un lavoro leggero[2.5].

Sebbene questo studio abbia evidenziato una possibile utilità di questi indumenti in ambienti freddi, alcune modifiche e miglioramenti sono tutt'ora possibili. Gli autori dell'articolo ritengono opportuno:

- studiare i cambiamenti dell'isolamento termico su diversi tipi di indumenti;

- coinvolgere un numero più vasto di volontari su cui condurre gli studi [2.5].

CAPITOLO 3. Stato dell'arte

In questo Capitolo verrà effettuata una panoramica sullo stato dell'arte dei sensori di temperatura ed umidità e sui sistemi, ad oggi in commercio, che integrano tali sensori per effettuare più misure contemporaneamente. Il Capitolo illustra anche un tipico manichino termo riscaldato usato per le simulazioni in ambienti controllati.

3.1. Sensori di temperatura

I sensori per la misurazione della temperatura nell'ambito della valutazione del comfort microclimatico devono essere sufficientemente piccoli per poter consentire la misura in una zona di ridotte dimensioni. È possibile suddividere questi sensori in:

- Termocoppie;
- Termoresistenze;
- Termistori.

3.1.1. Termocoppie

Le termocoppie sono dei dispositivi in grado di misurare una differenza di potenziale elettrico a partire da una variazione di temperatura, oppure una differenza di temperatura a partire da una variazione di potenziale elettrico. Il principio fisico alla base del funzionamento delle termocoppie è l'effetto Seebeck secondo il quale una differenza di temperatura può generare una corrente elettrica. Una termocoppia è composta da due metalli differenti messi a contatto in modo da formare una giunzione calda. L'altra coppia di estremità è collegata allo strumento di misura per formare una giunzione fredda (posta a temperatura nota). La figura 3.1 mostra una schematizzazione generica di una termocoppia [3.1].

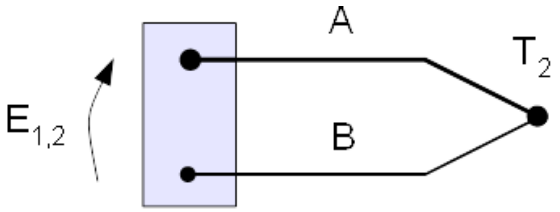


Figura 3.1 Schematizzazione di una termocoppia: E_{12} indica la tensione ai capi del giunto freddo, T_2 indica la temperatura della giunzione calda. Le lettere A e B indicano due diversi conduttori metallici [3.1]

Note la differenza di potenziale ai capi della giunzione fredda e la temperatura di giunto freddo è possibile ricavare la temperatura da misurare (quella di giunto caldo) attraverso una relazione polinomiale non lineare:

$$T_2 = f(E_{12}, T_1) = c_1 \cdot E_{12} + c_2 \cdot E_{12}^2 + c_3 \cdot E_{12}^3 + \cdots = \sum_{i=1}^{N} c_i \cdot E_{12}^i \quad (3.1)$$

I coefficienti c_i dell'equazione 3.1 sono definiti per le diverse coppie di materiale assumendo la temperatura T_1=0°C.
Attraverso una relazione inversa è possibile ricavare invece la tensione sulla giunzione fredda note T_2 e T_1:

$$E_{12} = f(T_2, T_1) = b_1 \cdot T_2 + b_2 \cdot T_2^2 + b_3 \cdot T_2^3 + \cdots = \sum_{i=1}^{N} b_i \cdot T_2^i \qquad (3.2)$$

Analogamente al caso precedente i coefficienti b_i dell'equazione 3.2 sono definiti per le diverse coppie di materiale assumendo la temperatura T_1=0°C.
In base alla temperatura da misurare è possibile scegliere una serie di coppie di metalli. Le termocoppie vengono, infatti, suddivise in base a quanto riportato nella Tabella 3.1.

TIPO	**MATERIALI**		**RANGE TEMP. (°C)**	**SENSIBILITÀ (µV/°C)**
	POLO +	**POLO -**		
K	Chromel (Ni-Cr)	Alumel (Ni-Al)	-200 ; +1260	41
J	Ferro	Costantana (Cu-Ni)	-40 ; 750	51.7
T	Rame	Costantana	-200 ; 400	48.2
E	Chromel	Costantana	-	68
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si)	Nisil (Ni-Si)	650 ; 1250	-
B	Platino -Rodio (30%)	Platino -Rodio (6%)	Fino a 1800°C	10
S	Platino -Rodio (10%)	Platino	Fino a 1600°C	10
R	Platino -Rodio (13%)	Platino	Fino a 1600°C	10

Tabella 3.1. Tipologie di termocoppie [3.2].

3.1.2. Termoresistenze

Le termoresistenze sono dei sensori di temperatura che sfruttano la trasduzione della temperatura in una resistenza elettrica. I più comuni sono costituiti da metalli quali il platino, il rame ed il nichel. Entro certi intervalli di temperatura la variazione di resistenza elettrica può essere considerata lineare. Per i materiali metallici la variazione di resistenza viene descritta dall'equazione 3.3 approssimata al primo ordine:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot T) = R_0 + S \cdot T \qquad (3.3)$$

Dove:

- R_0 : resistenza misurata a 0°C. Ad esempio per il sensore al platino Pt-100 questa vale 100Ω [3.1];
- α: sensibilità relativa. Per il Pt-100 è pari a 0.0039 $°C^{-1}$ [3.1];
- S: sensibilità assoluta definita come:

$$\frac{dR}{dT} = R_0 \cdot \alpha;$$

- T: temperatura in °C.

Dall'equazione 3.3 è possibile, noto R, ricavare la temperatura finale:

$$T = \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0} \tag{3.4}$$

3.1.3. Termistore

A differenza delle termoresistenze metalliche, che aumentano la resistenza con l'aumentare della temperatura, i termistori, realizzati in materiale semiconduttore, sono caratterizzati da una diminuzione della resistenza all'aumentare della temperatura. La variazione temperatura-resistenza è non lineare anche su piccoli intervalli di temperatura. I termistori si dividono in due categorie:

- NTC (Negative Temperature Coefficient): sono i termistori sopracitati;
- PTC (Positive Temperature Coefficient): hanno un comportamento duale a quello degli NTC ma non vengono utilizzati come sensori di temperatura.

Esistono diverse relazioni che legano la resistenza elettrica con la temperatura. I più comuni sono:

- modello a 4 parametri:

$$R_T = R_0 \, e^{(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3})} \tag{3.5a}$$

Dove T è la temperatura in espressa in Kelvin mentre A, B, C e D sono coefficienti di fitting;
- modello a 3 parametri:

$$R_T = R_0 \, e^{(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2})} \tag{3.5b}$$

- modello a 2 parametri:

$$R_T = R_0 \, e^{[B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})]} \tag{3.5c}$$

Dove R_0 è la resistenza alla temperatura T_0 [3.1].
In figura 3.2 sono riportati gli andamenti della resistenza in funzione della temperatura di tre termistori confrontati con una termoresistenza metallica.

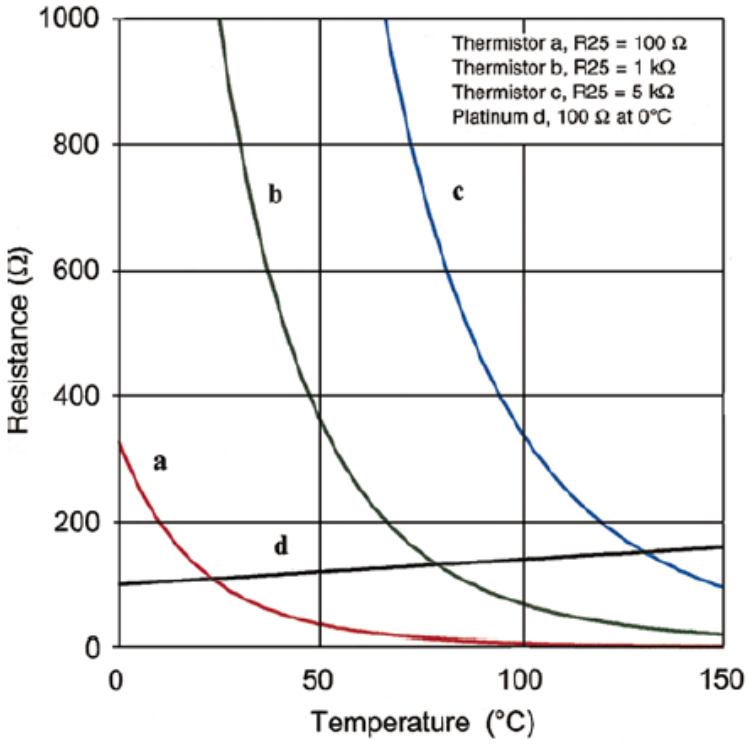


Figura 3.2 Variazioni di resistenza elettrica in funzione della temperatura. Le curve a, b e c sono identificative di termistori caratterizzati da una R_0 a 25°C pari a 100Ω, 1000Ω e 5000Ω rispettivamente. La curva d è identificativa di una termoresistenza Pt-100 [3.1].

3.2. Sensori di umidità relativa

Come per i sensori di temperatura anche i sensori di umidità generano in uscita una grandezza elettrica (corrente o tensione) che è funzione dell'umidità relativa. Per una data temperatura T l'umidità relativa di una miscela aria - vapore è definita come il rapporto tra la densità di vapore presente nella miscela (ρ_V) e la densità di vapore saturo della miscela alla medesima temperatura (ρ_S):

$$U.R. = \frac{\rho_V}{\rho_S} \tag{3.6}$$

ed assume valori positivi compresi tra 0 ed 1.

Da un punto di vista tecnologico i sensori di umidità relativa possono essere divisi in due gruppi:

- sensori di umidità relativa capacitivi;
- sensori di umidità relativa resistivi [3.3].

3.2.1. Sensori di umidità relativa capacitivi

I sensori di umidità capacitivi possono essere considerati come dei condensatori la cui capacità dipende dal valore dell'umidità relativa nell'ambiente. La capacità C in un condensatore ad armature parallele può essere calcolata attraverso la relazione 3.7:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \tag{3.7}$$

Dove:

- S: superficie delle armature;

- d: distanza tra le armature;

- ε_0: costante dielettrica nel vuoto ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m);

- ε_r: costante dielettrica relativa

In tutti i sensori capacitivi, indipendentemente dalla loro geometria, il parametro che dipende dall'umidità relativa è la costante dielettrica relativa. Dielettrici molto diffusi sono polimeri igroscopici [3.3].

3.2.2. Sensori di umidità relativa resistivi

I sensori di umidità resistivi misurano l'umidità relativa a partire da una variazione di impedenza o di conducibilità elettrica. Per un materiale conduttore omogeneo a sezione costante la resistenza elettrica viene calcolata secondo la relazione 3.8:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \tag{3.8}$$

Dove:

- ρ: resistività elettrica del materiale;

- L: lunghezza del conduttore;

- S: sezione del conduttore;

Ciò che varia in funzione dell'umidità relativa è la resistività elettrica, in particolare il valore della resistenza è inversamente proporzionale all'umidità. I materiali utilizzati per la realizzazione di questi sensori sono polielettroliti solidi o polimeri conduttivi. Per conferire resistenza meccanica ed isolamento elettrico al sensore si procede con un rivestimento in materiale ceramico [3.3].

3.3. Sensori di temperatura e di umidità integrati

Nell'ambito dello studio del microclima i parametri di temperatura e umidità relativa non possono essere considerati indipendenti. Entrambi, infatti, concorrono all'ottenimento del comfort climatico poiché una variazione eccessiva di uno dei due parametri inevitabilmente influenza anche l'altro.

Da un punto di vista hardware utilizzare i due sensori montati sulla stesso circuito stampato riduce notevolmente la complessità del circuito, continuando comunque a garantire delle dimensioni ridotte (nell'ordine del cm^2) e dei consumi contenuti. L'utilizzo di sensori integrati, inevitabilmente, conduce ad un loro utilizzo in formato digitale. Questo da un lato semplifica la progettazione hardware in quanto non è richiesto il blocco di condizionamento del segnale in uscita dal sensore - cosa che invece è quasi obbligatoria con i sensori analogici - dall'altro permette di gestire il funzionamento del sensore e la comunicazione dello stesso con il sistema di acquisizione ed elaborazione unicamente via software.
I sensori integrati hanno tensione di alimentazione inferiori ai $5V_{DC}$, accuratezza inferiore ad 1°C per le misure di temperatura e 3.5% per le misure di umidità relativa, e stabilità a lungo termine.
Nella tabella 3.2 sono riportati una serie di sensori di temperatura e umidità relativa integrati sullo stesso stampato.

Sensore	Produttore	Range di temperatura (°C)		Risoluzione misura di temperatura (°C)			Accuratezza misura di temperatura (°C)			Range di umidità relativa (%)		Risoluzione misura di umidità (%)			Accuratezza misura di umidità relativa (%)		
		Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max
SHT7X [3.4a]	Sensirion	-40	+124	0.04	0.01	0.01	-	±0.4	±2.5	0	100	0.4	0.05	0.05	-	±3	±5
SHTW2 [3.4b]	Sensirion	-30	+100	-	0.01	-	-	±0.3	±1.2	0	100	-	0.01	-	-	±3	±7
SHT1x [3.4c]	Sensirion	-40	+124	0.04	0.01	0.01	-	±0.5	±2.5	0	100	0.4	0.05	0.05	-	±3	±7
SHT3x [3.4d]	Sensirion	-40	+125	-	0.01	-	-	±0.2	±1.0	0	100	-	0.01	-	-	±2	±8
BME280 [3.4e]	Bosch	-40	+85	-	0.01	-	-	±0.5 (@25°C)	±1 (@ 0°C-65°C)	0	100	-	0.008	-	-	±3	-
DHT22 [3.4f]	Aosong Electronics	-40	+80	-	0.1	-	-	±0.5	-	0	100	-	0.1	-	-	±2	±5
HTS221 [3.4g]	STMicroelectronics	-40	+120	-	0.016	-	-	±0.5	±1.0	0	100	-	0.004	-	-	±3.5	±5

Tabella 3.2 Caratteristiche tecniche di alcuni sensori di temperatura e umidità digitali presenti in commercio

3.4. Manichini termo - riscaldati

Spesso, ancor prima di testare le capacità termiche ed igrometriche di un indumento su volontari, può essere utile ottenere dei risultati preliminari effettuando dei test su manichini termo - riscaldati. Questi dispositivi vengono posti in una camera climatica e sono in grado di simulare il riscaldamento della pelle umana e la produzione di sudore in seguito ad attività fisica. Tutti i manichini sono suddivisi in una serie di segmenti in maniera tale da individuare quattro macroregioni: testa, tronco, arti superiori ed arti inferiori. Ciascun segmento è dotato di una serie di sensori di temperatura e umidità per fornire misure in più parti del corpo.

Uno di questi manichini è il Newton Thermal Manikin prodotto dalla Thermetrics costituito da un rivestimento conduttivo in carbonio epossidico contenente dei sistemi di riscaldamento e dei sensori di temperatura e umidità cablati [3.5]. Esternamente il sistema dispone di due sensori di temperatura, uno di umidità ed uno di flusso d'aria per determinare le condizioni ambientali. Il manichino è dotato di tutte le articolazioni in maniera tale da simulare qualsiasi posizione del corpo e riproduce le dimensioni corporee medie umane in base all'area geografica (Western/Asian) [3.5].

A livello commerciale il manichino è disponibile in tre possibili configurazioni: 20 segmenti, 26 segmenti e 35 segmenti. Su richiesta possono essere fornite segmentazioni fra 14 e 45. La figura 3.3 evidenzia tutti i segmenti, fronte e retro, delle tre versioni standard [3.5].

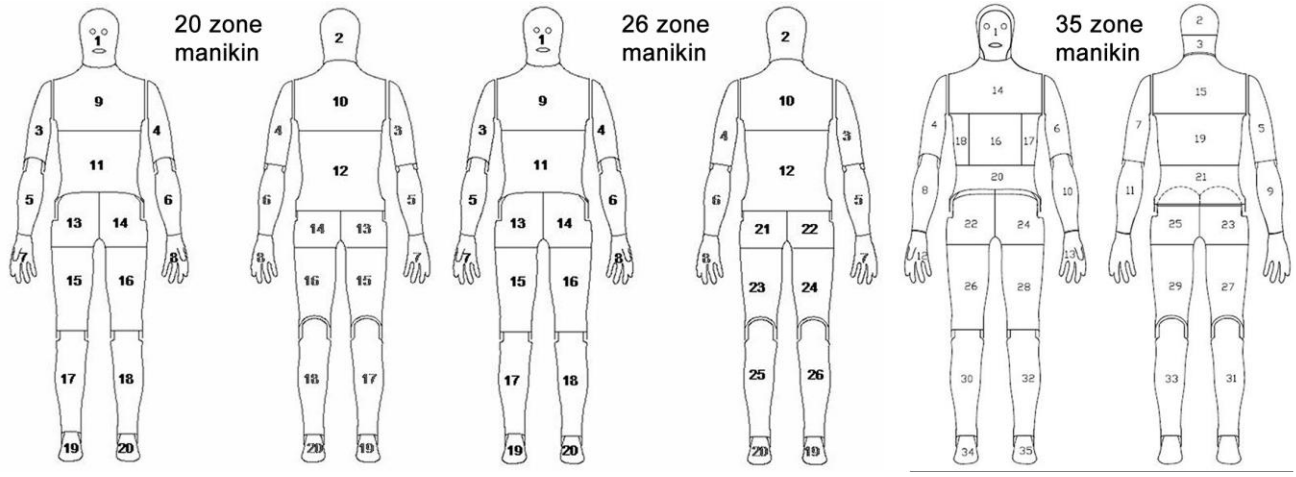


Figura 3.3 Divisione in segmenti dei manichini nelle tre diverse versioni in commercio [3.5].

La tabella 3.3 sono riportate le caratteristiche tecniche di questa famiglia di manichini.

Grandezza	Valore	Unità di misura
Temperatura d'utilizzo	-20 : +50	°C
Incertezza misura di temperatura	±0.1	°C
Intervallo di umidità misurabile	0 ; 100	%
Incertezza misura di umidità	±3	%
Massima potenza generata	700	W/m^2
Capacità produttiva di sudore	0 ; 1000	ml/h

Tabella 3.3 Caratteristiche tecniche manichini Newton della Thermetrics [3.5].

3.5. MSR 147 WD Wireless Data Logger with plug-in Sensors

L'MSR 147 WD, mostrato in figura 3.4, è un sistema dotato di cinque connettori per sensori di temperatura e umidità relativa prodotto dalla MSR Electronics. Al suo interno è dotato di un accelerometro e di un barometro. La memoria interna del dispositivo consente il salvataggio dei dati permettendo così il monitoraggio dei precedenti parametri anche per lunghi intervalli di tempo. L'alimentazione viene fornita da una batteria in polimeri di litio da 260 mAh ricaricabile tramite cavo USB. Le dimensioni sono 35 x 17 x 57 mm, mentre il peso varia da 27 grammi, per la versione standard, fino a 36 grammi per quella resistente all'acqua [3.6].

Figura 3.4 MSR 147WD [3.6]

I parametri acquisiti possono essere visualizzati in tre possibili modi: sul display del dispositivo, attraverso un computer via USB oppure via Bluetooth per distanze inferiori ai 10 metri [3.6]. In tutti e tre i possibili casi, come schematizzato in figura 3.5, è possibile salvare questi dati anche nel servizio cloud della MSR.

Figura 3.5 MSR Smart Cloud [3.6]

I sensori di temperatura e umidità esterni sono disponibili con cavi lunghi 0.20m, 1.00m e 1.60 m [3.6]. In figura 3.6 sono mostrati i sensori di temperatura e umidità esterni utilizzati con le relative dimensioni espresse in millimetri.

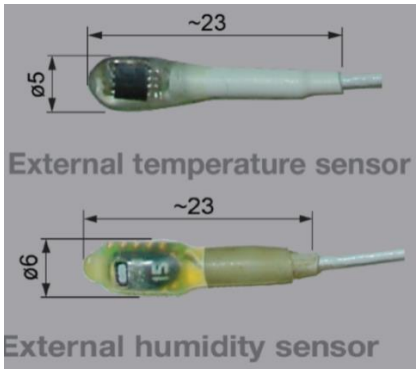


Figura 3.6 Sensori di temperatura e umidità esterni con dimensioni espresse in mm [3.6].

La tabella 3.4 riassume tutte le caratteristiche tecniche dei sensori interni ed esterni.

PARAMETRO MISURATO	INTERVALLO DI MISURA	PRECISIONE
Temperatura (sensore esterno)	-40°C ; +125°C	0.2°C (-10°C ; +50°C) ±1°C (-40°C ; +125°C)
Umidità relativa (sensore esterno)	0% ; 100%	±1.8% (10% ; 85% @ 0°C ; +40°C) ±4% (85% ; 95% @ 0°C ; +40°C)
Pressione atmosferica (sensore interno)	10 mbar ; 2000 mbar	±2 mbar (750 mbar ; 1100 mbar @ +25°C)
Accelerazione su 3 assi (sensore esterno)	-15g ; +15g	±0.15g (+25°C)

Tabella 3.4 Caratteristiche sensori MSR147 [3.6].

3.6. MSR 145 Mini Data Logger for Temperature, Humidity, Pressure, Light, Acceleration

L'MSR 145 Mini Data Logger, mostrato in figura 3.7, è un sistema, prodotto dalla MSR Electronics, dotato di sensori, sia interni che esterni, di temperatura, umidità relativa, pressione atmosferica, flussimetro, accelerometro e luxmetro. È disponibile anche un connettore esterno per termocoppia. La memoria interna del dispositivo consente il monitoraggio dei parametri anche per lunghi intervalli di tempo. L'alimentazione viene fornita da una batteria in polimeri di litio da 260 mAh (capacità massima utilizzabile 900 mAh) ricaricabile tramite cavo USB. I dati acquisiti possono essere trasferiti su un PC tramite cavo USB oppure scheda SD su cui il data logger salva i dati. Il dispositivo offre la possibilità di disporre da due a quattro ingressi analogici aggiuntivi per consentire il collegamento di ulteriori sensori [3.7].

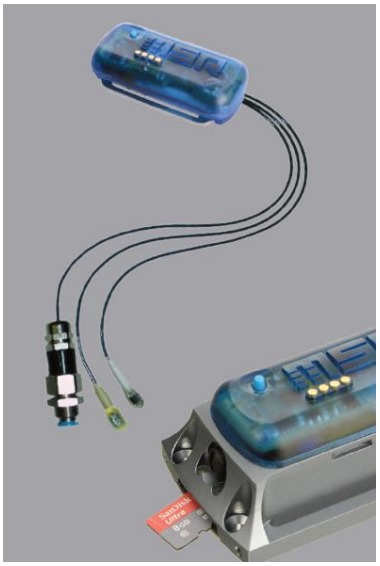


Figura 3.7 MSR145 Mini Data Logger con lettore scheda SD [3.7].

Le dimensioni ed il peso variano a seconda della versione (resistente all'acqua e non) e della capacità della batteria come mostrato in tabella 3.5:

HOUSING	CAPACITÀ BATTERIA	DIMENSIONI E PESO
STANDARD IP60	230 mAh	27x16x53 mm, 20g
	900 mAh	39x23x72 mm, 56g
WATERPROOF IP67	230 mAh (Shell in silicone)	20x14x62 mm, 18g
	230 mAh	27x16x53 mm, 27g
	900 mAh	39x23x72 mm, 64g

Tabella 3.5 Dimensioni e peso delle versioni MSR145 [3.7]

In figura 3.8 sono mostrati i sensori di temperatura e umidità esterni utilizzati con le relative dimensioni espresse in millimetri.

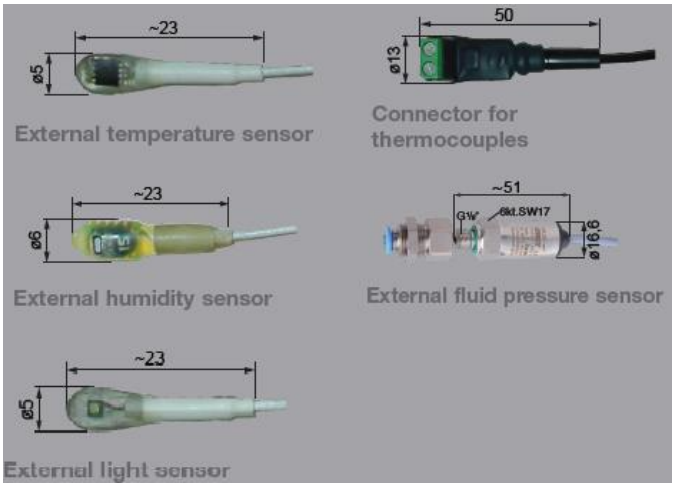


Figura 3.8 Connettore per termocoppia e sensori di temperatura, umidità, luce, flusso. Le quote sono espresse in millimetri [3.7].

La tabella 3.6 riassume tutte le caratteristiche tecniche dei sensori interni ed esterni.

PARAMETRO MISURATO	INTERVALLO DI MISURA	PRECISIONE
Temperatura	esterno: -10°C ; +58°C	±0.1°C (+5°C ; +45°C) ±0.2°C (-10°C ; +58°C)
	esterno: -55°C ; +125°C	±0.5°C (-10°C ; +65°C) ±0.2°C (-55°C ; +125°C)
	interno: -20°C ; +65°C	±0.5°C (-10°C ; +65°C) ±2°C (-55°C ; +125°C)
	esterno: da 1 a 4 connettori per termocoppia K: -250°C ; +1200 °C	
Umidità relativa	0% ; 100% (esterno: -20°C ; +85°C) (interno: -20°C ; +65°C)	±2% (10% ; 85% @ 0°C ; +40°C) ±4% (85% ; 95% @ -55°C ; +125°C)
Pressione atmosferica	0 mbar ; 2000 mbar (esterno: -20°C ; +85°C) (interno: -20°C ; +65°C)	±2.5 mbar (750 mbar ; 1100 mbar @25°C)
	0 bar ; 14 bar (-20°C ; +65°C)	±50 mbar (1 bar ; 10 bar @ 25°C)
Accelerazione su 3 assi	±15g (-20°C ; +65°C)	±0.15g (0g ; 5g @ +25°C) ±0.25g (5g ; 10g @ +25°C)

		±0.45g (10g ; 15g @ +25°C)
Luxmetro	0 lx ; 65000 lx	Sensibilità massima a 500 nm
Flussimetro	0 mbar ; 3000 mbar (-20°C ; +85°C)	±30 mbar
	0 bar ; 30 bar (-20°C ; +85°C)	±300 mbar

Tabella 3.6 Caratteristiche sensori MSR145 [3.7]

3.7. iButton

L'iButton è un datalogger prodotto dalla "Maxim Integrated" dotato di un sensore di temperatura interno (alcune versioni sono in grado di effettuare misure di temperatura ed umidità). Il dispositivo, di ridotte dimensioni, ha un diametro di circa 17 mm ed un'altezza di 5 mm. L'involucro è costituito da un case in acciao dotato di contatti elettrici per la trasmissione dei dati secondo il protocollo seriale 1-Wire. La velocità di trasmissione può essere fissata a 16 kbps (standard) o 142 kbps (overdrive) [3.8]. La figura 3.9 riporta le dimensioni della versione più recente in commercio.

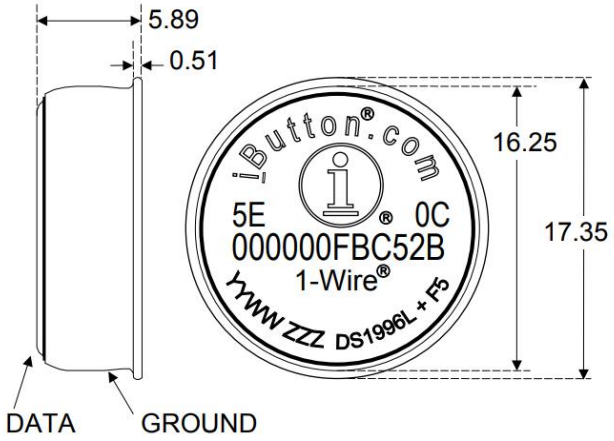


Figura 3.9 Dimensioni dell'iButton DS1996 in millimetri [3.9].

Attraverso un adattatore USB è possibile trasferire i dati su un pc per consentirne l'elaborazione. Il DS1996 è dotato di una memoria interna da 64 Kb non volatile. La ditta dichiara una memorizzazione dei dati in memoria per oltre 10 anni [3.9]. In tabella 3.7sono riportate le caratteristiche elettriche e termiche del DS1996.

PARAMETRO	VALORE
Dimensioni	17.35 mm x 5.89 mm
Peso	3.3 g
Tensione di alimentazione	-0.5V ; +7.0V
Temperatura di funzionamento	-40°C ; +70°C
Durata di esercizio	10 anni (@ 25°C)
Dimensione della memoria	64 Kb
Velocità massima di comunicazione	142 kbps

Tabella 3.7 Parametri tecnici dell'iButton DS1996 [3.9].

CAPITOLO 4. Sistema di acquisizione

Lo scopo di questo lavoro di tesi consiste nella realizzazione di un dispositivo indossabile in grado di misurare la temperatura e l'umidità relativa in più punti del corpo. Il dispositivo è alimentato da una batteria ricaricabile e trasmette i dati attraverso una comunicazione radio a bassa frequenza. Nella prima parte del capitolo vengono descritti tutti i componenti, analogici e digitali, montati su una basetta sperimentale per sviluppo. Questo prototipo ha lo scopo di stabilire quali sensori verranno utilizzati sul dispositivo definitivo illustrato nella seconda parte.

4.1 Prototipo

Lo schema elettrico del circuito realizzato come prototipo è riportato in figura 4.1

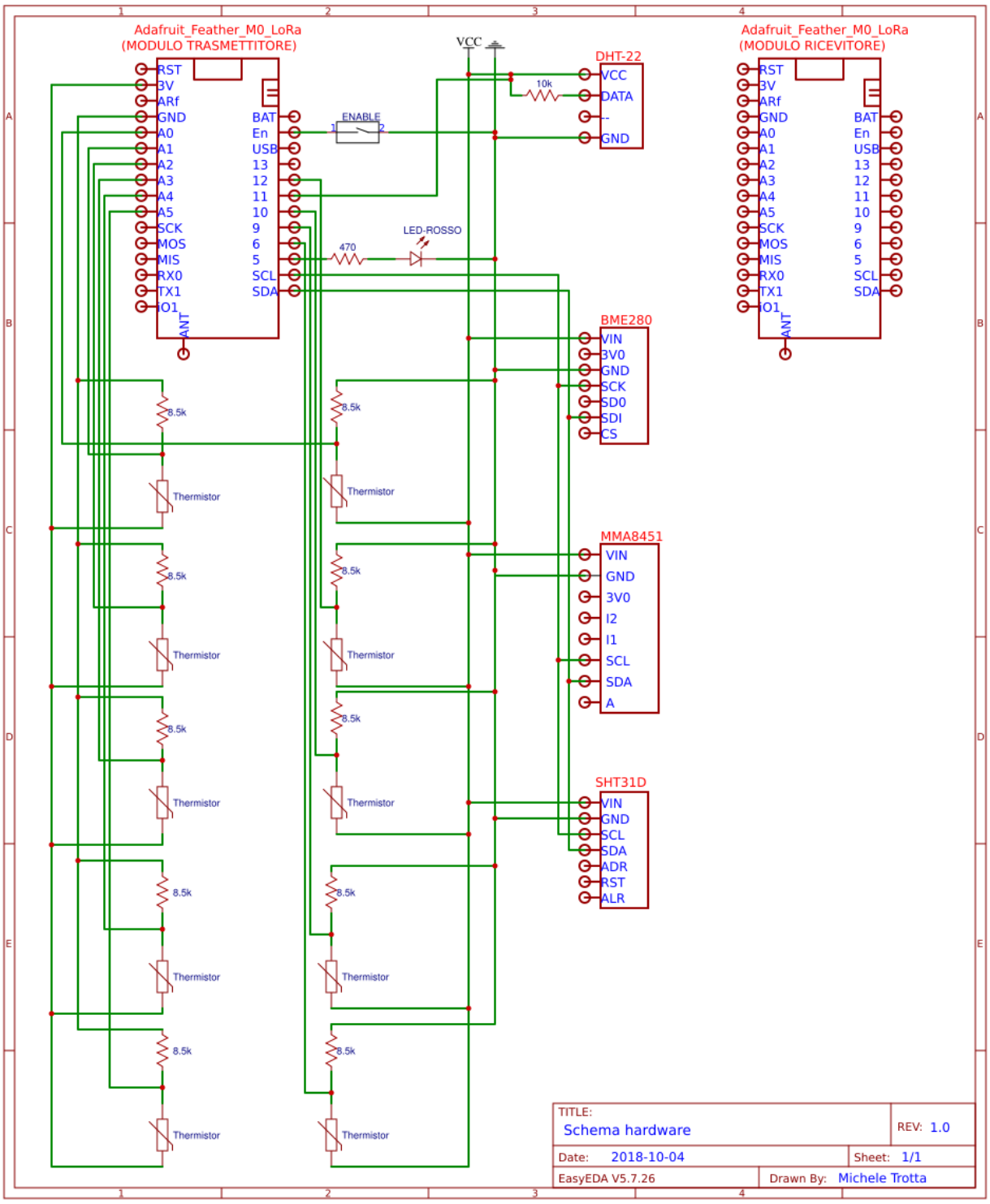


Figura 4.1 Schema circuitale del prototipo.

Tale sistema si compone di due microcontrollori dotati di modulo radio (uno configurato come trasmettitore e l'altro come ricevitore), una batteria ricaricabile, 10 termistori, 1 sensore di temperatura e umidità relativa SHT31D, 1 sensore di temperatura e umidità

relativa BME280, 1 sensore di temperatura e umidità relativa DHT22 ed 1 accelerometro MMA8451.

4.1.1 Microcontrollore

Il microcontrollore utilizzato per l'acquisizione dei dati e l'esecuzione delle misure è il Feather32u4 LoRa dotato di modulo radio RFM95 e sviluppato dalla "Adafruit Industries". Il modulo radio del microcontrollore consente trasmissioni radio a 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz. L'intera board unisce piccole dimensioni (51mm x 23mm x 8mm) e peso ridotto (5.8g) [4.1].
Il microcontrollore ha una frequenza di clock di 48 MHz ed una logica a 3.3 V.
Le caratteristiche salienti del microcontrollore sono:

- Memoria FLASH da 256 KB;
- Memoria RAM da 32 KB;
- Connettore porta seriale USB;
- modulo radio integrato;
- Connettore per alimentazione con batteria;
- 20 pin GPIO;
- Compatibilità per trasmissione dati seriali SPI e I^2C;
- Possibilità di caricare la batteria tramite cavo USB consentendo comunque il funzionamento;
- Portata della trasmissione: 2 km in linea d'aria;
- Antenna esterna a filo da saldare;
- Pulsante di reset [4.1].

In figura 4.2a è raffigurato il microcontrollore utilizzato. La figura 4.2b riporta lo schema dei pin.

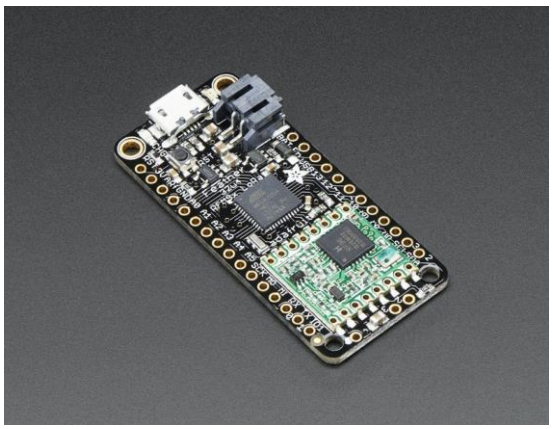


Figura 4.2a Microcontrollore Adafruit Feather M0 Adalogger LoRa [4.1]

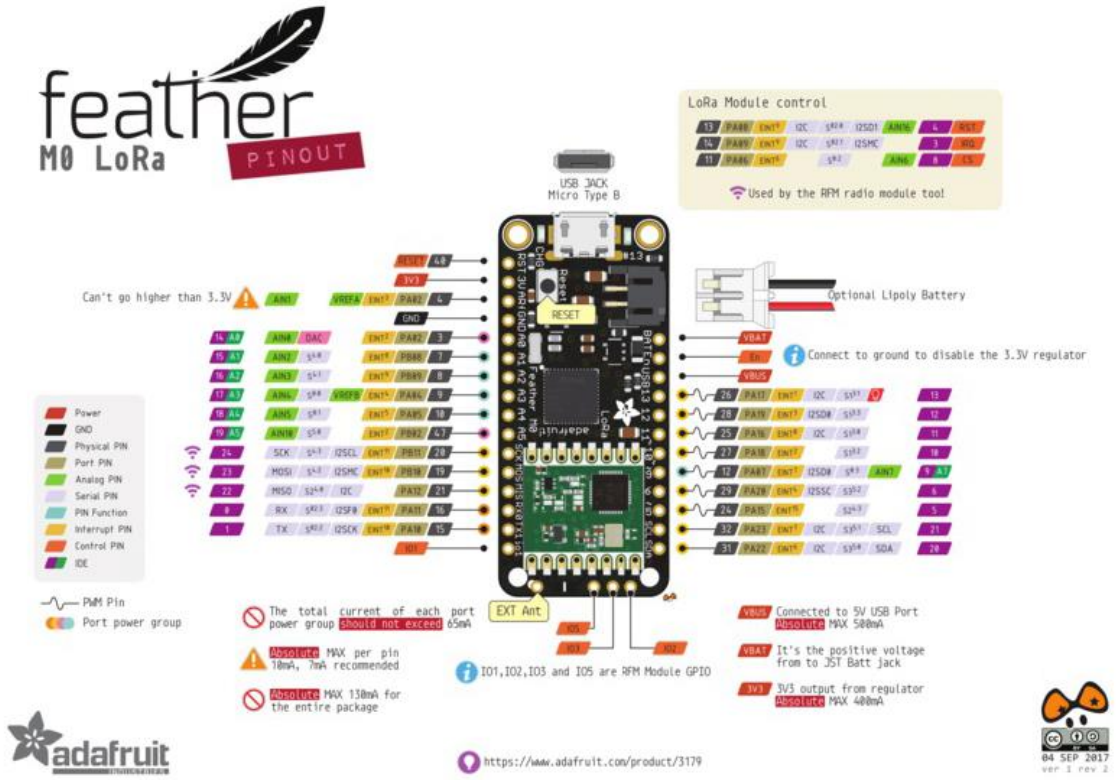


Figura 4.2b Pinout Adafruit M0 LoRa [4.1].

4.1.2 Batteria LiPo

La batteria utilizzata per alimentare il sistema è una batteria a polimeri di litio. Ha una tensione nominale di 3.7V (massima 4.2V), una capacità di 500 mAh ed è ricaricabile. La batteria viene ricaricata, non appena la board viene alimentata tramite linea USB consentendone comunque il funzionamento. Quando la linea seriale USB viene rimossa e la batteria è inserita, la logica di controllo commuta in automatico sulla batteria. Questa garantisce l'alimentazione fintanto che la tensione sotto carico è maggiore di 3.2 V. L'autonomia di carica si aggira, approssimativamente, attorno alle 16 ore. In figura 4.3 è riportata la batteria utilizzata.

Figura 4.3 Batteria Li-Po utilizzata per alimentare il sistema

Nella figura 4.4 è riportato l'andamento della tensione di batteria in funzione del tempo.

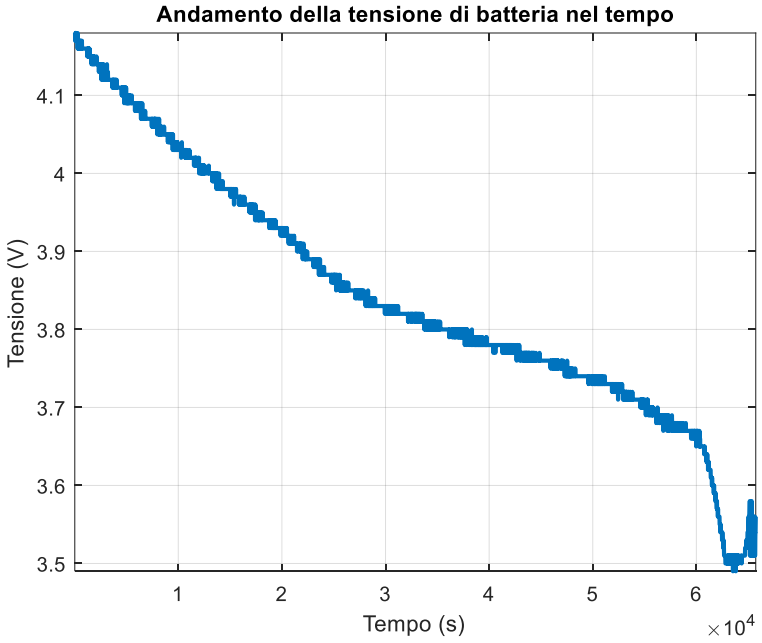


Figura 4.4 Curva di scarica della batteria Li-Po

4.1.3 Adafruit SHT31-D Temperature & Humidity Sensor Breakout

L'Adafruit SHT31D è un sensore di temperatura e umidità relativa di tipo digitale. L'elemento sensibile è l'SHT31-D prodotto dalla "Sensirion". L'intero sensore comunica con il microcontrollore attraverso il protocollo seriale I^2C (indirizzo di default esadecimale 0x44). La temperatura viene misurata con un'accuratezza di ±0.3°C mentre l'umidità relativa con un'accuratezza di ±2%. In figura 4.5 è rappresentato l'intera PCB contenente il sensore e i componenti per la digitalizzazione dei valori letti. I valori di temperatura e umidità letti dal sensore vengono calibrati, linearizzati e compensati in funzione della temperatura dell'ambiante e della tensione di alimentazione (tra 2.4V e 5.5V - tipicamente 3.3V) [3.4d]. La figura 4.6 mostra lo schema a blocchi del sensore.

Figura 4.5 Adafruit SHT31-D [4.2]

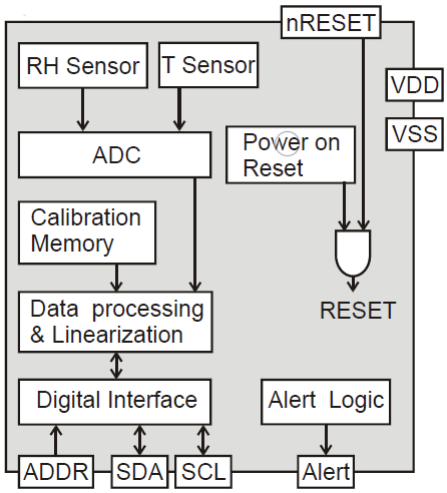


Figura 4.6 Schema a blocchi di funzionamento del sensore SHT31-D [3.4d].

L'Adafruit SHT31-D è composto da 7 pin ciascuno con la seguente funzione:

- VIN: pin di alimentazione (da 2.4V_{DC} a 5V_{DC});
- GND: pin di Ground;
- SCL: Serial Clock pin. Permette la sincronizzazione con il microcontrollore per trasmettere il dato letto attraverso protocollo I^2C. Questo pin è collegato al pin VIN tramite un resistore di pullup da 10KΩ;
- SDA: Serial Data pin. Consente il transito di dati dal sensore al microcontrollore una volta che è avvenuta la sincronizzazione. Questo pin è collegato al pin VIN tramite un resistore di pullup da 10KΩ;
- ADR: pin di indirizzo del dispositivo. Di default l'indirizzo del dispositivo è 0x44 esadecimale. Collegando questo pin al pin VIN l'indirizzo viene modificato in 0x45.
- RST: pin di reset hardware se connesso al ground;
- ALR: Alert/Interrupt output pin [4.2].

4.1.4 Adafruit BME280 Humidity, Barometric Pressure, Temperature Sensor Breakout

L'Adafruit BME280 è un sensore di temperatura, umidità relativa e pressione atmosferica di tipo digitale. L'elemento sensibile è prodotto dalla "Bosch". Il sensore supporta la comunicazione I2C e SPI. La temperatura viene misurata con un'accuratezza di ±1°C, l'umidità relativa con un'accuratezza di ±3% e la pressione atmosferica con un'accuratezza di ±1hPa. È possibile poter misurare anche l'altitudine, con un'accuratezza di ±1m, nota la pressione atmosferica al livello del mare [4.3]. La figura 4.7 mostra l'intero sistema.

Figura 4.7 Adafruit BME280 [4.3].

L'Adafruit BME280 è composto da 7 pin ciascuno con la seguente funzione:

- VIN: pin di alimentazione (da 2.4V_{DC} a 5V_{DC});
- GND: pin di Ground;
- 3Vo: pin di uscita del regolatore di tensione a 3.3V;
- SCK: Serial Clock pin. Permette la sincronizzazione con il microcontrollore per trasmettere il dato letto attraverso protocollo I^2C. Il bus d'indirizzo è 0x77;
- CS: Chip Select pin;
- SD0: Serial Data Out / Master In Slave Out pin;
- SDI: Serial Data In / Master Out Slave In pin [4.3].

4.1.5 Adafruit MMA8451 Accelerometer Breakout

L'Adafruit MMA8451 è un accelerometro di tipo digitale dotato di un convertitore analogico digitale a 14 bit in grado di rilevare variazioni di posizione lungo gli assi x, y e z, ed orientazioni. La massima accelerazione misurabile può essere fissata tra un minimo di ±2g ed un massimo di ±8g. L'intero sensore comunica con il microcontrollore attraverso il protocollo seriale I^2C (indirizzo di default esadecimale 0x1D) [4.4]. La figura 4.8 mostra l'intero sistema.

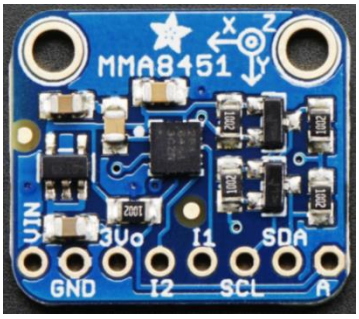


Figura 4.8 Adafruit MMA8451 [4.4]

L'Adafruit MMA8451 è composto da 8 pin ciascuno con la seguente funzione:
- VIN: pin di alimentazione (da 3 V_{DC} a 5 V_{DC});
- GND: pin di Ground;
- 3Vo: pin di uscita del regolatore di tensione a 3.3V;
- SCL: Serial Clock pin. Permette la sincronizzazione con il microcontrollore per trasmettere il dato letto attraverso protocollo I^2C. Il bus d'indirizzo è 0x1D;
- SDA: Serial Data pin. Consente il transito di dati dal sensore al microcontrollore una volta che è avvenuta la sincronizzazione;
- A: pin di selezione di indirizzo (Address). Collegando questo pin al ground l'indirizzo diventa 0x1C;
- I1 e I2: pin di interrupt. Sono raccomandati per un utilizzo avanzato nel momento in cui la lettura è gestita tramite risposta ad interrupt [4.4].

4.1.6 Adafruit DHT22 Sensor

L'Adafruit DHT22 è un sensore di umidità relativa e temperatura di tipo digitale. Nel dettaglio il sensore è costituito da un sensore capacitivo per misurare l'umidità ed un termistore per la temperatura. La figura 4.9 mostra il sensore in esame.

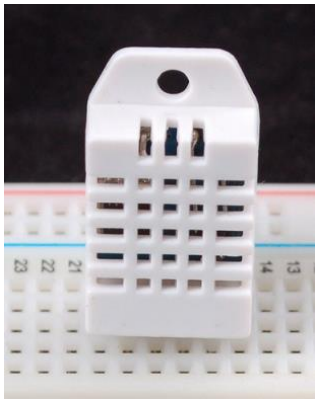


Figura 4.9 Sensore DHT22 [4.5].

Le caratteristiche del sensore sono:

- Alimentazione tra 3V e 5V;

- Corrente massima sulla linea I/O pari a 2.5mA (durante la conversione);
- Ideale per letture di umidità tra 0-100% con un'accuratezza del 2-5%
- Ideale per letture di temperatura tra -40°C e 80°C con un'accuratezza di ±0.5°C;
- Massima frequenza di campionamento: 0.5 Hz [4.5].

4.1.7 Termistori

I termistori utilizzati in questo lavoro sono cinque NTC (Negative Temperature Coefficient) posti a contato con la pelle per determinare la temperature superficiale. La relazione temperatura - resistenza mostrata nell' equazione 4.1:

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \tag{4.1}$$

Dove:

- R_T: Resistenza del termistore alla temperatura T;
- R_0: Resistenza alla temperatura di riferimento (R_0=10 kΩ a T_0=298.15 K);
- B: coefficiente di temperatura caratteristica (B=3960K);
-T: temperatura in Kelvin;
- T_0: temperatura di riferimento in Kelvin (T_0=298.15K).

Il circuito di condizionamento, rappresentato in figura 4.10 tramite schema circuitale, prevede un partitore resistivo con un resistore da 8250Ω. La tensione misurata all'ingresso del canale analogico, da A1 ad A5, è data dalla seguente formula 4.2:

$$V_{analog_input} = V_{cc} \frac{R}{R+R_T} \tag{4.2}$$

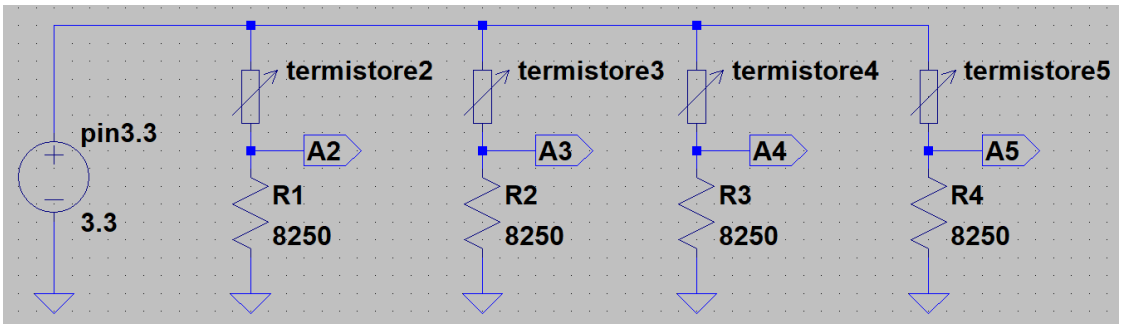
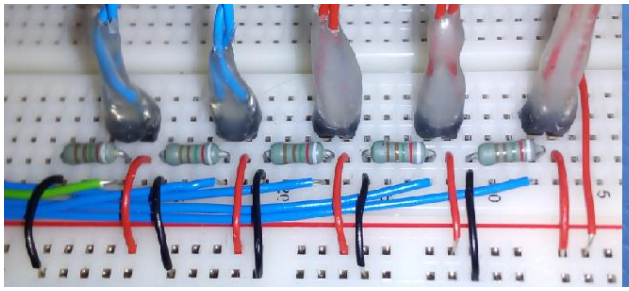


Figura 4.10 Schema circuito di condizionamento.

La figura 4.11 mostra l'hardware del circuito di condizionamento rappresentato su basetta millefori.

A)



B)

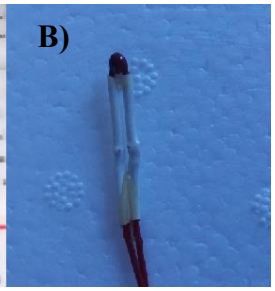


Figura 4.11. A) Hardware del circuito di condizionamento. B) Estremità del termistore a contato con la pelle.

Nella fase successiva al montaggio si è passati alla caratterizzazione dei termistori, verificando l'accuratezza del modello esponenziale a due parametri presentato nell'equazione 4.1. La prova ha previsto l'utilizzo di una camera climatica Vötsch 4018 presente nel Dipartimento. Il setup sperimentale prevedeva l'inserimento dei cinque termistori e di una termocoppia di tipo J della "National Instruments" facendo variare la temperatura della camera fra 20°C e 40°C con salti di 5°C ogni 10 minuti in modo da avere delle letture stabili da ciascuno dei sensori. Il ruolo svolto dalla termocoppia è quello di fornire un valore di lettura di riferimento dopo quello fornito sul display di controllo della camera climatica. Durante la prova sono stati acquisite anche le tensioni in ingresso a ciascuno dei 5 canali analogici. In figura 4.12a e 4.12b sono mostrati rispettivamente gli andamenti di temperatura in funzione del tempo relativo al termistore sul canale analogico A1 del microcontrollore (4.12a) e alla termocoppia(4.12b).

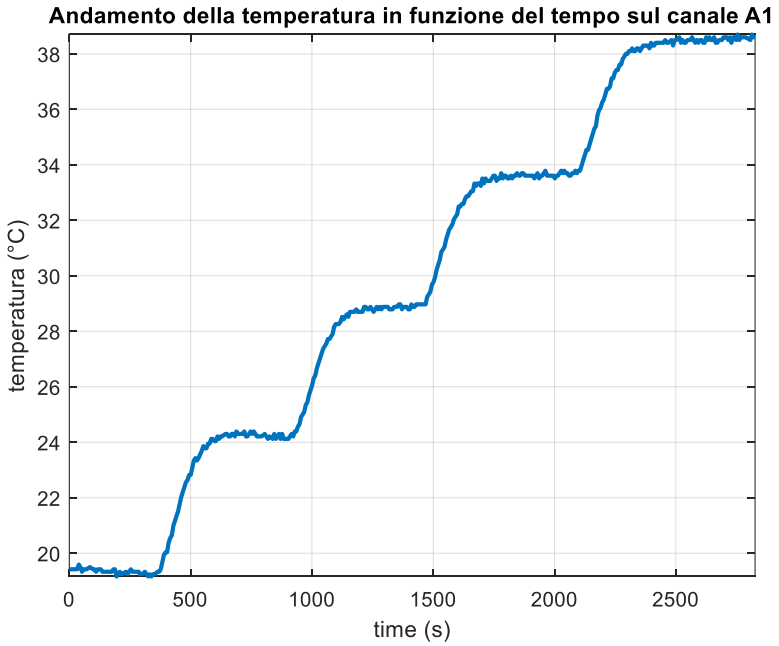


Figura 4.12a Temperatura del termistore sul canale A1.

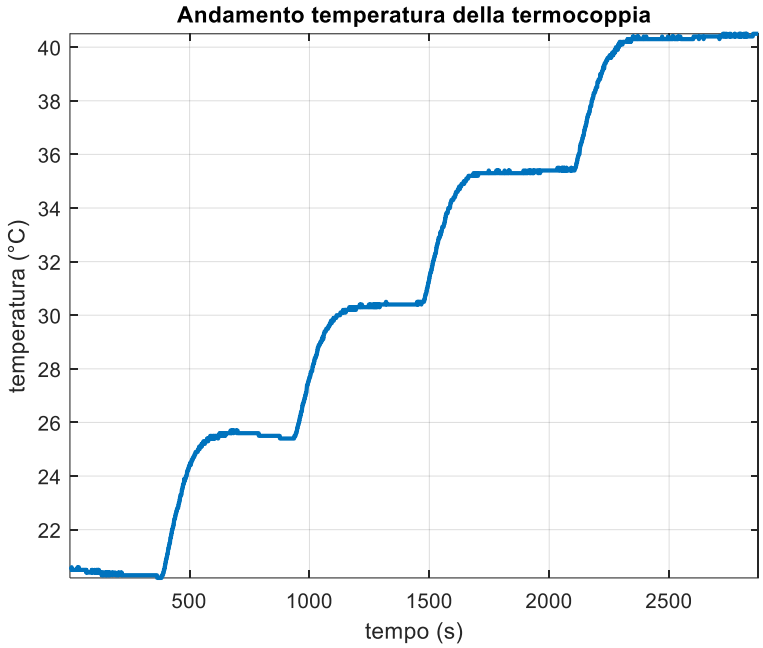


Figura 4.12b Temperatura termocoppia.

Con i valori di temperatura così determinati sono stati calcolati gli errori di misura di temperatura come la differenza tra la temperatura del termistore e la lettura fornita dalla camera climatica, figura 4.13a, e, successivamente, la differenza tra la temperatura del medesimo termistore e quella fornita dalla termocoppia, figura 4.13b.

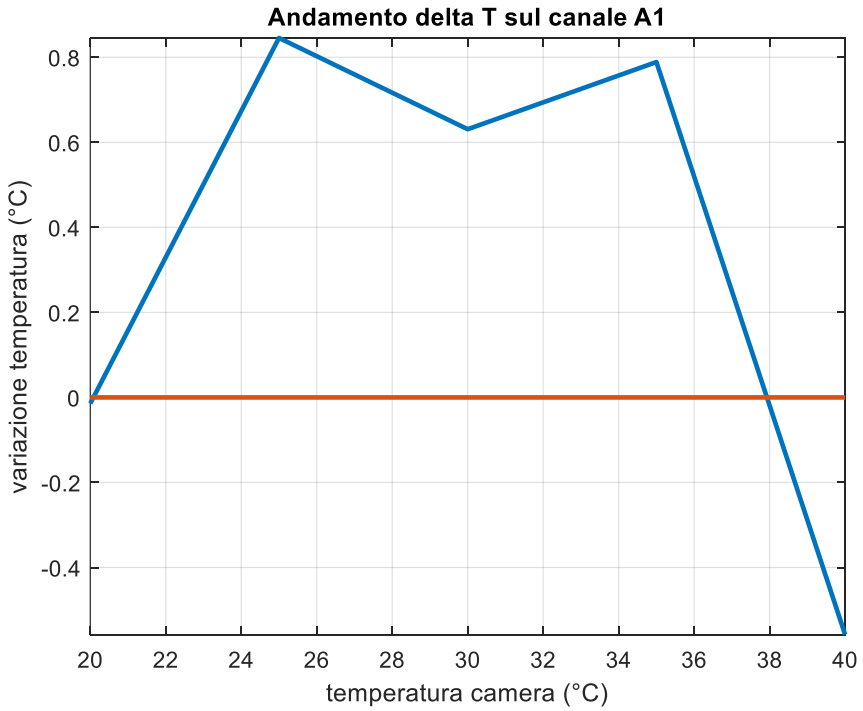


Figura 4.13a Differenza tra la temperatura del termistore e quella della camera climatica.

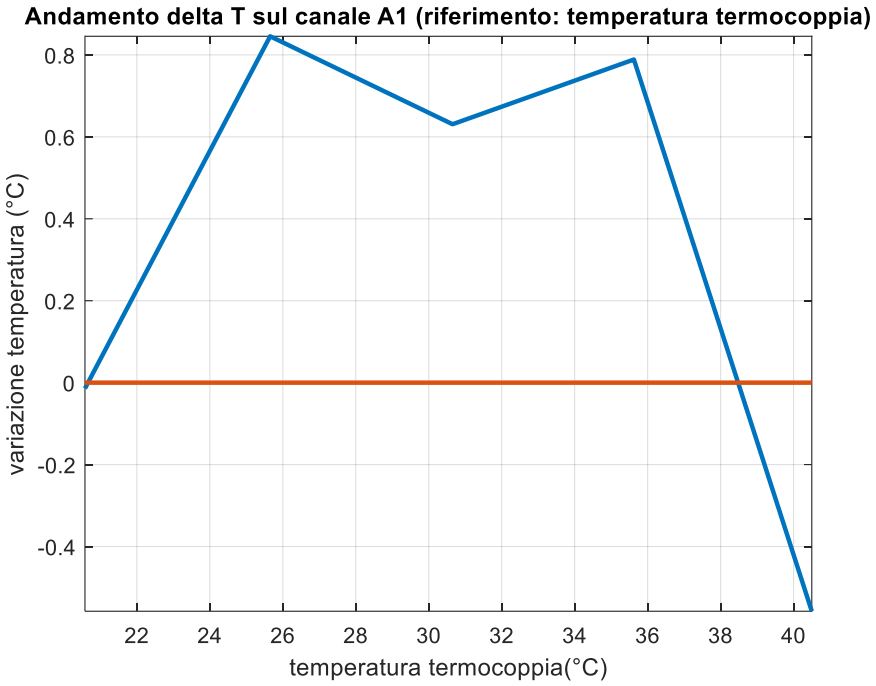


Figura 4.13b Differenza tra la temperatura del termistore e quella della termocoppia.

Come si può notare dalle precedenti figure (§Figura 4.13a Figura 4.13b) il valore del termistore si discosta fino ad un massimo di 0.8°C dal valore di riferimento. Per cercare di ridurre questo termine di errore si è proceduti con una caratterizzazione tensione – temperatura del termistore considerando come riferimento la temperatura della camera andando ad effettuare un'interpolazione quadratica dei dati. Le tensioni ai capi dei termistori, note, possono essere espresse, in funzione della temperatura t secondo la relazione 4.3:

$$V_{analog_input} = at^2 + bt + c \tag{4.3}$$

Invertendo la relazione 4.3 è possibile determinare la temperatura misurata dai termistore in funzione della loro tensione ai capi secondo la relazione 4.4:

$$T_{termistore} = a' {V_{analog_input}}^2 + b' V_{analog_input} + c' \tag{4.4}$$

Con i valori di temperatura così determinati sono state calcolate le variazioni rispetto alla temperatura della camera, figura 4.14.

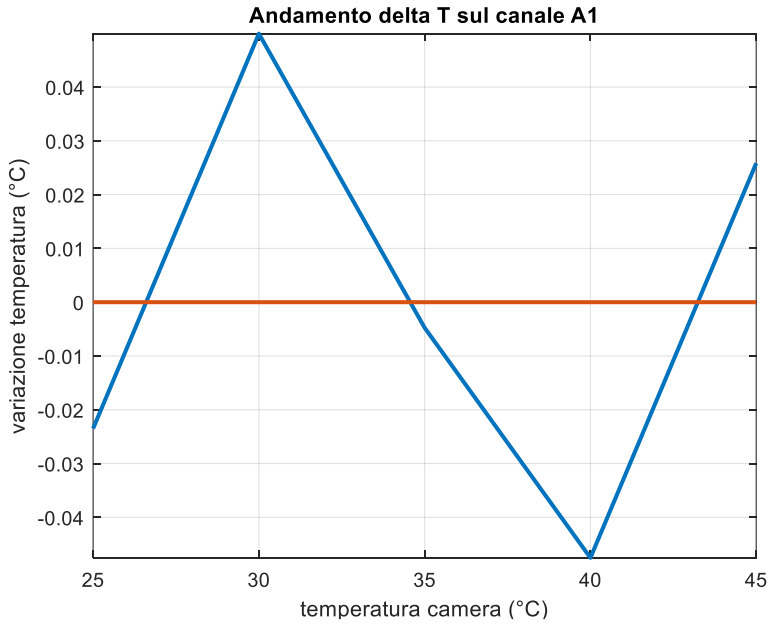


Figura 4.14 Differenza di temperatura tra quella misurata dal termistore e quella della camera. Il test è stato condotto portando la camera climatica fino a 45°C.

Come si può notare il valore del termistore si discosta fino ad un massimo di 0.05°C dal valore di riferimento riducendo così il termine di errore.

4.2 Hardware definitivo

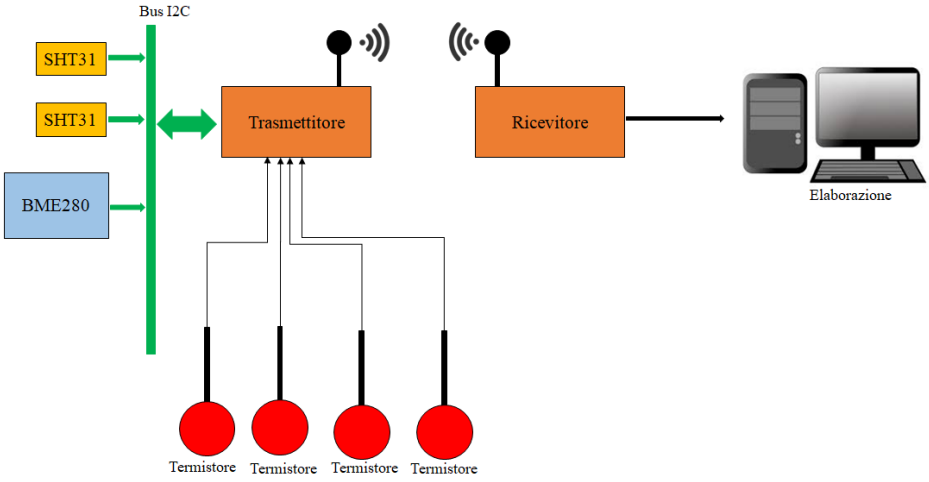


Figura 4.15 Schema a blocchi del sistema.

La figura 4.15 mostra lo schema a blocchi definitivo del sistema che comprende due sensori digitali SHT31, un sensore digitale BME280 e quattro termistori a goccia. Sono stati scelti questi componenti per le loro ridotte dimensioni, facilità di utilizzo e ridotti tempi di attesa dei dati. La figura 4.16 mostra lo schema circuitale del sistema così

definito. I sensori digitali sono stati collegati tramite un'unica linea seriale negli appositi contenitori. La figura 4.17 mostra il sistema definitivo da testare.

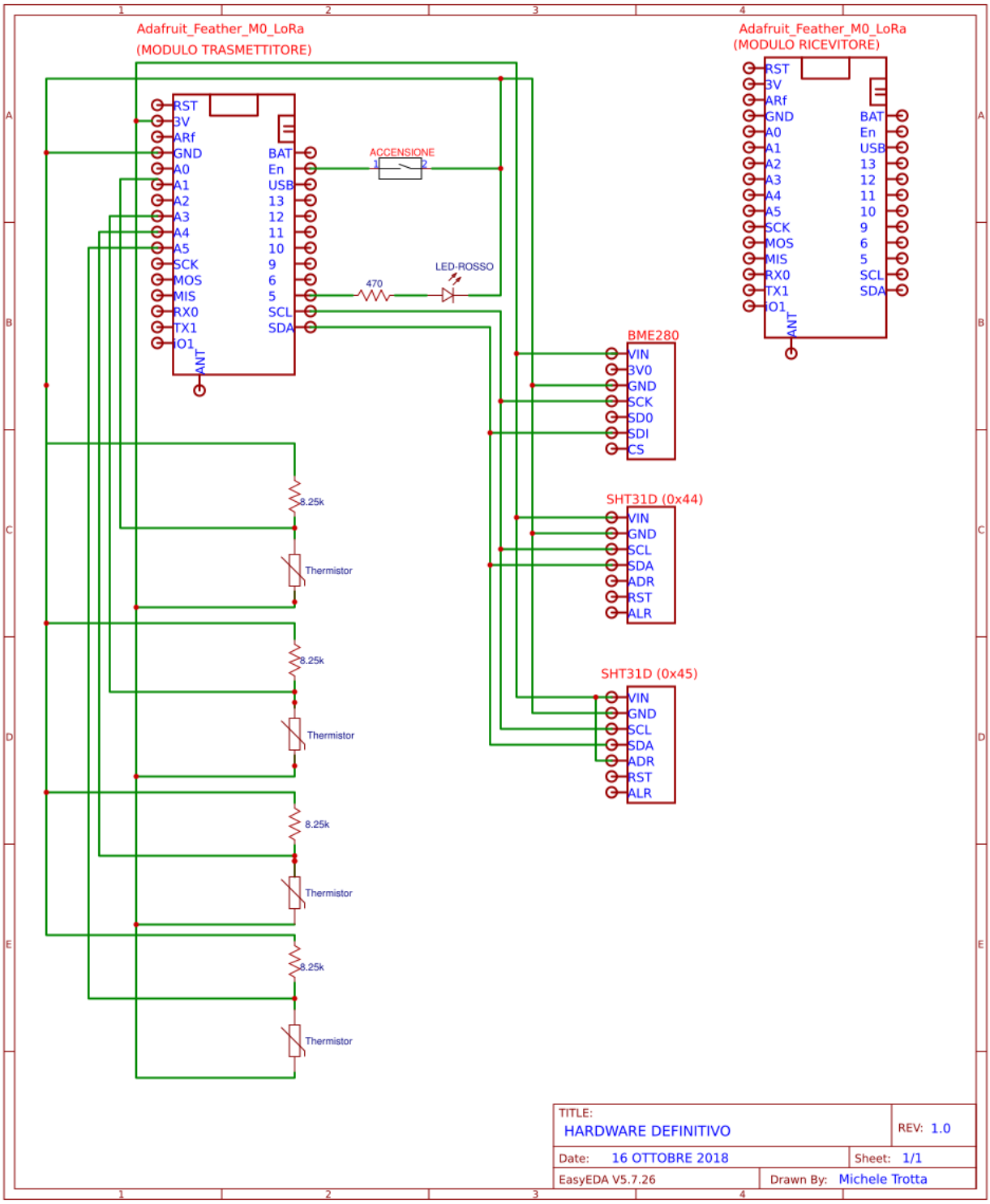


Figura 4.16 Schema hardware definitivo.

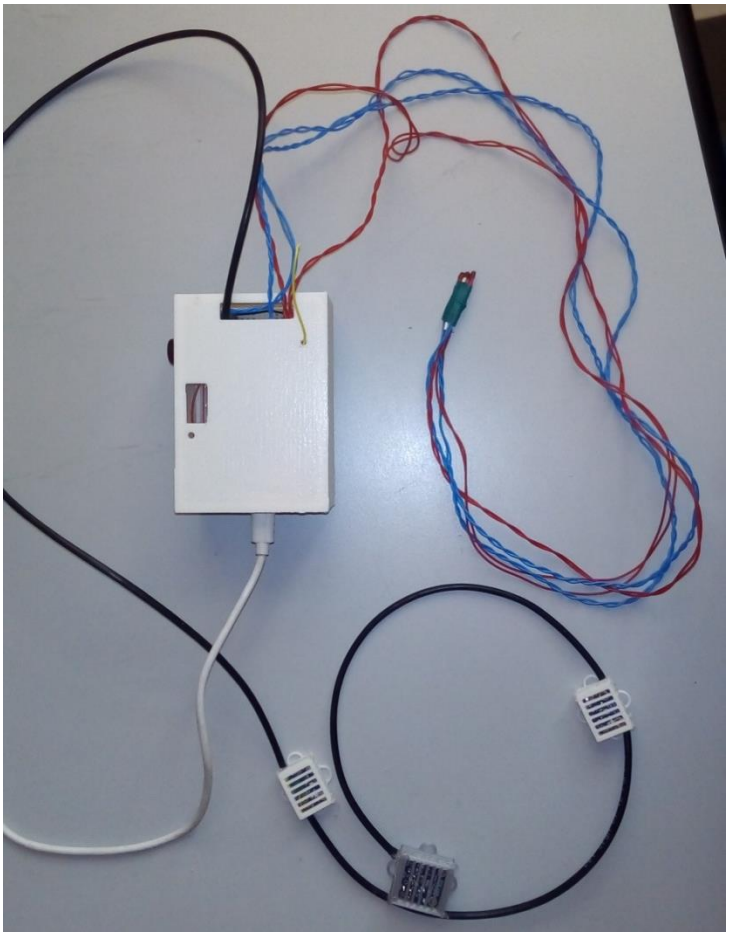


Figura 4.17 Sistema definitivo.I cavi rossi e blu sono le termocoppie collegate ai canali analogici. Il cavo nero è il bus seriale I2C. Il cavo bianco, rimovibile, consente la ricarica della batteria interna.

CAPITOLO 5. Realizzazione dei contenitori tramite stampa 3D

In questa sezione viene trattato lo sviluppo dei contenitori dei componenti del sistema attraverso una prima fase di progettazione CAD e successivamente di realizzazione. Tali fasi hanno consentito la realizzazione dei contenitori per il microcontrollore, il ricevitore ed i contenitori per i sensori SHT31D e BME280. Lo sviluppo CAD è stato realizzato con il software "Openscad". La stampante utilizzata è una WASP Delta 2040 ed il materiale è il PLA. Il software utilizzato per generare il gcode utile per la stampa è "Cura 3.4.1".

5.1 Realizzazione del contenitore per il trasmettitore

Il contenitore per il trasmettitore deve alloggiare microcontrollore FeatherLoRa, la batteria LiPo per l'alimentazione, un circuito di condizionamento per quattro termistori. Tutto il sistema viene montato su una basetta sperimentale da 400 fori. La scatola, di dimensioni 64 x 91 x 35 mm, è dotata di un'apertura di 10 x 5 mm per consentire la ricarica della batteria, di un'apertura di 1.5 x 1.5 mm per consentire il passaggio del cavo antenna, di un'aperutra di dimensioni pari a 31 mm x 7 mm, per i connettori dei termistori e della linea seriale e di un'apertura di raggio pari a 10 mm per il pulsante di accensione. Quest'ultima è stata ottenuta per foratura dopo la stampa. Le pareti interne hanno uno spessore di 2 mm. Sul lato inferiore del contenitore è stata montata una clip per rendere il dispositivo indossabile. In figura 5.1 è raffigurato il CAD della scatola.

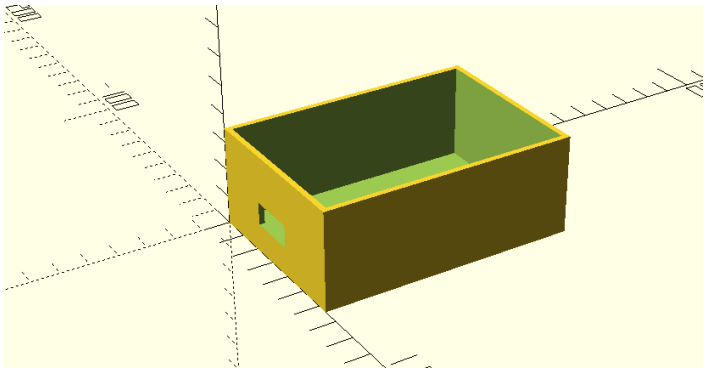


Figura 5.1 CAD scatola trasmettitore.

La scatola viene chiusa tramite un coperchio di dimensioni 64 x 91 x 2 mm. In figura 5.2 è raffigurato il CAD del coperchio.

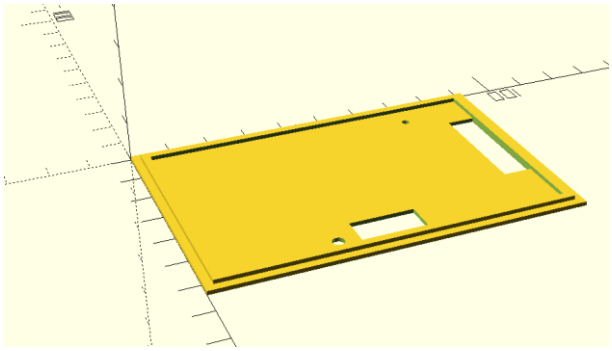


Figura 5.2 CAD coperchio del trasmettitore.

Nella figura 5.3 è raffigurata la scatola al termine della stampa e con il sistema in sede.

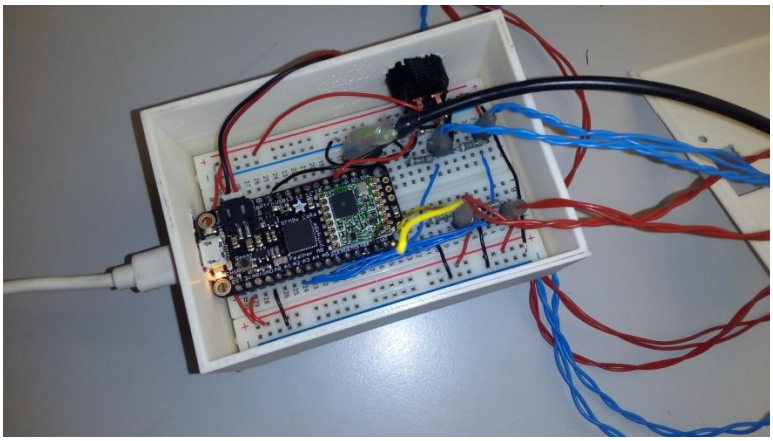


Figura 5.3 Scatola al termine della stampa con il sistema di acquisizione.

5.2 Realizzazione del contenitore per il ricevitore

Il contenitore per il ricevitore deve alloggiare il solo microcontrollore FeatherLoRa configurato come ricevitore. La scatola, di dimensioni 54 x 26 x 10 mm, è dotata di un'apertura di 9 x 4 mm per il jack di alimentazione e di un'apertura di 1.5 x 1.5 mm per consentire il passaggio del cavo antenna. Le pareti interne hanno uno spessore di 1 mm. In figura 5.4 è raffigurato il CAD della scatola.

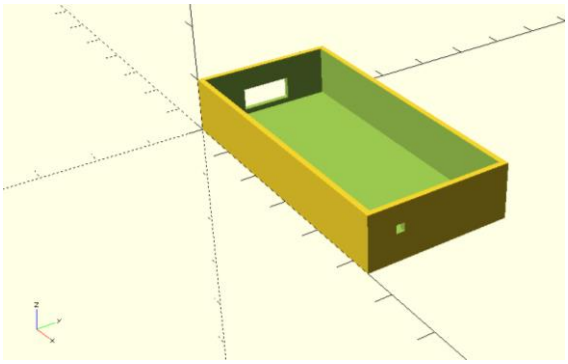


Figura 5.4 CAD della scatola del ricevitore.

La scatola viene chiusa tramite un coperchio di dimensioni 54 x 26 x 2 mm per consentire l'inserimento del microcontrollore. In figura 5.5 è raffigurato il CAD del coperchio.

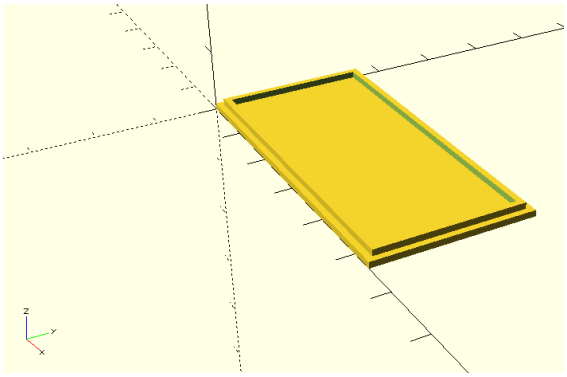


Figura 5.5 CAD del coperchio del ricevitore.

Nella figura 5.6 è raffigurata la scatola al termine della stampa, mentre nella figura 5.7 è raffigurata la scatola con il ricevitore inserito.

Figura 5.6 Scatola al termine della stampa.

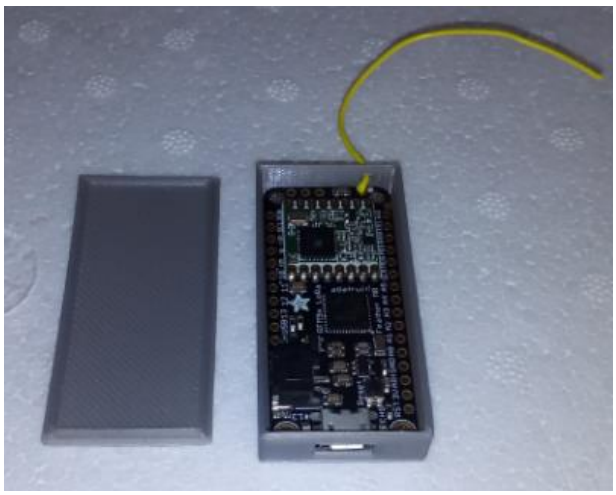


Figura 5.7 Ricevitore posizionato.

5.3 Realizzazione dei contenitori per i sensori SHT31D e BME280

5.3.1 Realizzazione del contenitore per il sensore SHT31D

Il contenitore del sensore SHT31D deve essere realizzato in maniera tale da poter consentire il passaggio dell'aria e del vapore acqueo in maniera tale da consentire le misure di temperatura e umidità. A tal fine la struttura, di dimensioni 22 x 17 x 7 mm, è dotata di una serie di fori di raggio pari ad 1mm disposti lungo tutti i lati. Lungo ciascuno dei lati minori è presente un foro di raggio pari a 2mm per consentire il passaggio dei fili di alimentazione e dei dati. Il coperchio, di dimensioni 22 x 17 x 2 mm, è costituito da una serie di sei aperture rettangolari per favorire il passaggio dell'aria. Tutta la scatola è dotata di quattro asole di 3mm di raggio per permettere il fissaggio sull'indumento. In figura 5.8 e 5.9 sono rappresentati CAD della scatola e del coperchio.

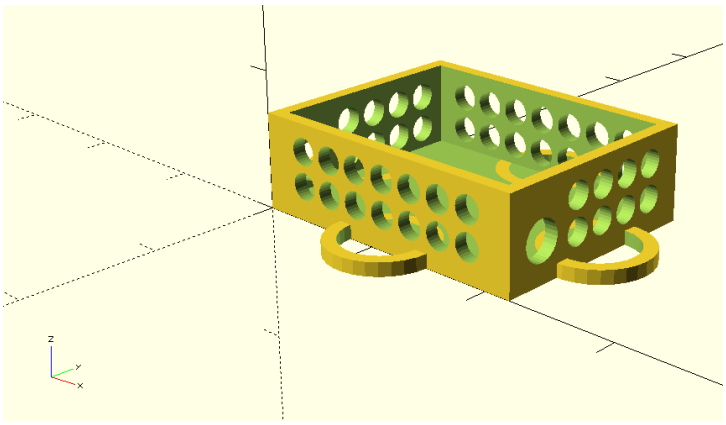


Figura 5.8 CAD scatola SHT31D.

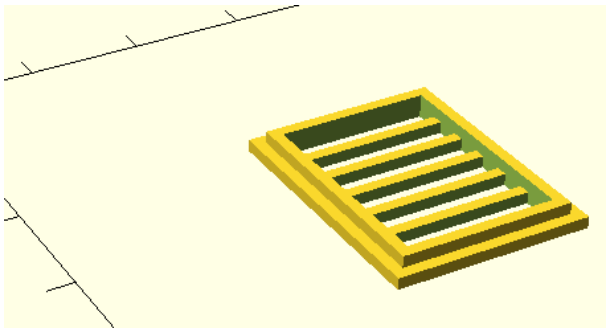


Figura 5.9 CAD coperchio SHT31D.

In figura 5.10 è raffigurata la scatola con il sensore inserito.

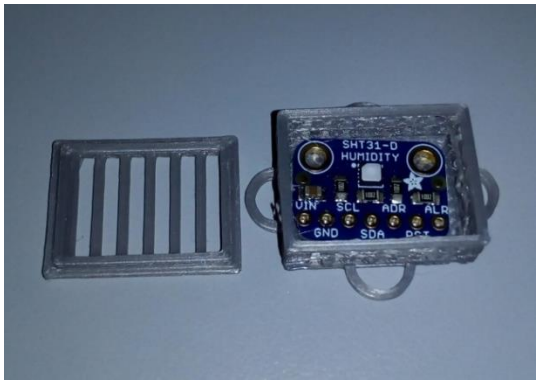


Figura 5.10 Scatola del sensore SHT31D.

5.3.2 Realizzazione del contenitore per il sensore BME280

Analoghe considerazioni circa l'esigenza di favorire il passaggio dell'aria sono state fatte anche in merito alla realizzazione della scatola del sensore BME280. La struttura, di dimensioni 24 x 22 x 7 mm, è dotata anch'essa di una serie di fori di raggio pari ad 1mm disposti lungo tutti i lati e presenta un solo foro di raggio pari a 2mm per consentire il passaggio dei fili di alimentazione e di dati . Il coperchio, di dimensioni 24 x 22 x 2 mm, è costituito da una serie di sei aperture rettangolari per favorire il passaggio dell'aria. Tutta la scatola, come la precedente, è dotata di quattro asole di 3mm di raggio per permettere il fissaggio sull'indumento. In figura 5.11 e 5.12 sono rappresentati CAD della scatola e del coperchio.

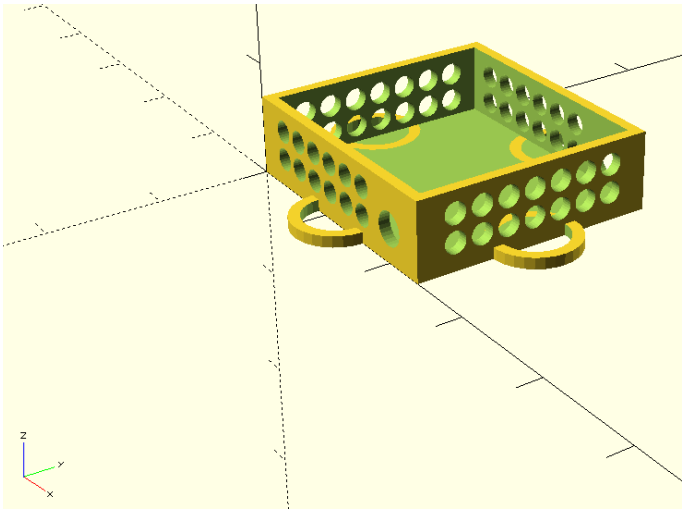


Figura 5.11 CAD scatola BME280.

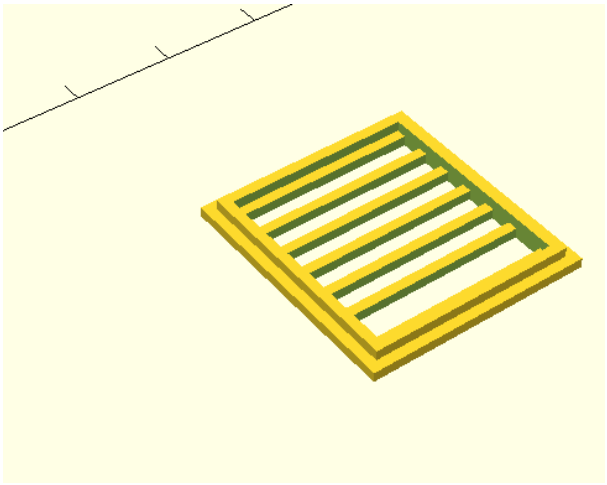


Figura 5.12 CAD coperchio BME280.

In figura 5.13 è raffigurata la scatola con il sensore inserito.

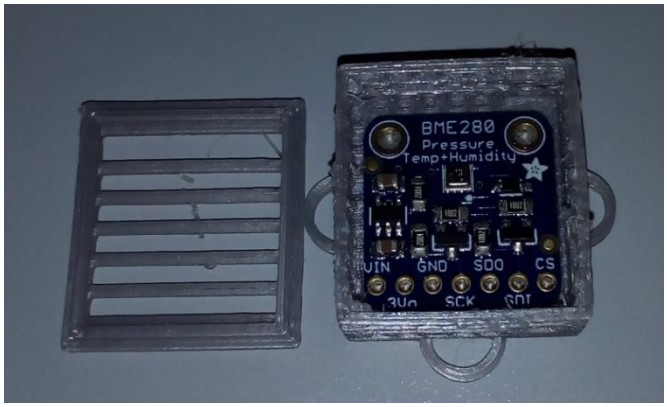


Figura 5.13 Scatola sensore BME280.

CAPITOLO 6. Sviluppo del software

In questa sezione verranno illustrati e descritti i software utilizzati per l'acquisizione dei dati e per la loro rappresentazione in tempo reale. Sia il trasmettitore che il ricevitore sono stati programmati utilizzando l'ide di Arduino nella versione 1.8.5. La lettura dei dati trasmessi dal ricevitore via seriale è stata effettuata in ambiente Matlab R2017b – academic use. In appendice sono riportati, per intero, gli algoritmi utilizzati in ciascuna parte del lavoro.

6.1 Codice del microcontrollore trasmettitore

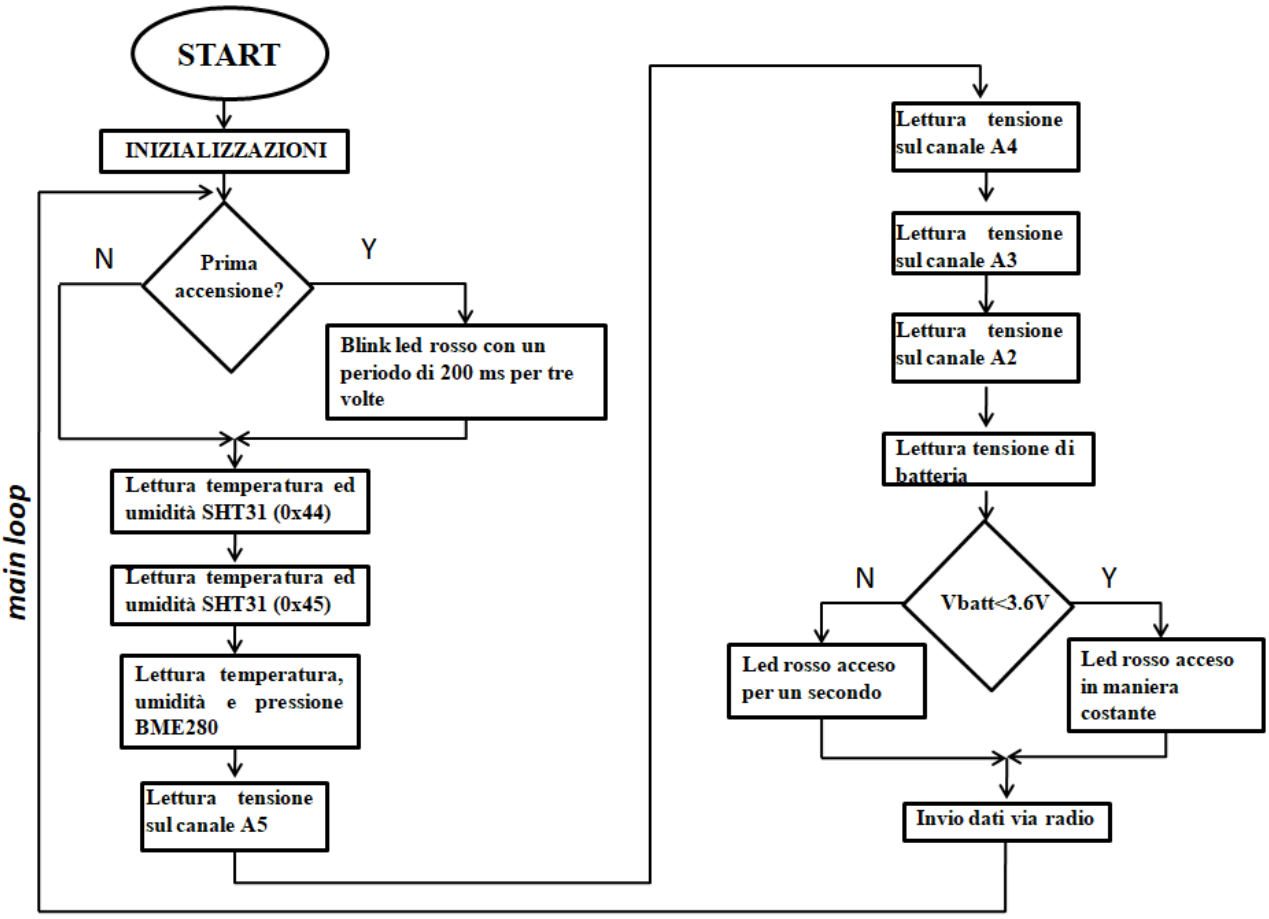


Figura 6.1 Flow chart codice trasmettitore.

Il codice del microcontrollore trasmettitore deve occuparsi della lettura dei dati dai tre sensori digitali, della lettura dei dati dai quattro sensori analogici e dell'invio dei dati via radio (§cfr. figura 6.1). In fase di inizializzazione vengono richiamate tutte le librerie Adafruit dei sensori digitali e del modulo radio (*RH_RF95.h*). Vengono definiti i pin d'ingresso dei sensori analogici ed il pin a cui è collegato il led per il blinking sullo stato di carica della batteria (pin5). Per quanto riguarda il modulo radio viene definita la

frequenza di trasmissione impostata a 915 MHz e la potenza massima in trasmissione pari a 23dBm (circa 200 mW). In ultima istanza vengono inizializzati i sensori digitali.
Prima di eseguire le istruzioni contenute nel main loop, il microcontrollore esegue un controllo sull'accensione verificando se il main loop che sta per eseguire è il primo. In caso affermativo, cioè il sistema è stato da poco alimentato, viene fatto lampeggiare il led rosso per tre volte con un periodo di 200 ms.
Terminata la fase di controllo accensione il microcontrollore inizia con la lettura dei valori dai sensori digitali seguendo il protocollo I^2C. Ciascun sensore è identificato da un indirizzo esadecimale (0x44, 0x45 per il SHT31 e 0x77 per il BME280). Interpellando ciascun sensore, con il proprio indirizzo, con una richiesta di comunicazione il microcontrollore acquisisce i valori di temperatura, umidità e pressione atmosferica da questi. Tutti i valori acquisiti vengono salvati in apposite variabili (*te1, hu1, te2, hu2* per i due sensori SHT31 e *te280, hu280* e *pr280* per il sensore BME280).
Dopo la lettura dei sensori digitali si procede alla lettura delle tensioni analogiche prelevate dai partitori resistivi con i quattro termistori e si salvano i valori in altrettante cinque variabili (*tensione5, tensione4, tensione3, tensione2*).
Al termine di questa fase di acquisizione si procede con la lettura della tensione di batteria. Il microcontrollore legge la tensione dall'apposito pin dedicato (A7) e pilota l'accensione del led in maniera prolungata se il valore di tensione acquisito è inferiore a 3.6V. Questa condizione di allarme evidenzia la necessità di ricaricare la batteria al più presto possibile. Se invece la tensione è superiore alla soglia stabilita il led rosso viene acceso per solo un secondo e successivamente spento. Il valore di tensione viene salvato in una variabile (*Vbatt*).
Il microcontrollore, al termine delle operazioni di acuisizione dei dati, salva in una variabile (*tempo*) il numero di millisecondi intercorsi tra l'accensione del sistema e il termine dell'i-esimo loop.
Le variabili salvate, in formato *float*, sono quelle che vengono inviate al ricevitore radio. Il modulo radio del trasmettitore invia i dati in formato *uint8_t*. Prima di procedere a questa conversione tramite un'operazione di cast è fondamentale assegnare a ciascun valore da inviare un prefisso di tre caratteri che identifica la grandezza (o temperatura o umidità o pressione) e il sensore da cui proviene. A tal fine il dato letto e allocato viene convertito in c*har.* A questa stringa viene aggiunto il prefisso identificativo di tre caratteri in formato *char* ottenendo un'unica stringa. Sulla stringa così definita viene effettuato il cast. La figura 6.2 schematizza quanto detto. Tutti i valori così ottenuto vengono memorizzati in una matrice (*dato*) ed inviata riga per riga.

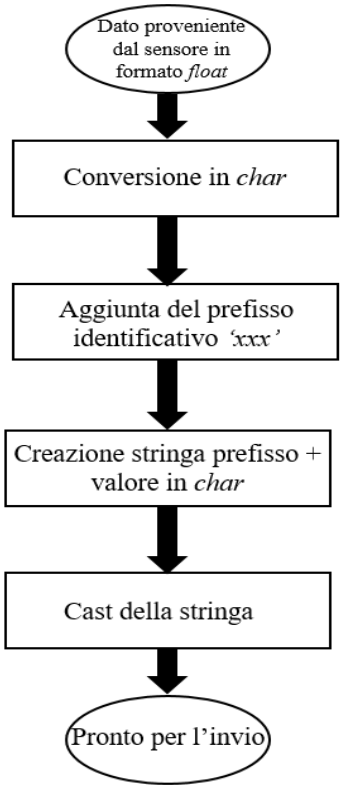


Figura 6.2 Schematizzazione del cast con aggiunta del prefisso identificativo.

6.2 Codice del microcontrollore ricevitore

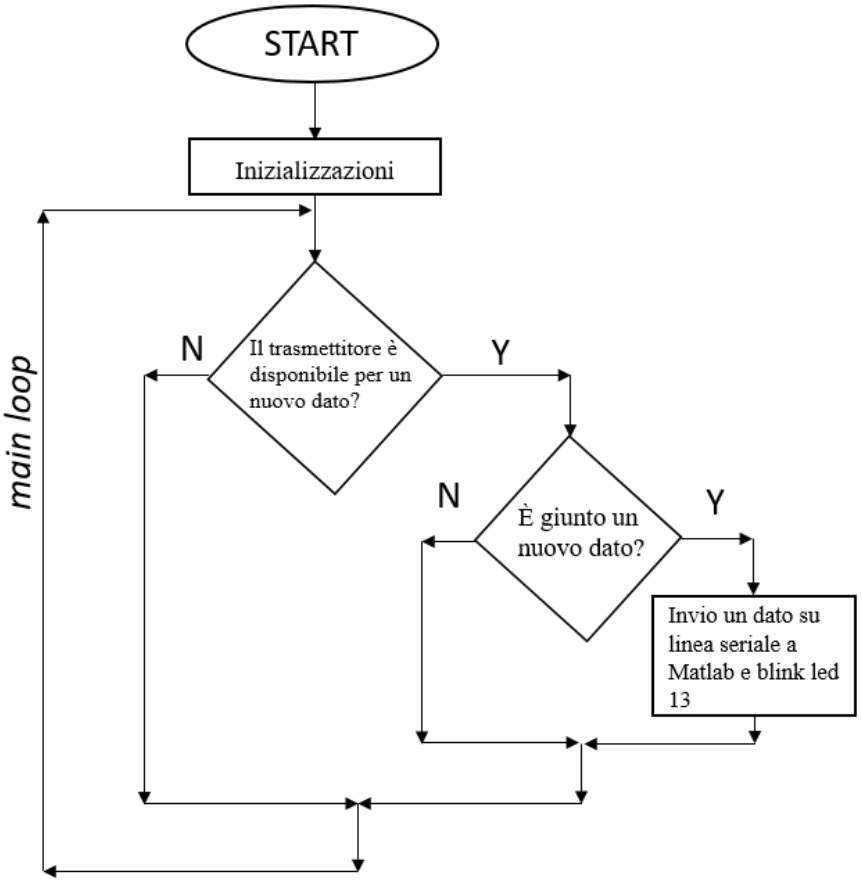


Figura 6.3 Flow chart codice ricevitore.

Il codice del microcontrollore ricevitore, il cui flow chart è rappresentato in figura 6.3, deve occuparsi della ricezione dei dati inviati dal trasmettitore e trasferirli, via seriale USB, ad un computer per consentirne l'elaborazione. La velocità di trasmissione dei dati su linea seriale è fissata pari ad 115200 baudrate. In fase di inizializzazione viene richiamata la libreria del modulo radio, viene definito il pin a cui è collegato il led per il blinking (pin13) una volta che il dato è stato ricevuto. Per quanto riguarda la frequenza di ricezione questa è impostata a 915 MHz e la potenza massima in ricezione è pari a 23dBm.

Al termine delle inizializzazioni si verifica se il trasmettitore è disponibile alla ricezione di un nuovo dato (*rf95.aviable()*). In caso affermativo verifica se è presente un dato pendente che non è stato trasferito al software di elaborazione. In caso affermativo lo acquisisce e lo converte dal formato *uint8_t*, necessario in fase di invio, al formato *char* per consentirne l'acquisizione dal software a valle. Se il modulo radio non è disponibile alla ricezione di un nuovo dato compare un messaggio di errore ('*Receive failed'*) fintanto che il dato che ha in carico non è stato trasferito.

6.3 Codice acquisizione dati tramite linea seriale

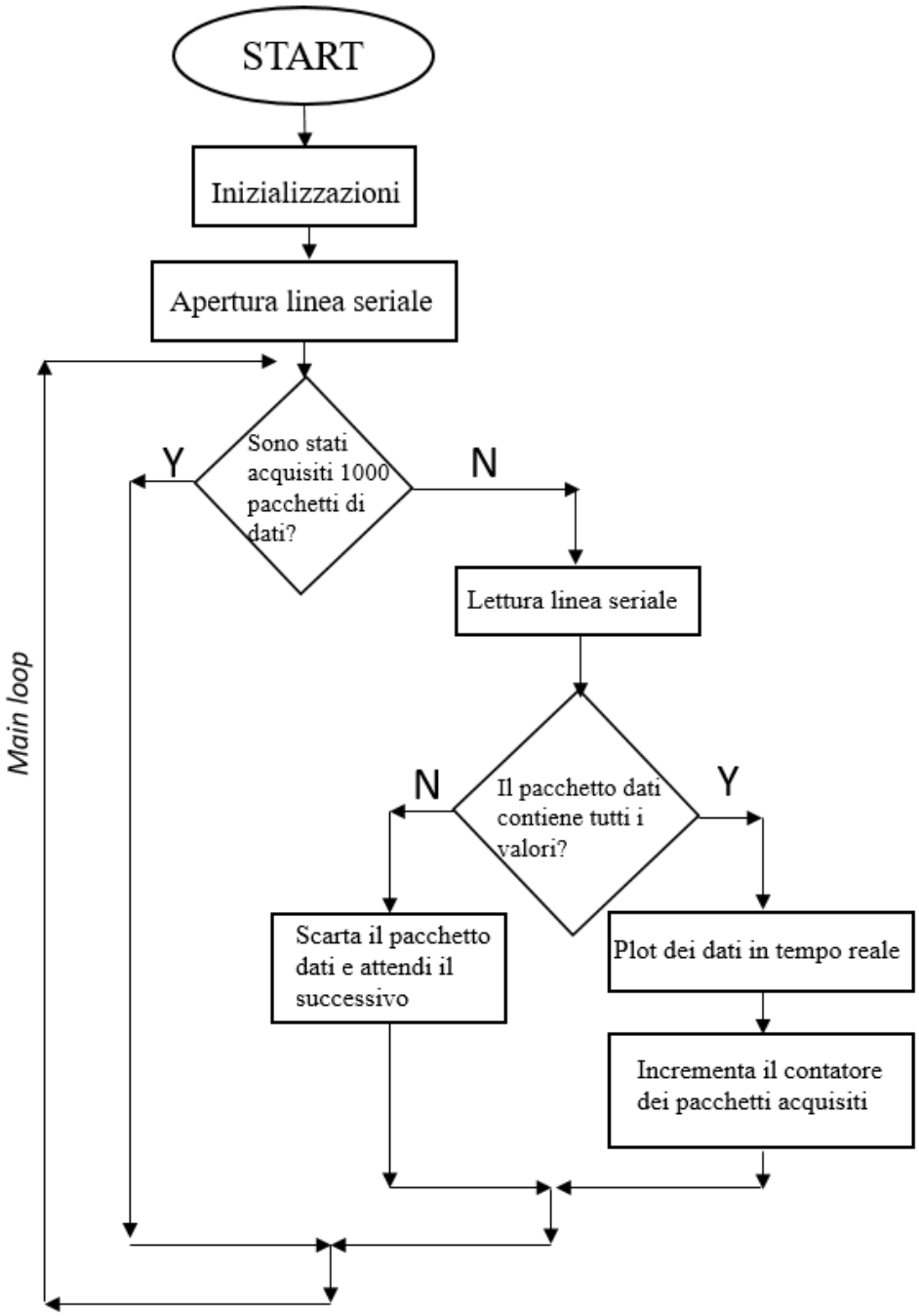


Figura 6.4 Flow chartacquisizione dati.

Il codice di acquisizione e gestione dei dati provenienti dal ricevitore, il cui flow chart è rappresentato in figura 6.4, è stato realizzato in Matlab. Come accennato nel paragrafo 6.1 i valori misurati dai sensori sono correlati da un prefisso identificativo per fronteggiare due anomalie che possono incorrere:

- un dato può essere perso durante la trasmissione radio;

- un dato può essere perso durante il trasferimento tra il ricevitore ed il PC.

In entrambi i casi Matlab non è in grado di stabilire quale dato è stato perso e quindi alloca variabili errate in vettori errati secondo quanto schematizzato in figura 6.5.

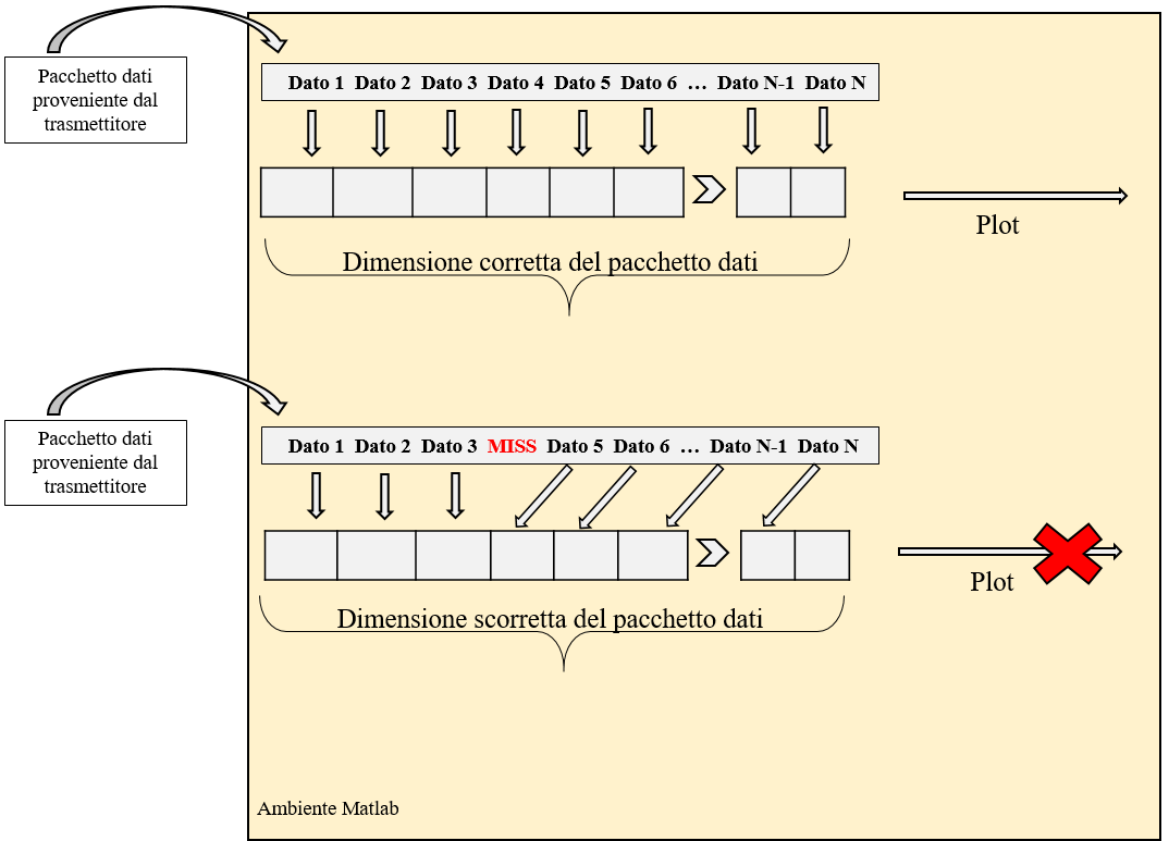


Figura 6.5 Errore di gestione dati senza il prefisso identificativo in Matlab.

La presenza del prefisso evita ciò in quanto, se un dato dovesse mancare, il pacchetto verrebbe scartato e si attenderebbe il successivo per rappresentarlo. In fase di inizializzazione l'algoritmo inizializza il numero di pacchetti dati da acquisire e le variabili da acquisire e rappresentare graficamente in tempo reale. Le variabili sono:

- Tensione di batteria (*batteria*);
- Temperatura del sensore SHT31 con indirizzo 0x44 (*tempSHT31_1*);
- Umidità del sensore SHT31 con indirizzo 0x44 (*humSHT31_1*);
- Temperatura del sensore SHT31 con indirizzo 0x45 (*tempSHT31_2*);
- Umidità del sensore SHT31 con indirizzo 0x45 (*humSHT31_2*);
- Temperatura del sensore BME280 (*tempBME280*);
- Umidità del sensore BME280 (*humBME280*);
- Pressione del sensore BME280 (*pressBME280*);
- Tensione del partitore resistivo sul canale analogico A5 (*tens5*);

- Tensione del partitore resistivo sul canale analogico A4 (*tens4*);
- Tensione del partitore resistivo sul canale analogico A3 (*tens3*);
- Tensione del partitore resistivo sul canale analogico A2 (*tens2*);
- Contatore intervallo di tempo dall'accensione del microcontrollore (*counter*).

Terminata questa fase Matlab definisce ed apre la linea seriale con il trasmettitore acquisendo e memorizzando la stringa letta in una variabile (*str*). Del valore acquisito i primi indici sono dei caratteri di identificazione (prefisso identificativo) gli altri costituiscono la lettura. I codici identificativi sono:

- ***bat***{VALORE}: identifica il valore della tensione di batteria;
- ***st1***{VALORE}: identifica il valore della temperatura del sensore SHT31 all'indirizzo 0x44;
- ***sh1***{VALORE}: identifica il valore della umidità del sensore SHT31 all'indirizzo 0x44;
- ***st2***{VALORE}: identifica il valore della temperatura del sensore SHT31 all'indirizzo 0x45;
- ***sh2***{VALORE}: identifica il valore della umidità del sensore SHT31 all'indirizzo 0x45;
- ***bmt***{VALORE}: identifica il valore della temperatura del sensore BME280;
- ***bmh***{VALORE}: identifica il valore dell'umidità del sensore BME280;
- ***bmp***{VALORE}: identifica il valore della pressione atmosferica del sensore BME280;
- ***vg5***{VALORE}: identifica il valore della tensione sul canale A5;
- ***vg4***{VALORE}: identifica il valore della tensione sul canale A4;
- ***vg3***{VALORE}: identifica il valore della tensione sul canale A3;
- ***vg2***{VALORE}: identifica il valore della tensione sul canale A2;
- ***tmp***{VALORE}: identifica il valore del contatore temporale.

Una volta che la stringa viene acquisita e riconosciuta, la quantità {VALORE} viene convertita in valore numerico.
Questi valori devono essere acquisiti dall'algoritmo in maniera sequenziale nell'ordine illustrato nell'elenco precedente. Se i dati non dovessero comparire in tal modo allora almeno un valore è stato perso ed il pacchetto deve essere scartato attivando un opportuno flag di controllo (*errore=1*). L'algoritmo, a causa di possibili ritardi nell'invio di due dati consecutivi, verifica anche che non abbia acquisito una stringa nulla. In caso ciò dovesse accadere lo stesso flag di controllo viene attivato ed attende il prossimo pacchetto dati.

CAPITOLO 7. Risultati

In questo capitolo verranno illustrati ottenuti in fase di test del dispositivo su un volontario che esegue attività fisica. In particolare sono state eseguite due prove. La prima è stata condotta presso la camera climatica sita nella Città Studi di Biella su un volontario con lo scopo di determinare la condizione di discomfort climatico in termini di temperatura ed umidità relativa sulla cute. La seconda prova, sempre tramite un volontario, prevede un confonto tra il dispositivo realizzato ed alcune soluzioni presenti in commercio.

7.1 Prova 1: Test su volontario per la deteminazione della sensazione del discomfort.

Il volontario è un individuo di sesso maschile di 26 anni praticante attività sportiva a livello agonistico. Il protocollo del test prevede una prova della durata complessiva di 30 minuti in cui il volontario pedala su cyclette aumentando, ad intervalli di tempo regolari, il carico della pedalata espresso in Watt. In particolare:

- Riscaldamento: 10 minuti con carico pedivella: 37W;
- 1° aumento: 3 minuti con carico pedivella pari a 42 W;
- 2° aumento: 2 minuti con carico pedivella pari a 54 W;
- 3° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 90 W;
- 4° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 95 W;
- 5° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 108 W;
- 6° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 121 W;
- 7° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 128 W;
- 8° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 140 W;
- 9° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 152 W;
- 10° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 155 W;
- 11° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 165 W;
- 12° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 176 W;
- 13° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 178 W;
- 14° aumento: 1 minuto con carico pedivella pari a 181 W;
- Defaticamento: 5 minuti con carico pedivella decrescente fino alla condizione iniziale.

La cyclette memorizza ogni secondo il carico della pedalata e il battito cardiaco del volontario. Quest'ultimo è stato prelevato tramite un cardiofrequenzimetro a fascia

toracica “Garmin Edge 520”. I sensori digitali ed i termistori sono stati disposti sul volontario nel seguente modo:

- Sensore SHT31 con indirizzo 0x44: zona lombare;
- Sensore SHT31 con indirizzo 0x45: fianco sinistro;
- Sensore BME280: sterno.

I termistori invece sono stati posizionati nel seguente modo:

- Termistore A2: scapola destra;
- Termistore A3: deltoide laterale destro;
- Termistore A4: gomito sinistro;
- Termistore A5: muscolo pettorale superiore sinistro.

Sono stati scelti questi punti di misura in quanto risultano maggiormente predisposti a sudorazione. La scatola contenente il microcontrollore è stata fissata all’elastico del pantaloncino sportivo tramite clip. La figura 7.1 mostra il posizionamento di tutti i sensori.

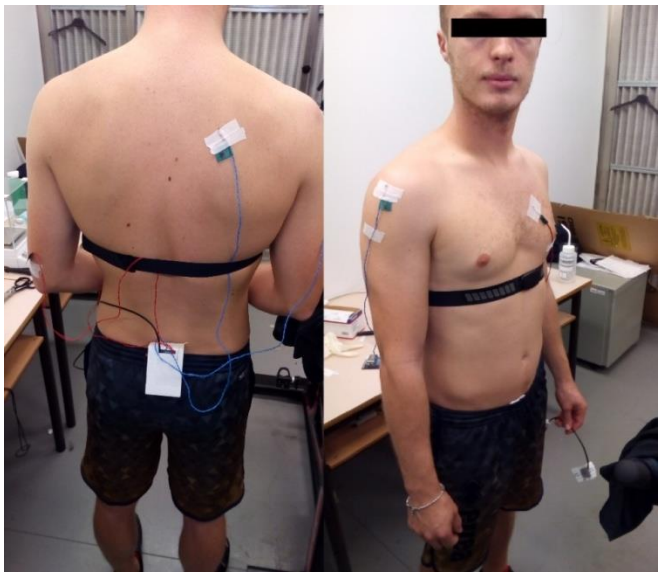


Figura 7.1 Posizionamento dei sensori sul volontario.

Posta alle spalle del volontario viene posizionata una termocamera NEC G100E che misura la radiazione infrarossa emanata dalla schiena del volontario.
L’indumento indossato dal volontario consiste in una maglia a maniche corte per uso sportivo in poliestere al 100% non aderente.
I dati prelevati vengono confrontati con i risultati ottenuti eseguendo, in contemporanea, il test di Conconi. Lo scopo di tale test consiste nel determinare la soglia anaerobica oltre la quale l’energia in risposta ad uno sforzo fisico comincia ad essere prodotta per

via principalmente anaerobica. A tal fine, ad intervalli di 5 minuti durante la prova, viene misurata la concentrazione del lattato prelevando una goccia di sangue dal polpastrello dell'indice destro. Lo strumento utilizzato per questo compito è un “Lactate Pro2”.
Il test di Conconi esprime il battito cardiaco, in bpm, in funzione del carico espresso in Watt. La relazione frequenza cardiaca – potenza è una funzione lineare a tratti. Il cambiamento della pendenza determina la soglia anaerobica. La figura 7.2 rappresenta un generico andamento.

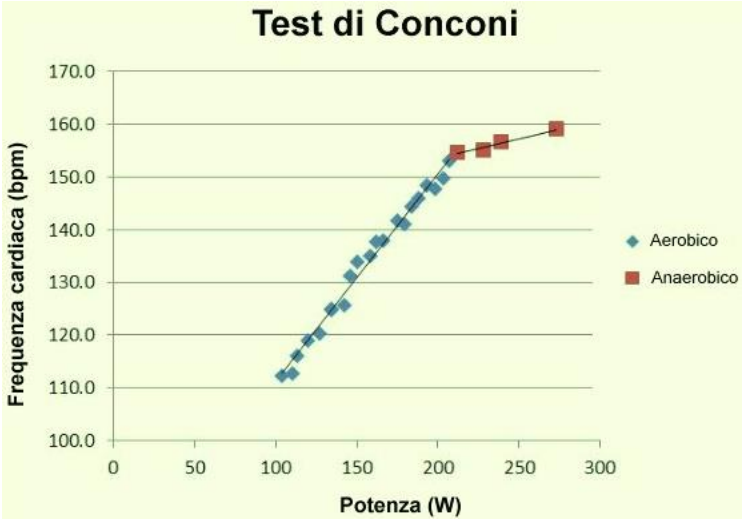


Figura 7.2 Andamento generico frequenza - potenza durante il test di Conconi. Il cambiamento della pendenza identifica la soglia anaerobica (quadrati rossi) [7.1].

Le figure dalla 7.3 sino alla 7.12 rappresentano gli andamenti di temperatura e umidità registrati durante l’esecuzione della prova. Per ciascuna immagine sono state individuate le varie fasi di esecuzione del test. Tutte le immagini mostrano un aumento graduale della temperatura e dell’umidità con l’avanzare del tempo (e quindi dello sforzo). Per quanto riguarda l’andamento dell’umidità nella zona lombare (figura 7.4) questo risulta attendibile per i primi 1000 secondi in quanto, a partire da questo istante di tempo in poi, resta costantemente in saturazione al 100% di umidità a causa di un contatto diretto con il sudore. È inoltre importante sottolineare che i termistori forniscono una lettura di temperatura molto più attendibile rispetto a quella dei sensori digitali. Questi ultimi, infatti, sono contenuti in un involucro di PLA che ostacola la conduzione del calore corporeo verso l’elemento sensibile. I termistori, al contrario, sono posti a diretto contatto con la pelle e fissati con un cerotto di materiale plastico. Per tutti i sensori, eccetto il termistore sul gomito ed il sensore digitale sullo sterno, si registrano temperature della pelle prossime o superiori ai 32°C dopo 20 minuti dall’inizio del test e con un carico pari a 130 W. Considerazioni analoghe possono esser effettuate circa l’umidità che si attesta su valori superiori al 95% di umidità relativa.

Per quanto riguarda il termistore sul gomito ed il sensore sullo sterno si leggono valori inferioridi temperatura e umidità relativa. Questo è dovuto al fatto che il termistore è esposto all'aria (non ci sono indumenti che lo ricoprono) rendendo così efficace lo smaltimento di calore per via convettiva. Il sensore digitale, invece, risente di un'intercapedine tra la pelle e l'indumento superiore rispetto a quelle nelle altre parti del corpo. Ciò causa un maggior ristagno di aria che si riscalda in tempi maggiori della durata del test. Per i sensori digitali gli andamenti dell'umidità relativa presentano dei picchi di minimo dovuti ad una non perfetta aderenza della maglia sulla pelle. In questo modo si crea un'intercapedine che favorisce un ricircolo di aria con diminuzione dell'umidità relativa. Nei grafici gli asterischi rossi identificano gli istanti di tempo in cui il volontario ha aumentato il carico della pedivella.

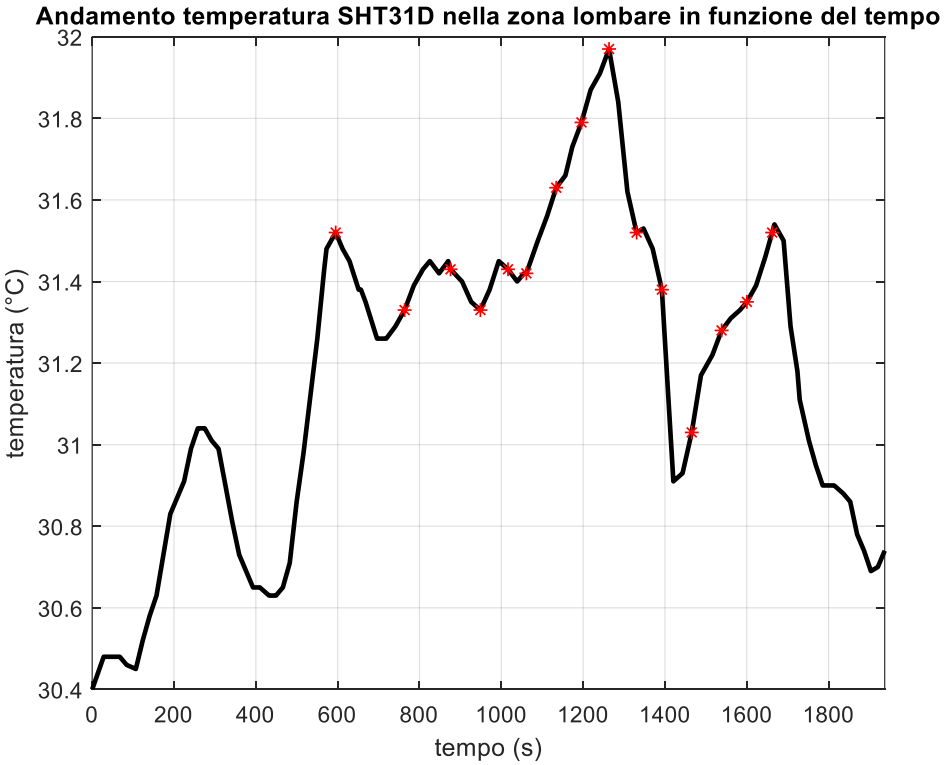


Figura 7.3 Andamento della temperatura nella zona lombare in funzione del tempo

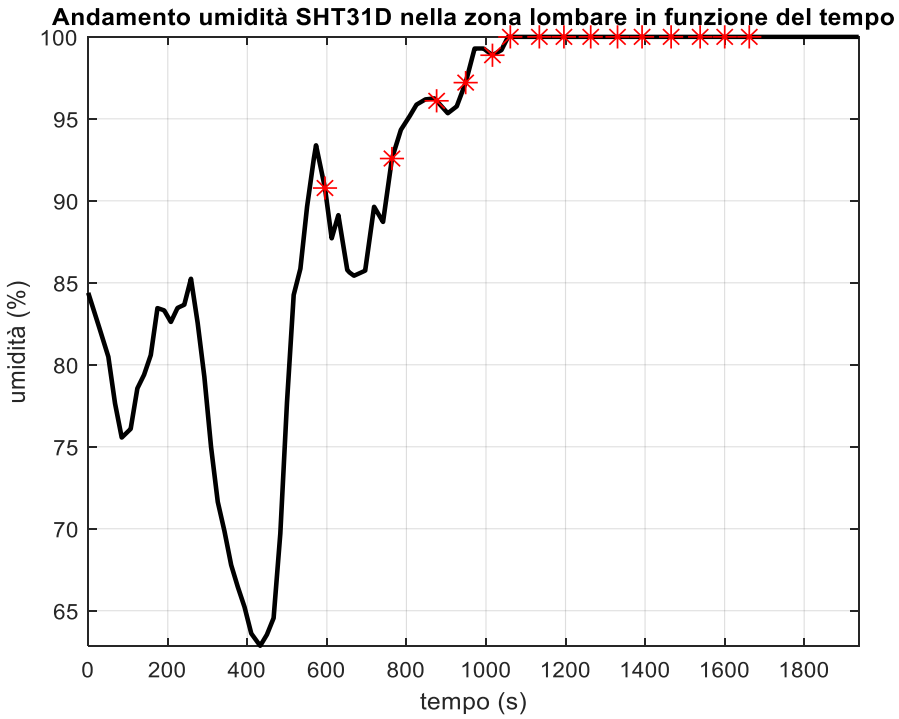


Figura 7.4 Andamento dell'umidità nella zona lombare in funzione del tempo

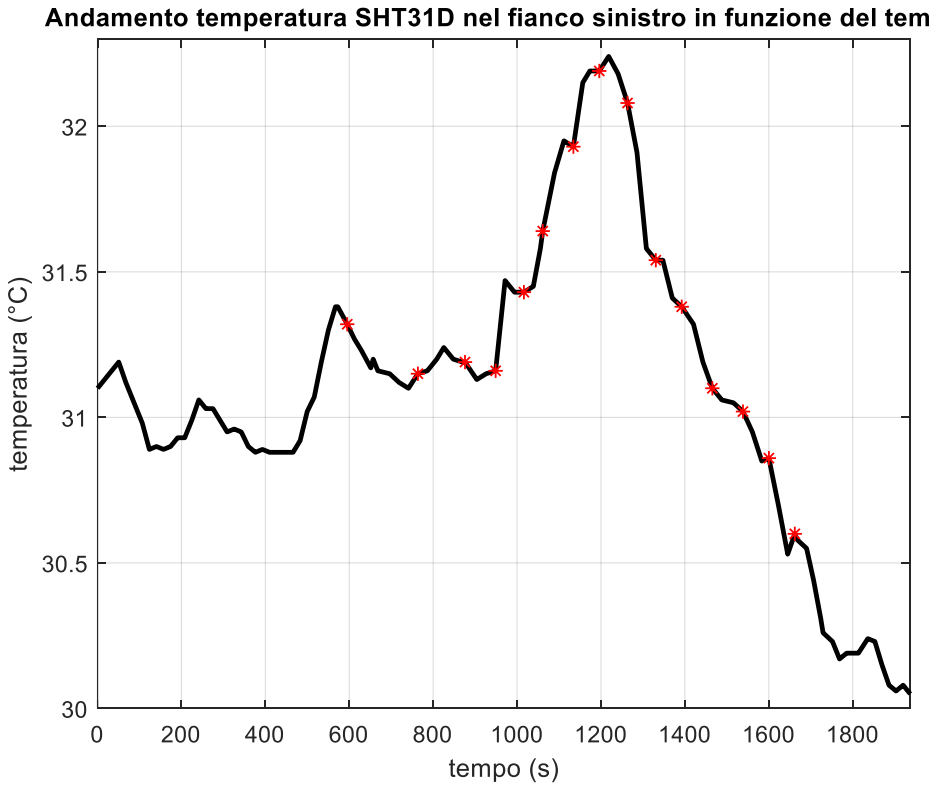


Figura 7.5 Andamento della temperatura sul fianco sinistro in funzione del tempo

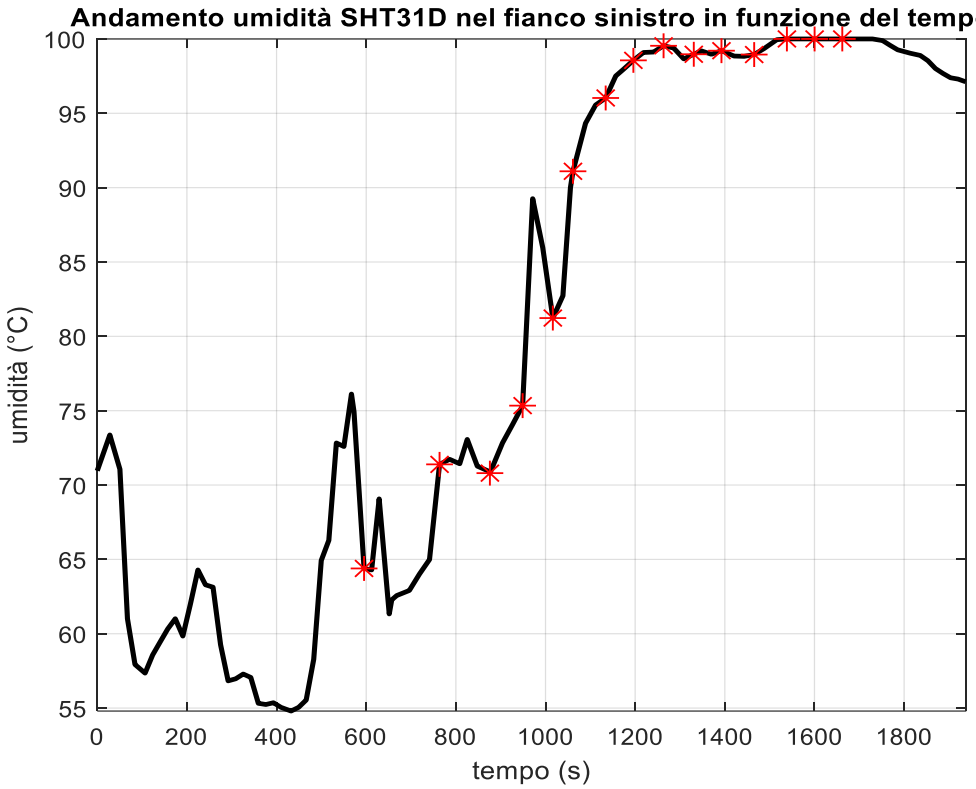


Figura 7.6 Andamento dell'umidità sul fianco sinistro in funzione del tempo

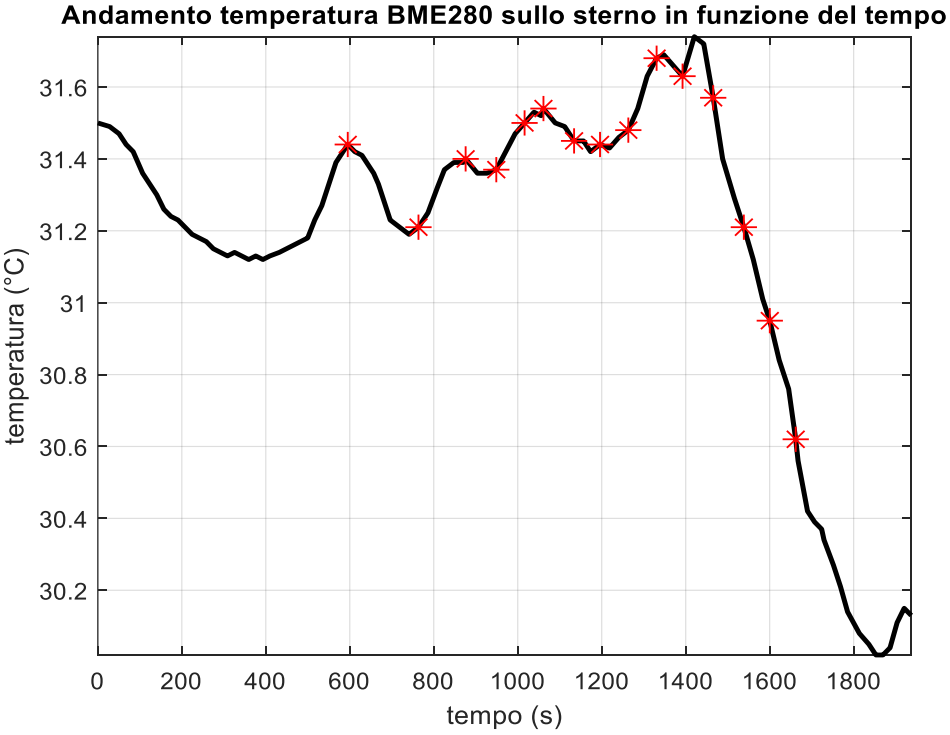


Figura 7.7 Andamento della temperatura sullo sterno in funzione del tempo

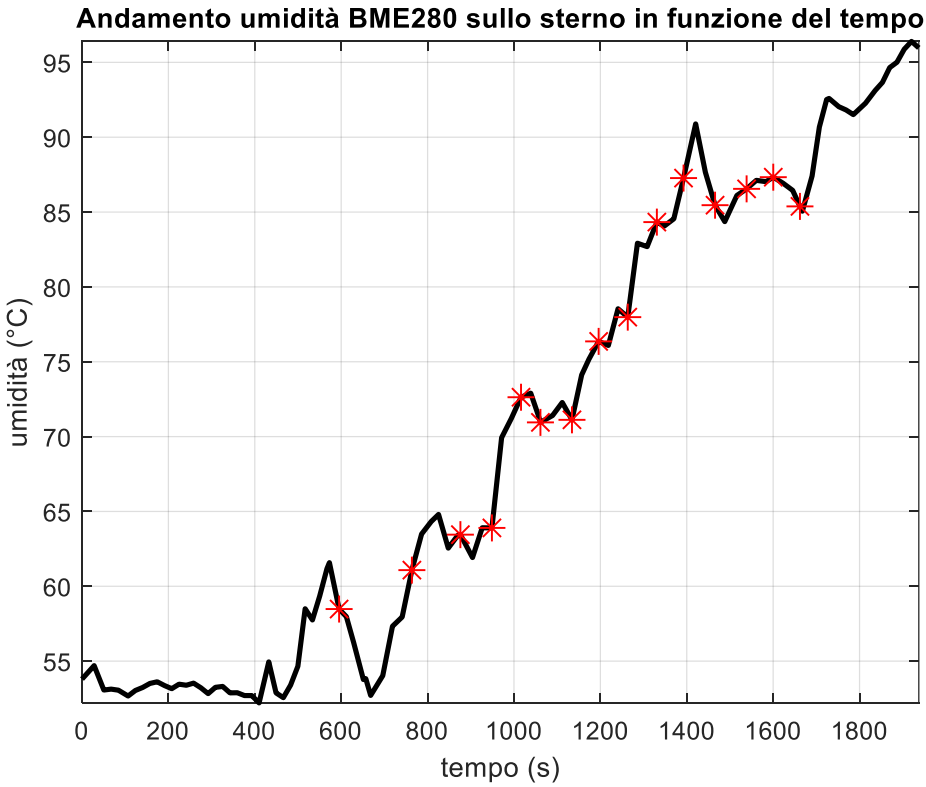


Figura 7.8 Andamento dell'umidità sullo sterno in funzione del tempo

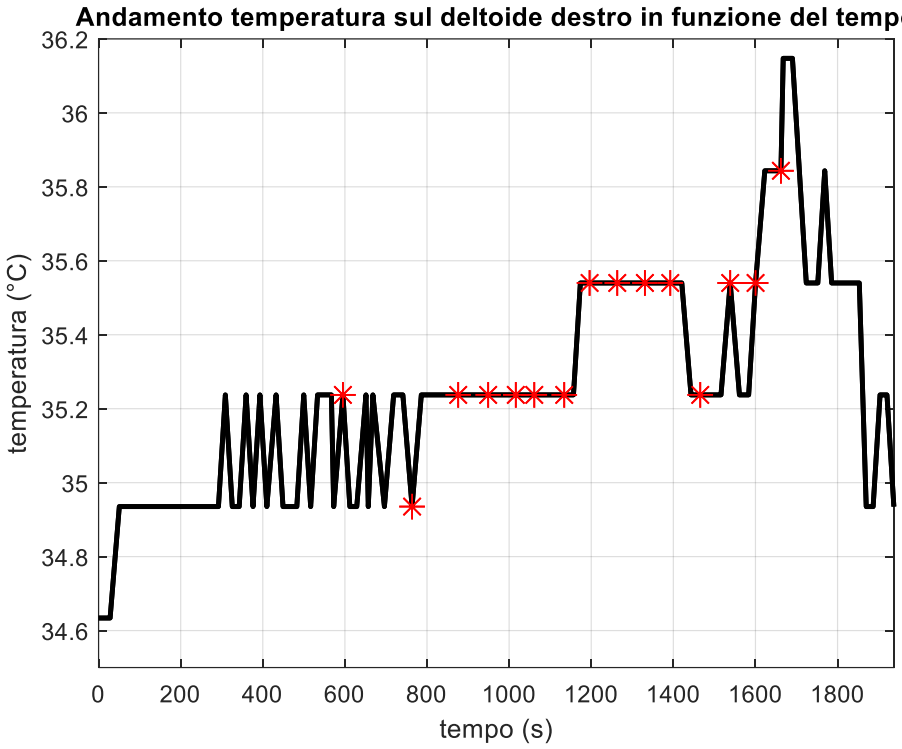


Figura 7.9 Andamento della temperatura sul deltoide destro in funzione del tempo

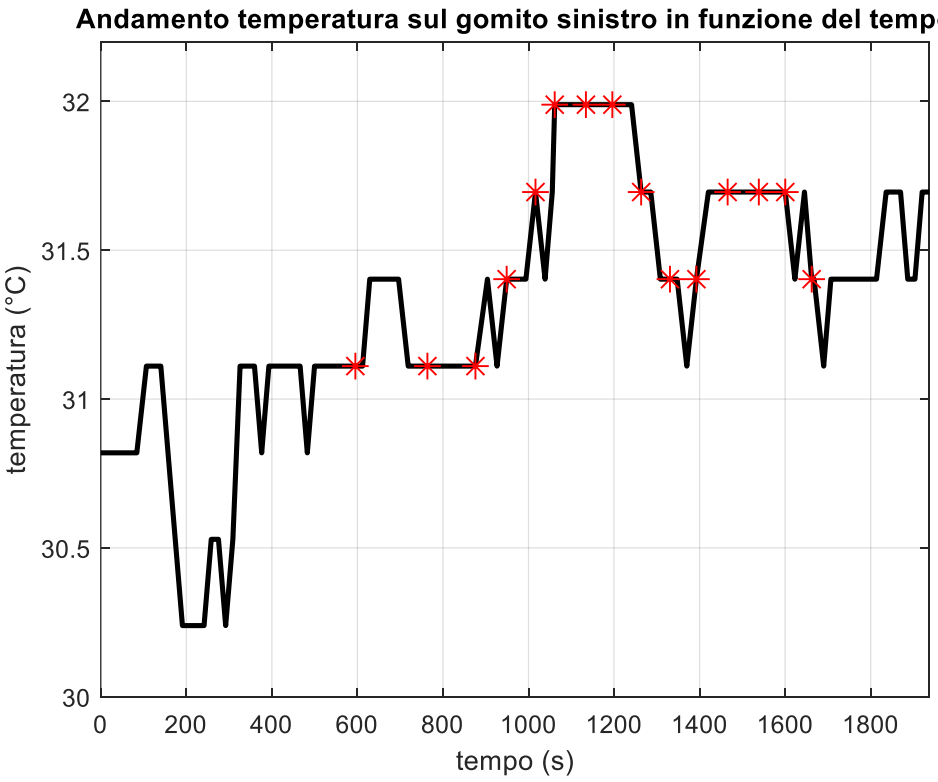


Figura 7.10 Andamento della temperatura sul gomito sinistro in funzione del tempo

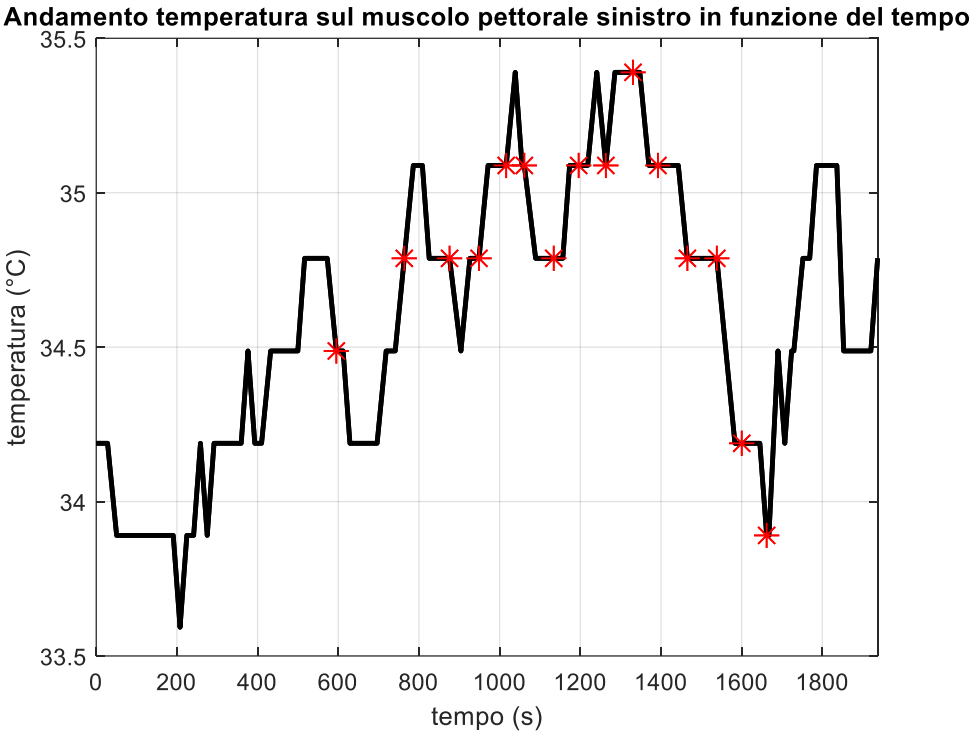


Figura 7.11 Andamento della temperatura sul muscolo pettorale sinistro in funzione del tempo

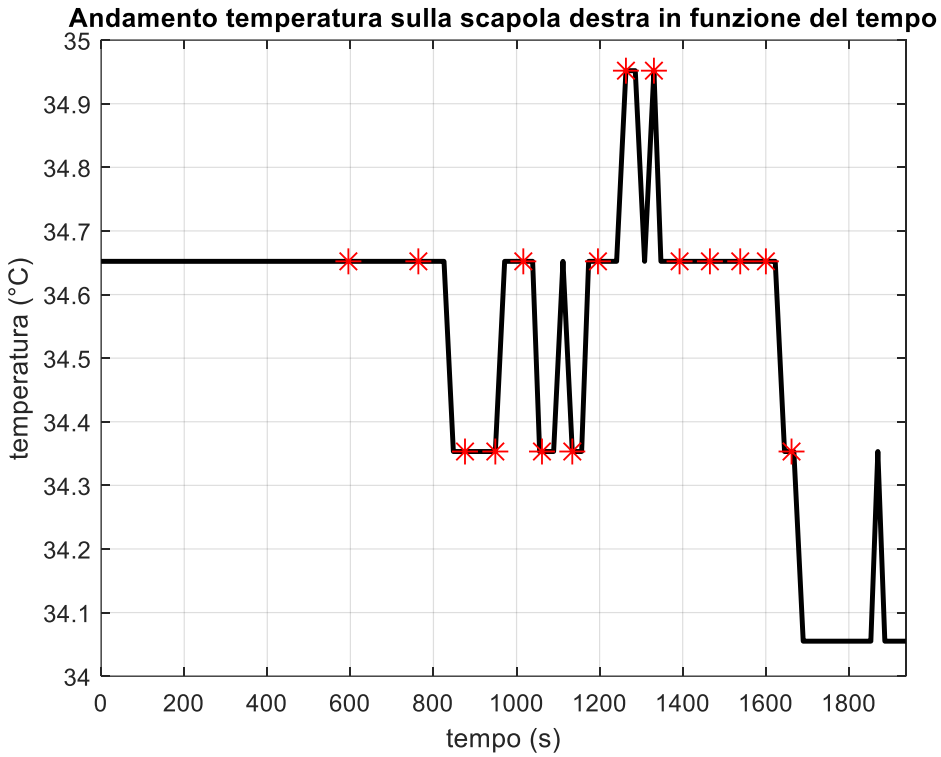


Figura 7.12 Andamento della temperatura sulla scapola destra in funzione del tempo

I risultati ottenuti vengono confrontati con quelli del test di Conconi riportato in figura 7.13. Osservando la caratterizzazione potenza – frequenza cardiaca (linea blu) si può notare la presenza del punto di flesso per carico pari a 155 W e frequenza cardiaca pari a 156 bpm. Da questo punto in poi si ha un accumulo di acido lattico, tra le fibre muscolari, responsabili dell'affaticamento muscolare. Quest'ultimo ha causato il termine della prova dopo 31 minuti. Si osservi anche l'andamento del lattato (in rosso) che parte da un valore post riscaldamento di 3.8 mM (valore basale 3.2 mM) raggiungendo valori pari a 9 mM con carico di 140 W (l'atleta ha un carico circa 4 volte superiore a quello iniziale) per arrivare a 16 mM nella condizione di massimo carico.

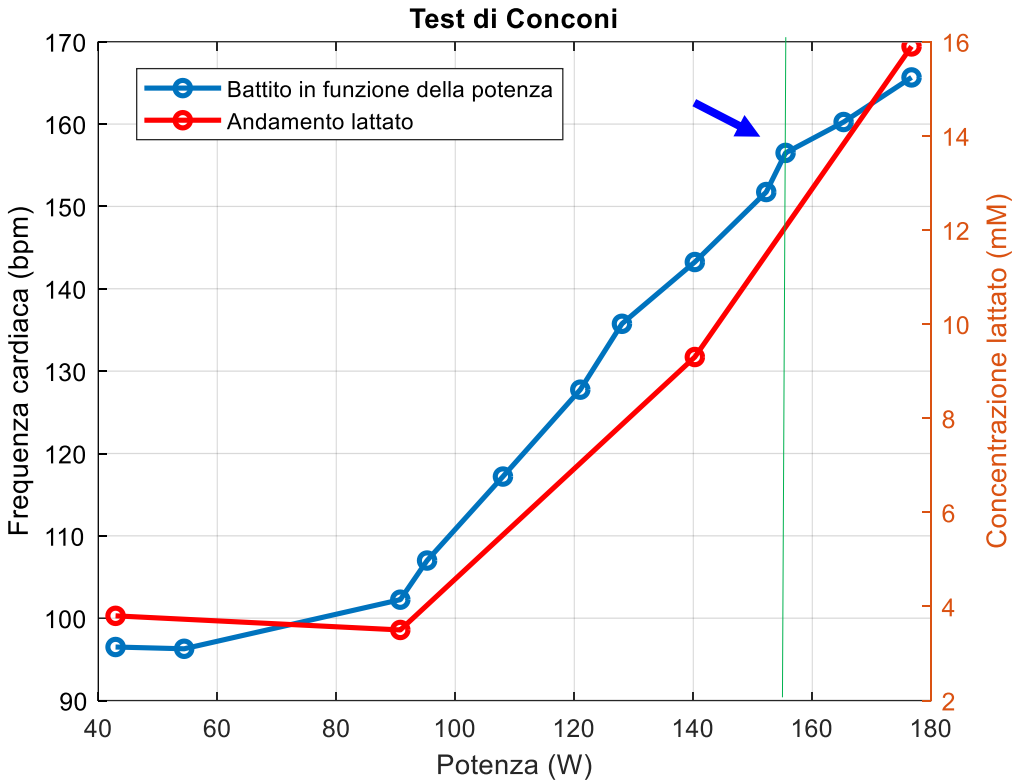


Figura 7.13 Test di Conconi. La linea rossa identifica la concentrazione del lattato nel sangue in funzione dello sforzo fisico. La freccia blu identifica la soglia anaerobica.

Sinora è emerso che all'aumentare dello sforzo fisico si registra una tendenza all'aumento di temperatura e umidità. In particolare tali variazioni diventano apprezzabili dopo 20 minuti di esercizio con un carico di 140 W. Il test di Conconi ha mostrato che la soglia anaerobica del volontario si registra per carico pari a 155 W e frequenza cardiaca di 156 bpm. In queste condizioni la concentrazione del lattato è pari a 12 mM.

Si è scelto, successivamente, di confrontare i valori di temperatura e umidità misurati dai sensori in funzione sia del carico che della frequenza cardiaca rappresentatndo i valori contemporanei alla misura della concentrazione del lattato. I risultati sono raccolti dalla figura 7.14 alla 7.27.

Per quanto riguarda le temperature si può osservare che queste non raggiungono il valore massimo in corrispondenza del massimo carico (177W) contrariamente a quanto intuitivamente si potrebbe pensare. In tutti i punti di prelievo il massimo di temperatura, compreso attorno ai 31.5°C – 32°C nella zona lombare, sul fianco sinistro, sullo sterno e sul gomito sinistro, e attorno ai 35°C per la scapola destra, il deltoide destro e per il muscolo pettorale sinistro, viene registrato per un carico pari a 140 W e una frequenza cardiaca di 143 bpm.

Il motivo per cui il massimo di temperatura non corrisponde al massimo del carico è dovuto ad un aumento costante dell'umidità. Quest'ultima registra il valore massimo,

superiore all'85% in tutti i punti di prelievo, in corrispondenza della condizione di massimo sforzo in termini sia di carico che di frequenza cardiaca (166 bpm). L'umidità della pelle determina un accumulo di sudore che raffredda il sensore. Bisogna anche considerare che per sforzi intensi, si osserva una vaso dilatazione dei capillari superficiali allo scopo di favorire il raffreddamento del corpo.

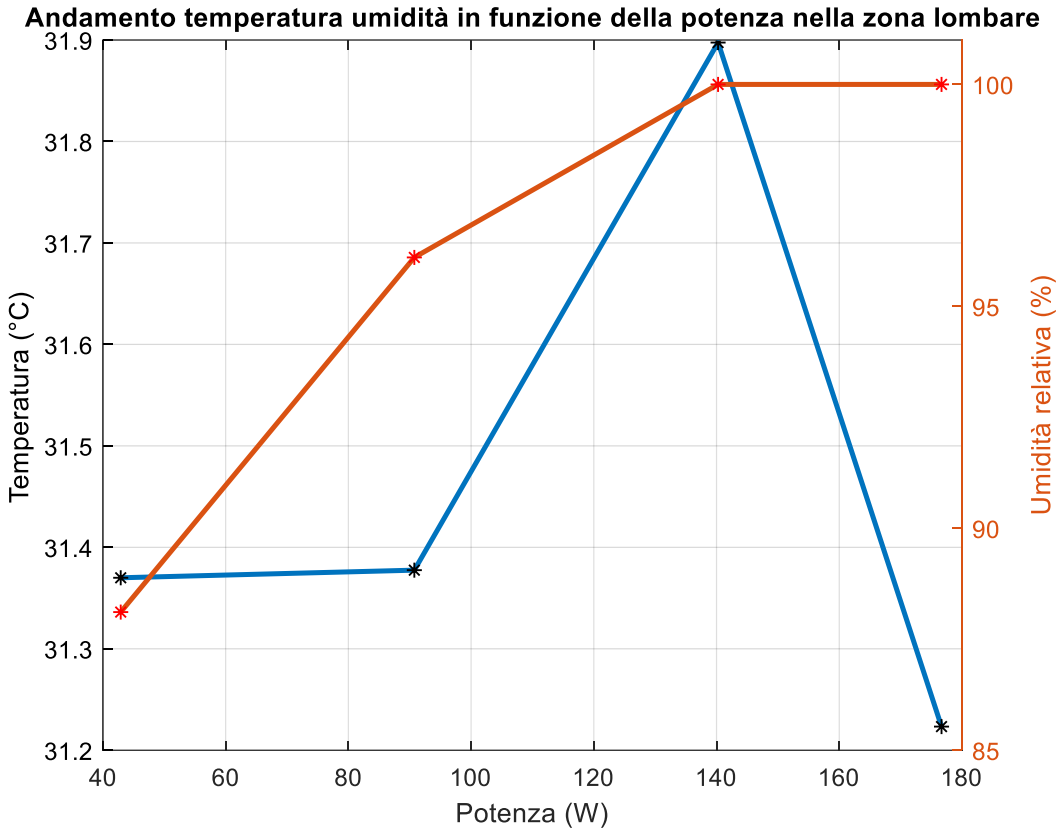


Figura 7.14 Andamento della temperatura (blu) e dell'umidità (rosso) in funzione del carico nella zona lombare

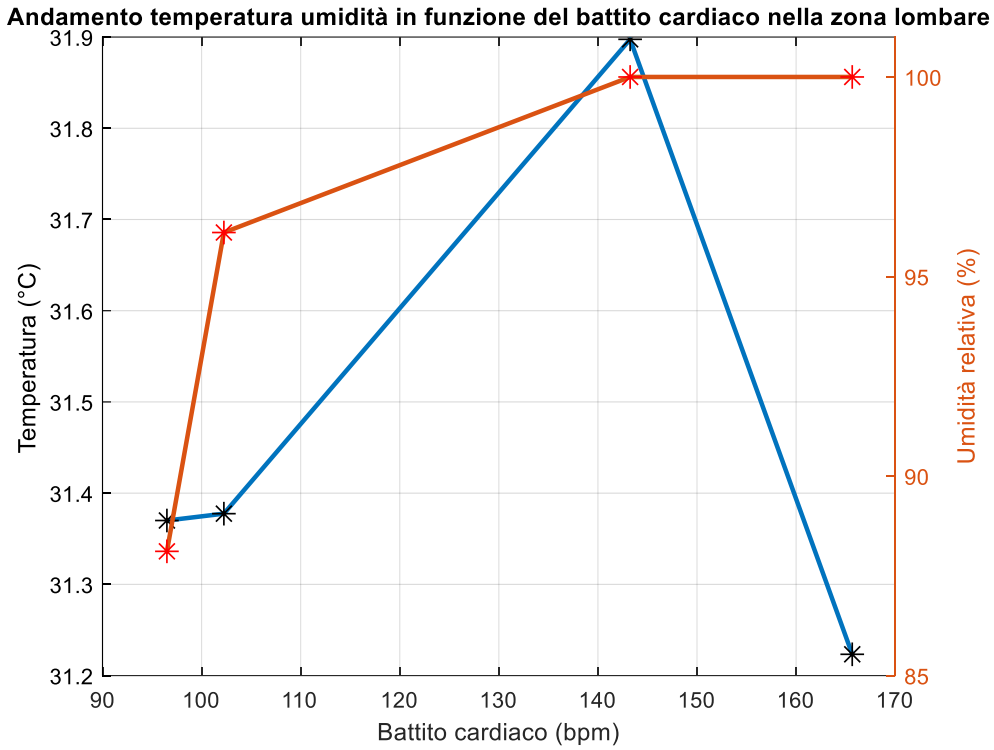


Figura 7.15 Andamento della temperatura (blu) e dell'umidità (rosso) in funzione della frequenza cardiaca nella zona lombare

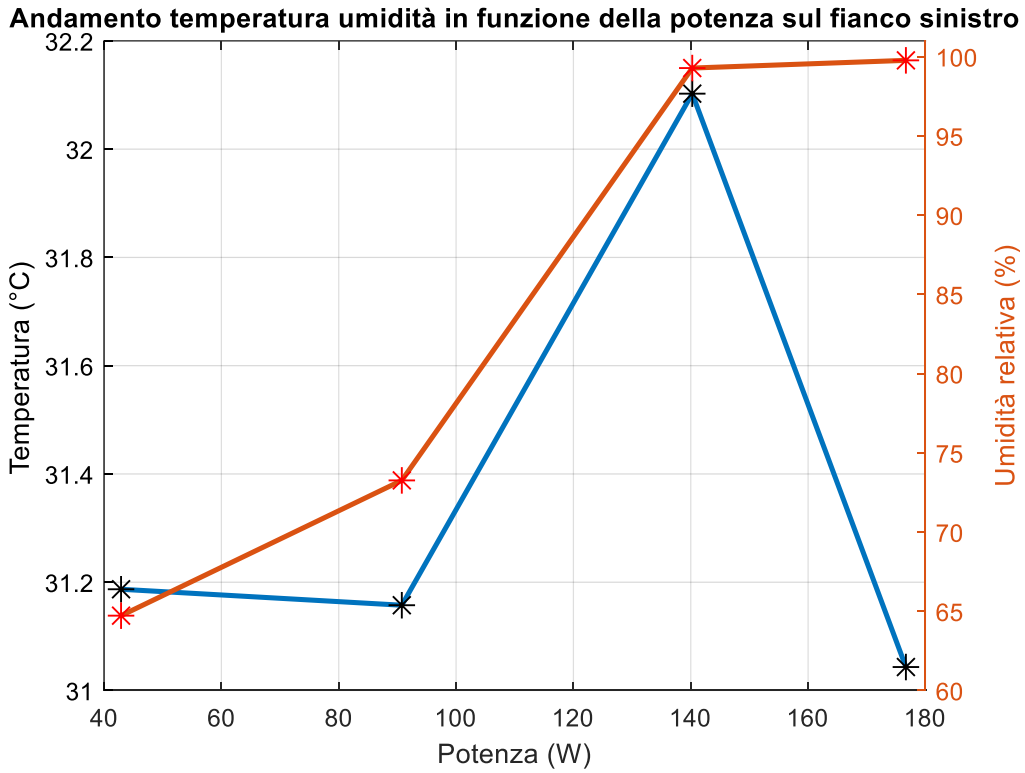


Figura 7.16 Andamento della temperatura (blu) e dell'umidità (rosso) in funzione del carico sul fianco sinistro

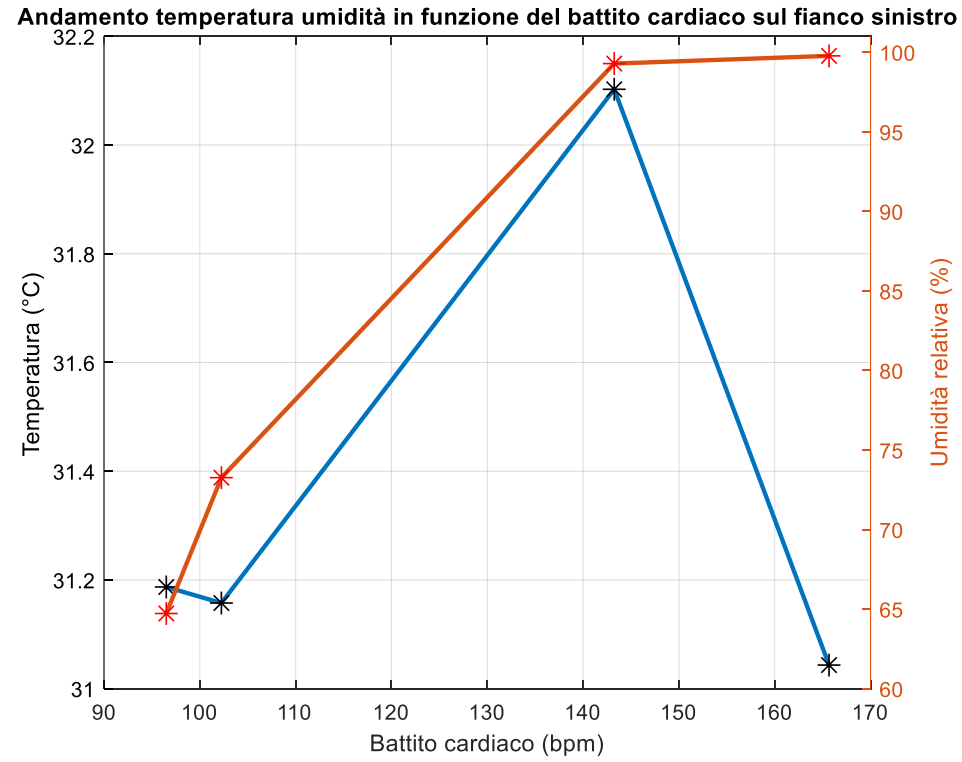


Figura 7.17 Andamento della temperatura (blu) e dell'umidità (rosso) in funzione della frequenza cardiaca sul fianco sinistro

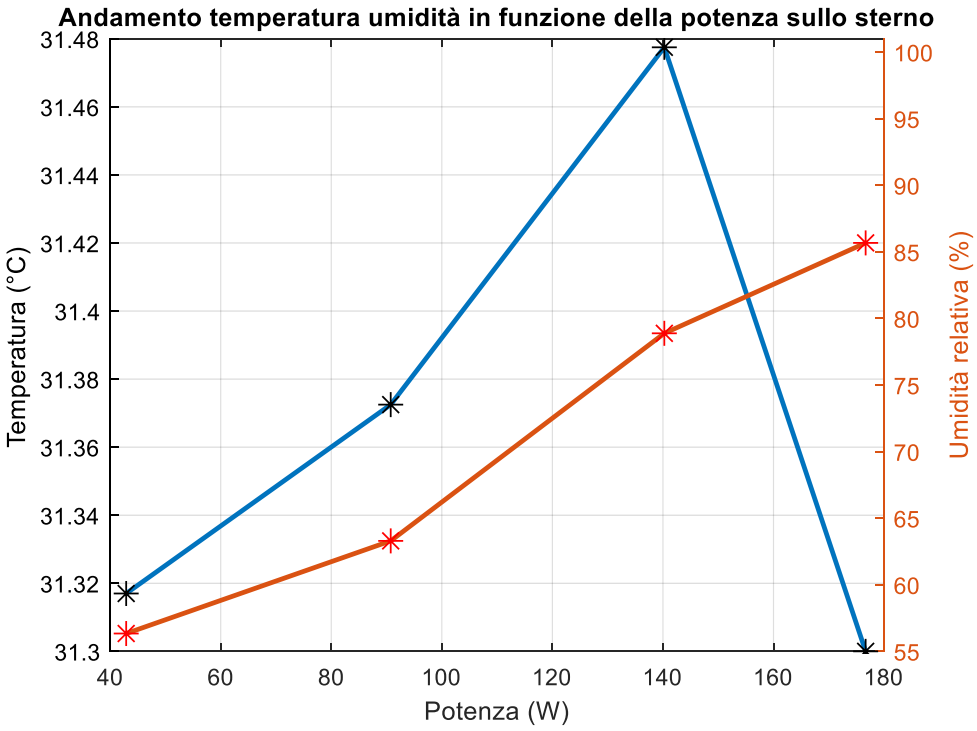


Figura 7.18 Andamento della temperatura (blu) e dell'umidità (rosso) in funzione del carico sullo sterno

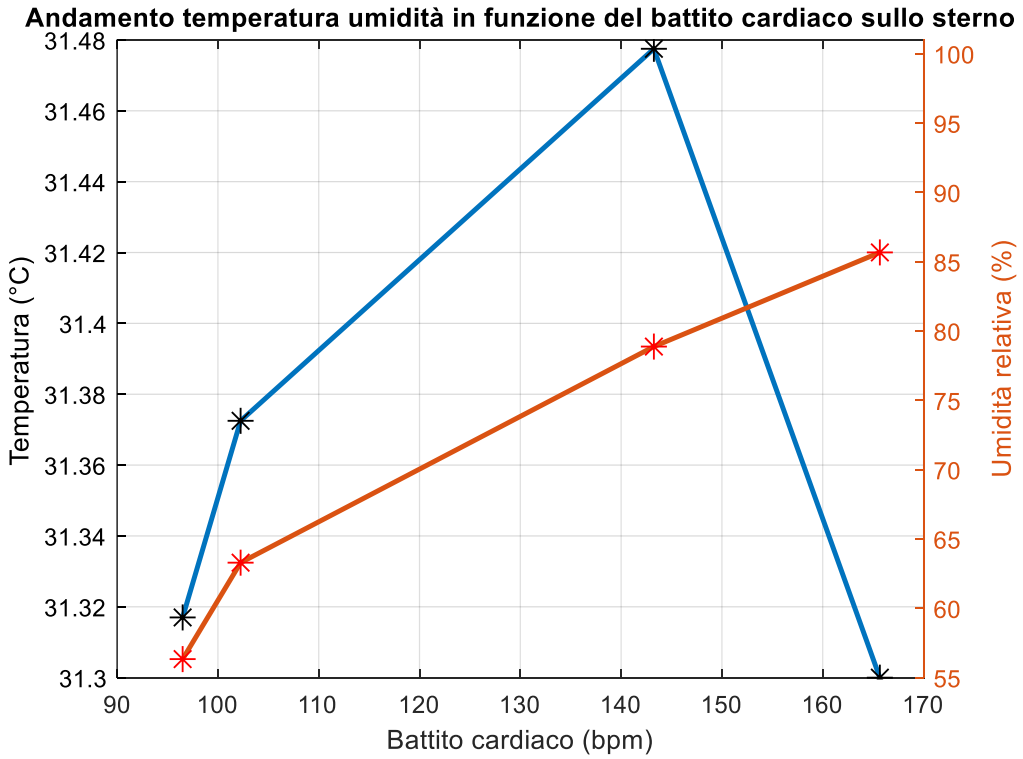


Figura 7.19 Andamento della temperatura (blu) e dell'umidità (rosso) in funzione della frequenza cardiaca sullo sterno

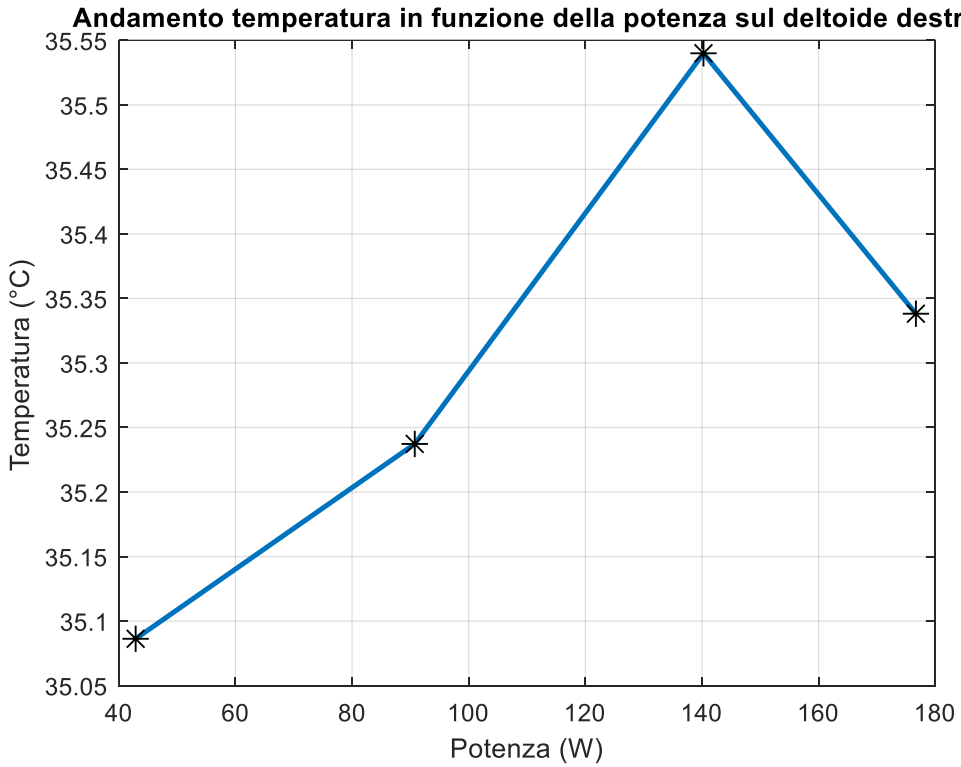


Figura 7.20 Andamento della temperatura in funzione del carico sul deltoide destro

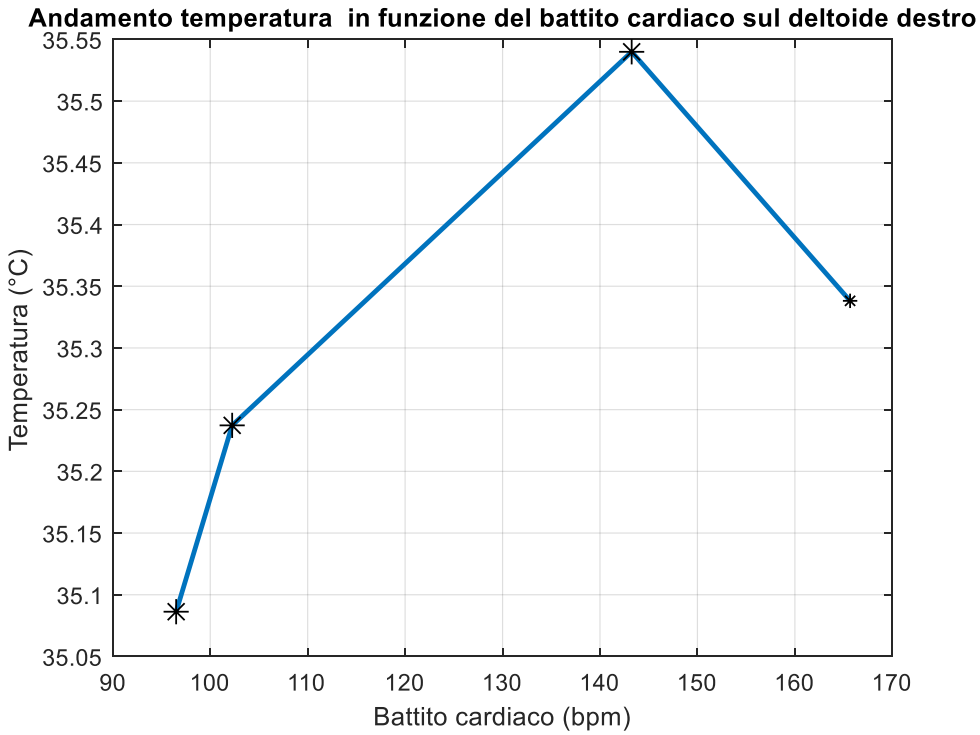


Figura 7.21 Andamento della temperatura in funzione della frequenza cardiaca sul deltoide destro

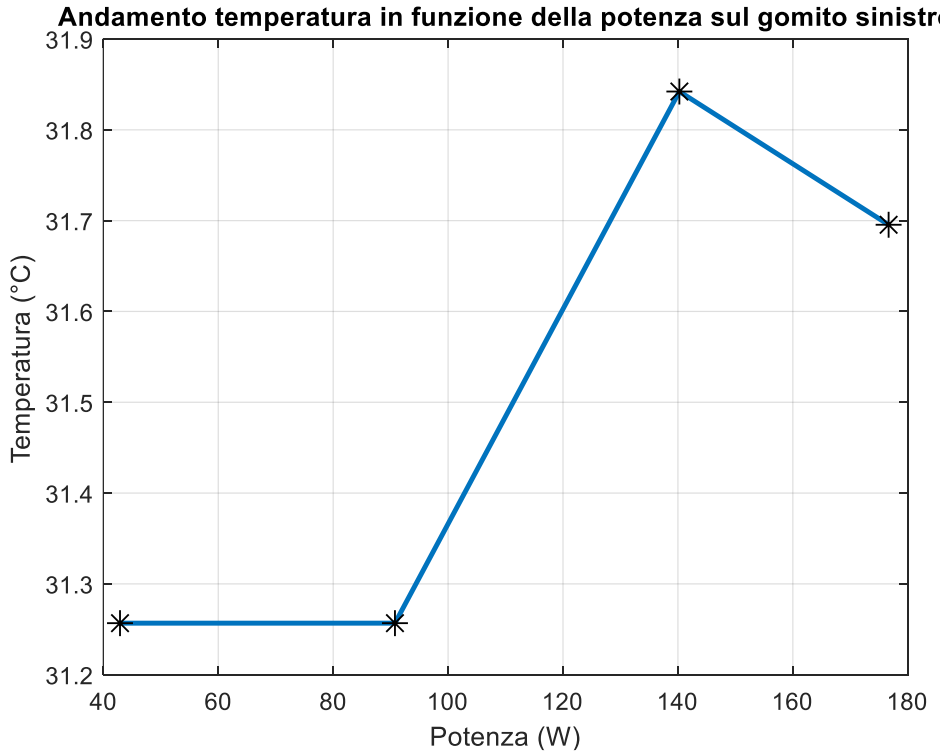


Figura 7.22 Andamento della temperatura in funzione del carico sul gomito sinistro

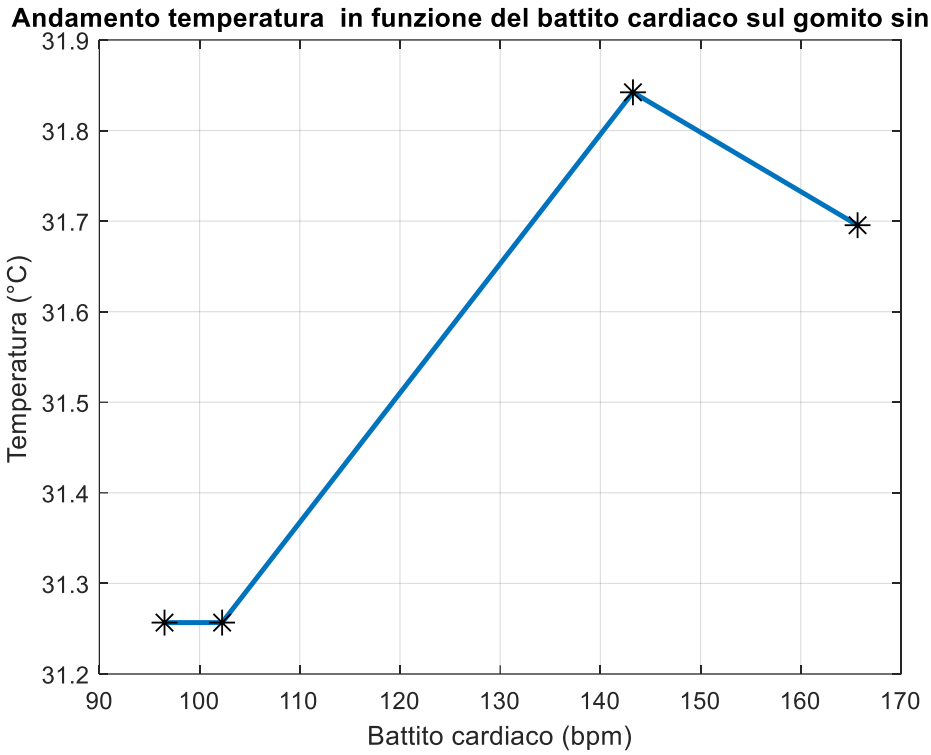


Figura 7.23 Andamento della temperatura in funzione della frequenza cardiaca sul gomito sinistro

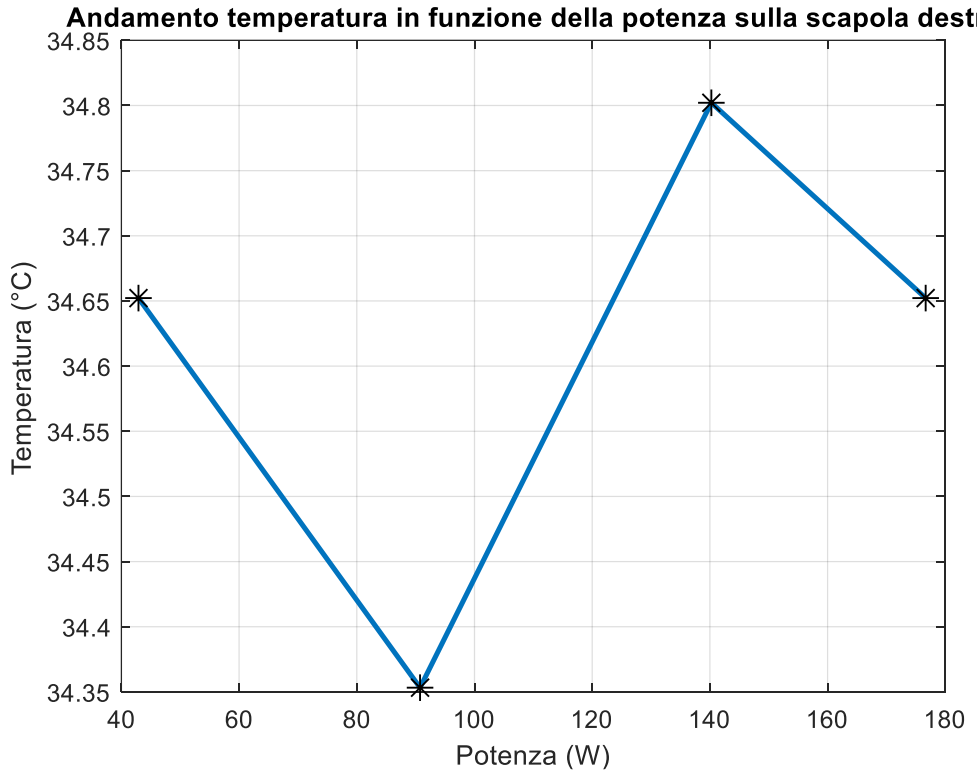


Figura 7.24 Andamento della temperatura in funzione del carico sulla scapola destra

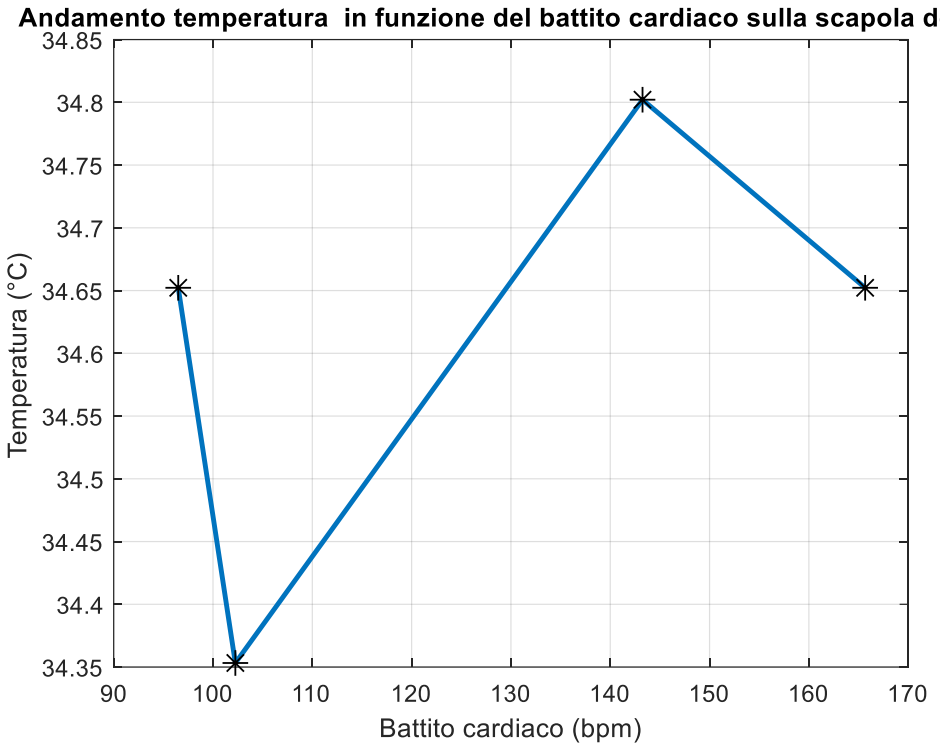


Figura 7.25 Andamento della temperatura in funzione della frequenza cardiaca sulla scapola destra

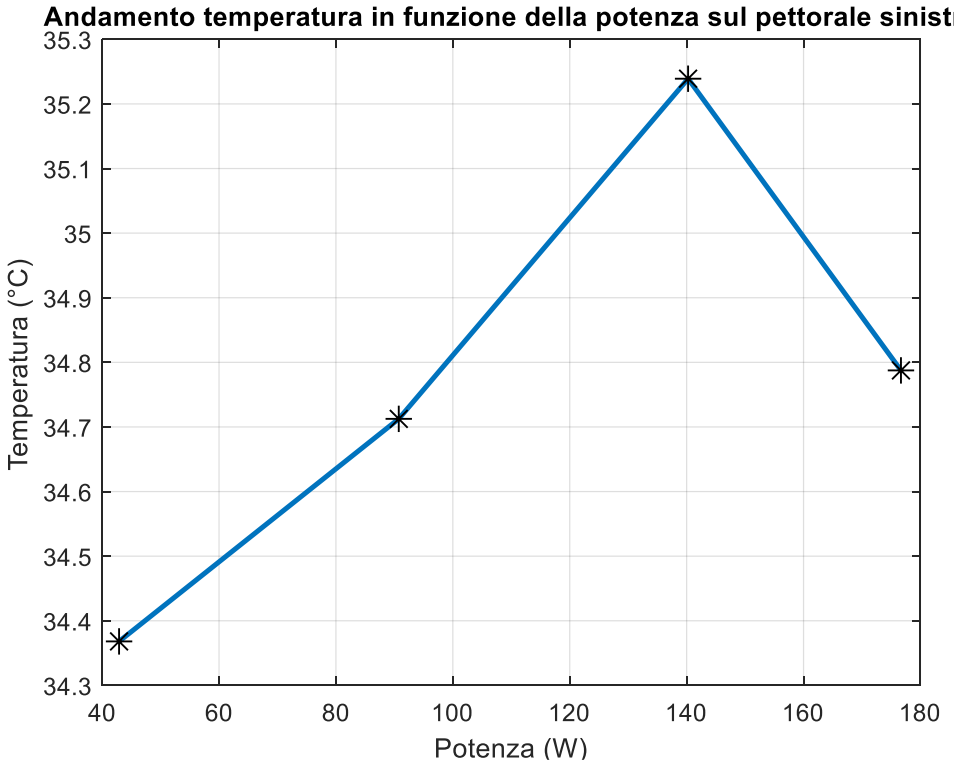


Figura 7.26 Andamento della temperatura in funzione del carico sul pettorale sinistro

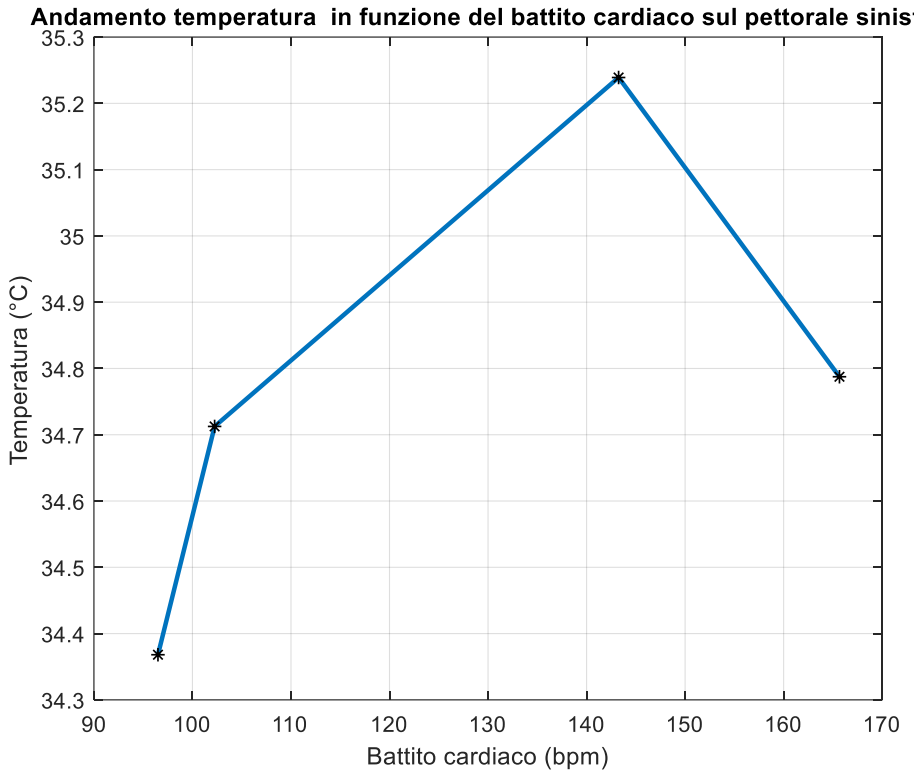


Figura 7.27 Andamento della temperatura in funzione della frequenza cardiaca sul pettorale sinistro

Nella figura 7.28 vengono proposte le immagini nell'infrarosso della schiena del volontario durante l'esercizio fisico. La termocamera registra solo le temperature negli istanti di tempo che seguono il riscaldamento. Si osservi che le temperature rilevate dalla termocamera sono inferiori a quelle misurate dai sensori sotto la maglia. Ciò è dovuto a principalmente alla presenza di sudore. In base a quanto asserito in precedenza la presenza di sudore favorisce l'abbassamento della temperatura della pelle. Si può osservare, infatti, che nella zona lombare la termocamera rileva circa 22°C dopo 21 minuti. In realtà la temperatura effettiva, nello stesso istante di tempo, è prossima ai 31°C.

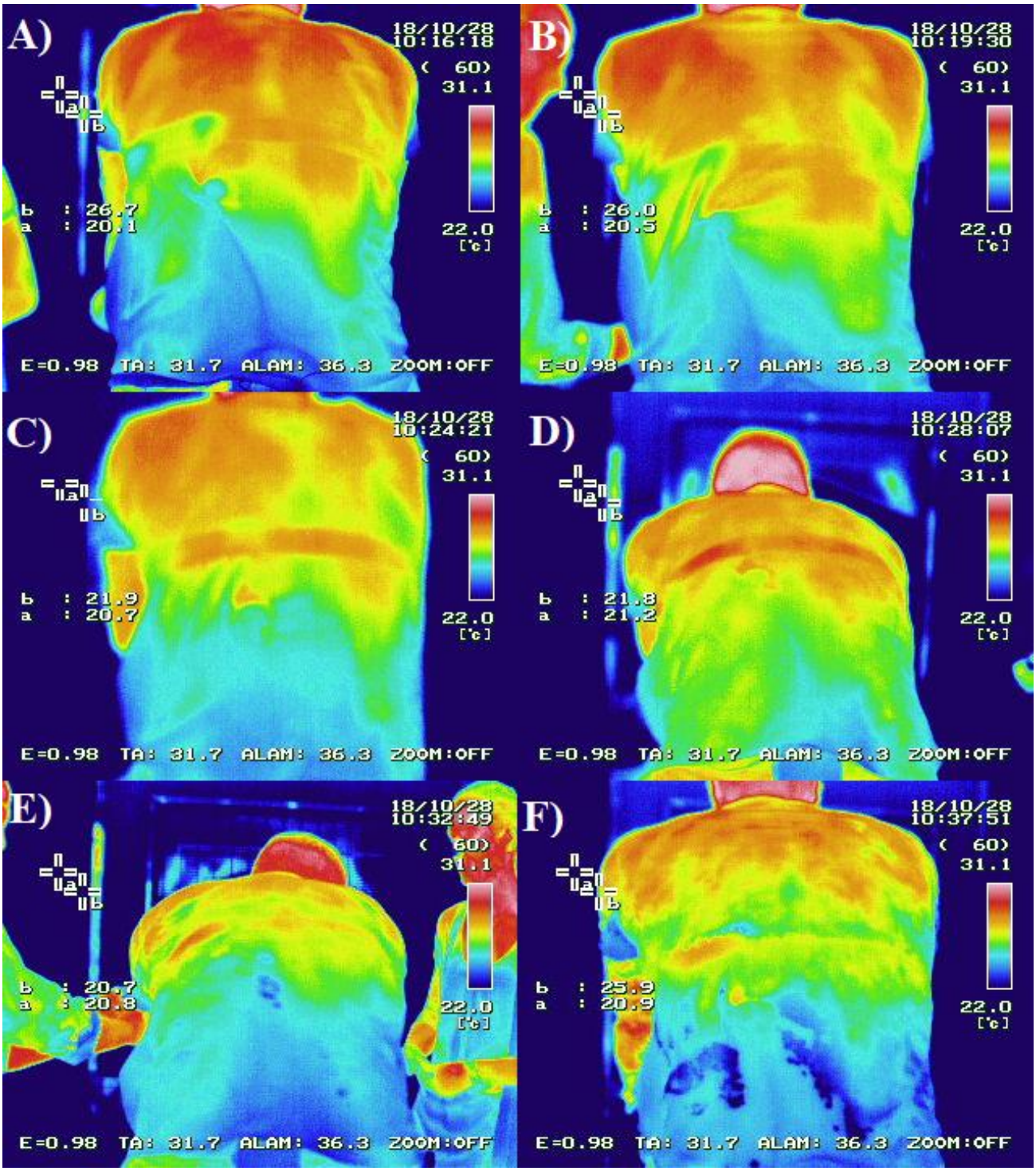


Figura 7.28 Immagini nell'infrarosso del volontario durante il test. A) dopo il riscaldamento, B) dopo 3 minuti, C) dopo 8 minuti, D) dopo 12 minuti, E) dopo 16 minuti, F) dopo 21 minuti.

I sensori posti sulla schiena del volontario sono il termistore sulla scapola destra e il sensore digitale SHT31 nella zona lombare. La figura 7.29 mostra la differenza tra i valori di temperatura misurati dal termistore e quelli misurati dalla termocamera. A causa della maglia sudata si può osservare una differenza di temperatura compresa tra gli 8°C ed i 9°C.

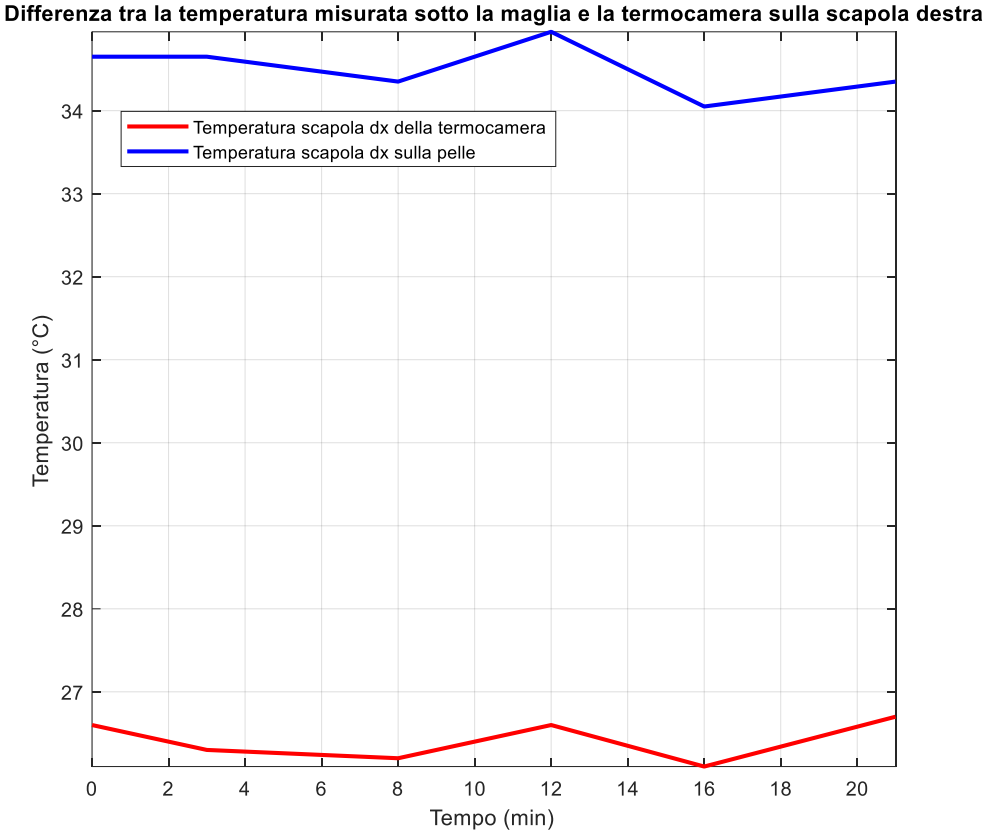


Figura 7.29 Differenza tra la temperatura misurata dal termistore e quella misurata dalla termocamera sulla scapola destra.

La figura 7.30 mostra la differenza tra i valori di temperatura misurati dal sensore digitale e quelli misurati dalla termocamera. In questo caso la differenza di temperatura compresa è tra gli 9°C ed i 10°C. Potendo disporre, in questo caso di una misura di umidità, la figura mostra anche l'andamento dell'umidità relativa. Si può osservare che a partire dal minuto 12 (ossia 22 minuti complessivi dall'inizio della prova) il sensore di umidità è già saturato al 100% da circa 4 minuti a causa dell'eccessivo sudore. Ciò causa un abbassamento della temperatura della pelle. Di conseguenza anche la termocamera misurerà una temperatura inferiore.

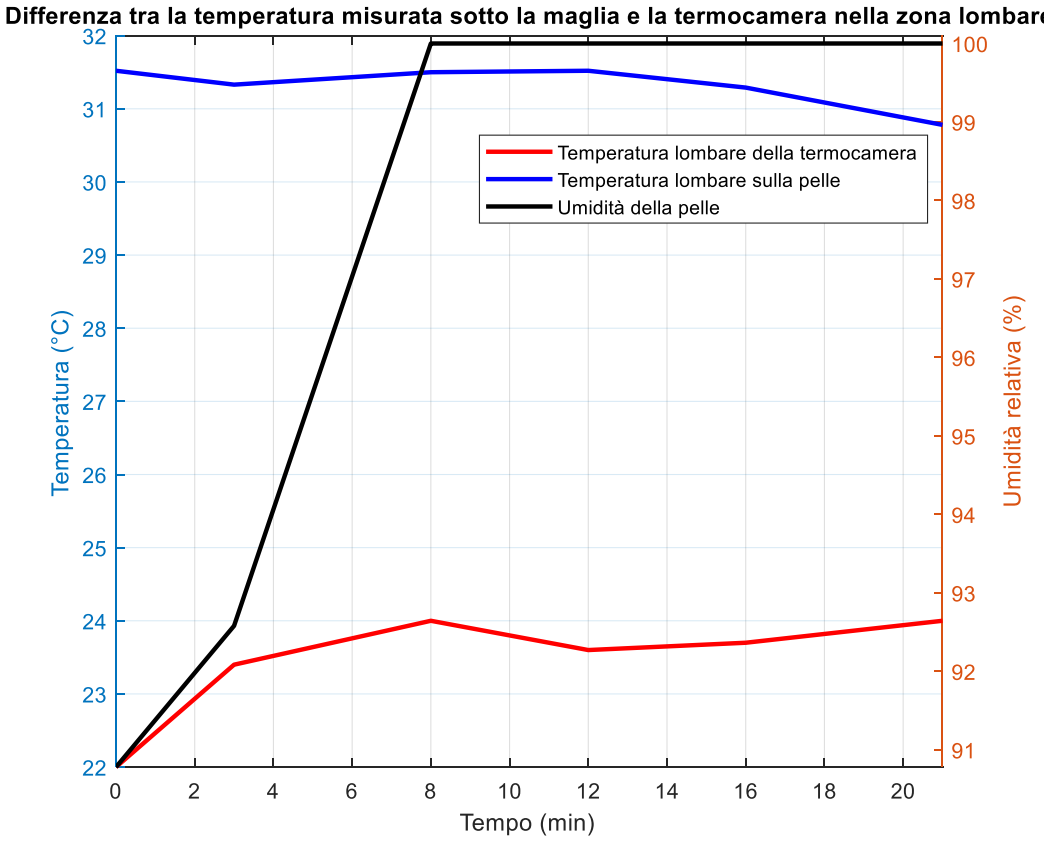


Figura 7.30 Differenza tra la temperatura misurata dal sensore digitale e quella misurata dalla termocamera nella zona lombare. Si riporta anche l'andamento dell'umidità relativa (in nero).

7.2 Prova 2: Confronto con dispositivi commerciali.

La seconda tipologia di prova ha lo scopo di confrontare, su un volontario, il dispositivo realizzato con dei sistemi analoghi presenti in commercio. Il volontario è un individuo di sesso maschile di 25 anni non praticante attività sportiva che indossa una maglia a maniche corte in cotone non aderente. Il protocollo del test prevede 5 minuti di riscaldamento a passo svelto, una corsa ad andatura costante per 16 minuti e 5 minuti di defaticamento riducendo l'andatura progressivamente. Il dispositivo è stato confrontato con un MSR147 nella versione resistente all'acqua (§ paragrafo 3.5) e con cinque iButton DS1923. L'MSR147 è equipaggiato con cinque sensori di temperatura ed umidità relativa esterni e cablati. Si è cercato di assicurare che in ogni punto di prelievo vi fosse un sensore di ciascuno dei tre dispositivi. La figura 7.31 schematizza le zone di posizionamento dei sensori discriminando quelli del dispositivo da quelli dell'MSR147 e dagli iButton DS1923.

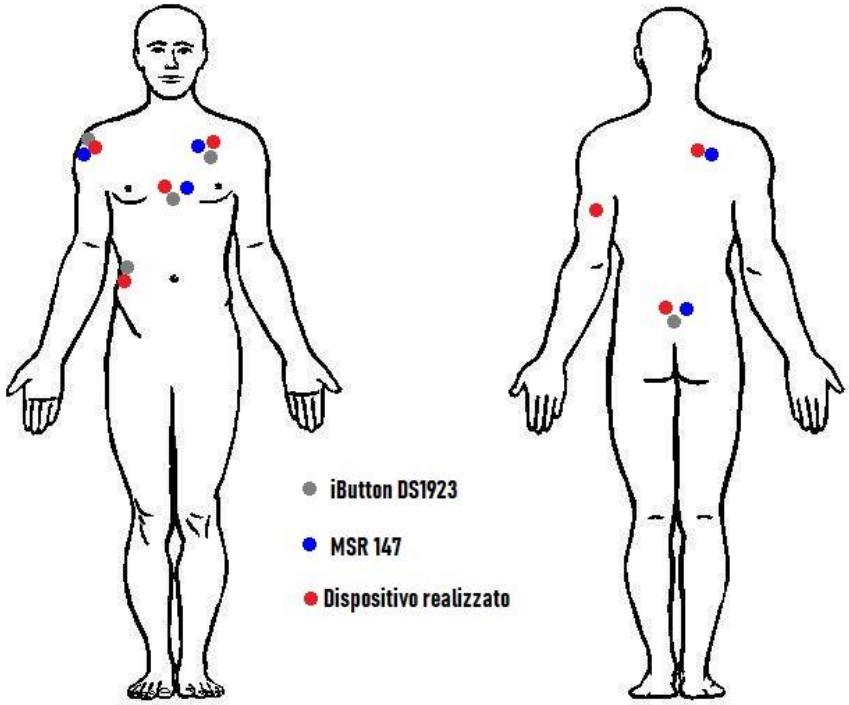


Figura 7.31 Zone di posizionamento dei sensori sul volontario [7.2].

Le figure dalla 7.32 alla 7.40 riportano gli anadamenti di temperatura (dalla 7.32 alla 7.37) ed umidità (dalla 7.38 alla 7.40) solo nei punti in cui la misura di un sensore del dispositivo è confrontabile con quella di almeno un sensore di un dispositivo commerciale (ossia sul deltoide destro, sullo sterno, sul pettorale sinistro, sul fianco destro, sulla scapola destra e nella zona lombare).

Si noti che l'andamento della temperatura sulla scapola destra, riportato in figura 7.35, presenta dei valori attorno ai 20°C per l'MSR147 sebbene quelli ottenuti con il dispositivo negli stessi istanti di tempo siano superiori ai 32°C (misurata con un termistore). Ciò è dovuto al fatto che il sensore dell'MSR147, a seguito del movimento della maglia, si è staccato dalla cute rimanendo esposto all'aria. Successivamente si è provveduto a riposizionarlo per concludere il test. Considerazioni analoghe possono essere effettuate sull'andamento della temperatura, in figura 3.37, dell'iButton posizionato sul fianco destro. La non perfetta aderenza di quest'ultimo alla cute, per le stesse ragioni del sensore dell'MSR147, ha causato un suo raffreddamento negli ultimi 540 secondi della prova. Nello stesso intervallo di tempo il sensore del dispositivo (costituito da un termistore) riporta invece un andamento di temperatura crescente.

Per quanto riguarda l'umidità si osserva che nella figura 3.39 il suo andamento nella zona lombare risulta caratterizzato da una saturazione al 100% per il sensore del dispostivo (costituito da un SHT31) e da un adandamento iniziale tipico della saturazione per il sensore dell'MSR147. Quest'ultimo, grazie al ricircolo di aria sotto la

maglia, dopo 400 secondi comincia a misurare dei valori concordi con quelli dell'IButton. L'iButton, invece, misura dei valori di umidità crescenti per tutta la prova.
Come per la prima prova la presenza di picchi di minimo relativo negli andamenti di temperatura ed umidità è causata dalla non perfetta aderenza della maglia alla pelle. L'indumento favorisce il ricircolo di aria sotto il tessuto raffreddando i sensori di temperatura ed asciugando quelli di umidità.
In ultima analisi la figura 7.40 mostra la saturazione del sensore del dispostivo (un SHT31) mentre l'iButton non supera il 95% di umidità relativa. La presenza di valori di umidità relativa pari al 100% è sempre legata ad un contatto diretto con il sudore corporeo.
In tutte le riamanenti figure il dispositivo mostra un andamento concorde con almeno uno dei dispositivi commerciali. In questi casi le differenze tra i valori forniti sono imputabili alla tipologia di contatto fra la pelle ed il sensore. In particolare i sensori dell'MSR147 sono avvolti da una guaina siliconica, l'iButton ha un unico involucro in acciaio mentre il dispositivo ha dei sensori posti a diretto contatto con la pelle (termistori) e dei sensori rinchiusi in un contenitore di PLA che genera un'intercapedine di 1 mm di aria fra l'elemento sensibile e la pelle (i due SHT31 ed il BME280).

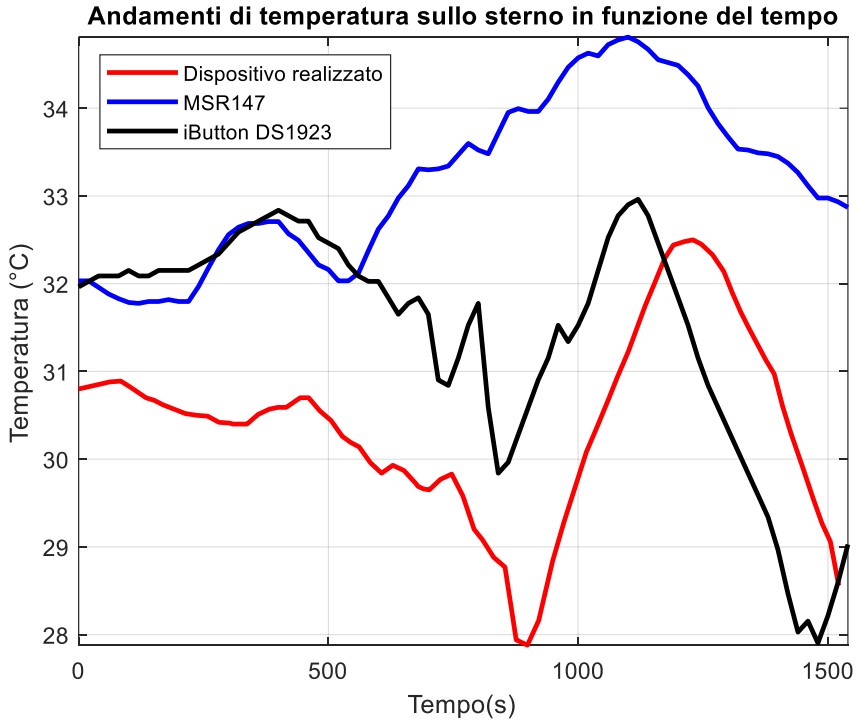


Figura 7.32 Andamenti della temperatura sullo sterno per i tre dispositivi in funzione del tempo.

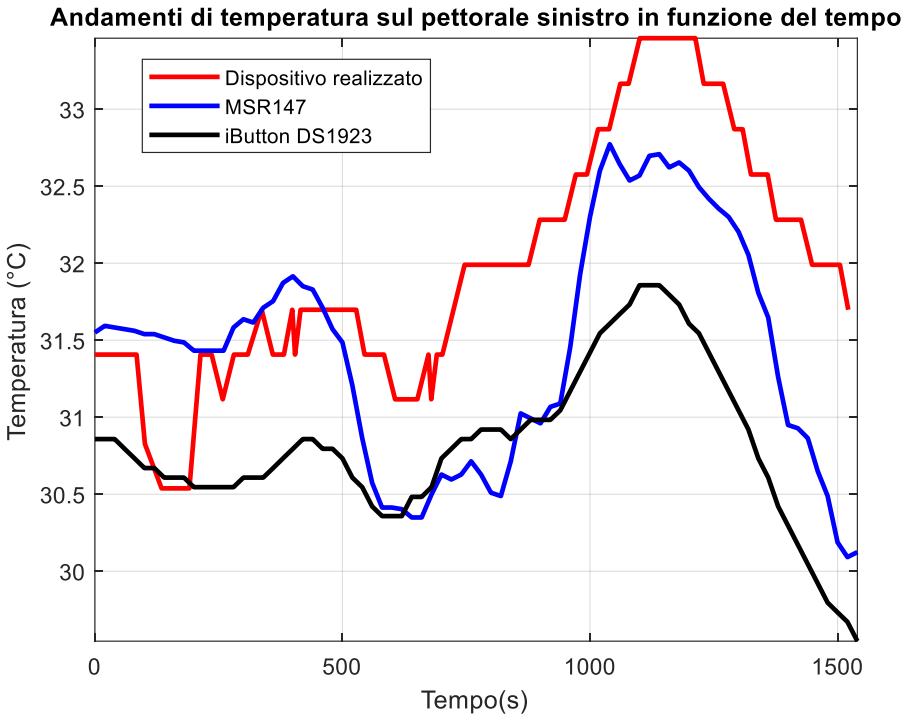


Figura 7.33 Andamenti della temperatura sul pettorale sinistro in funzione del tempo.

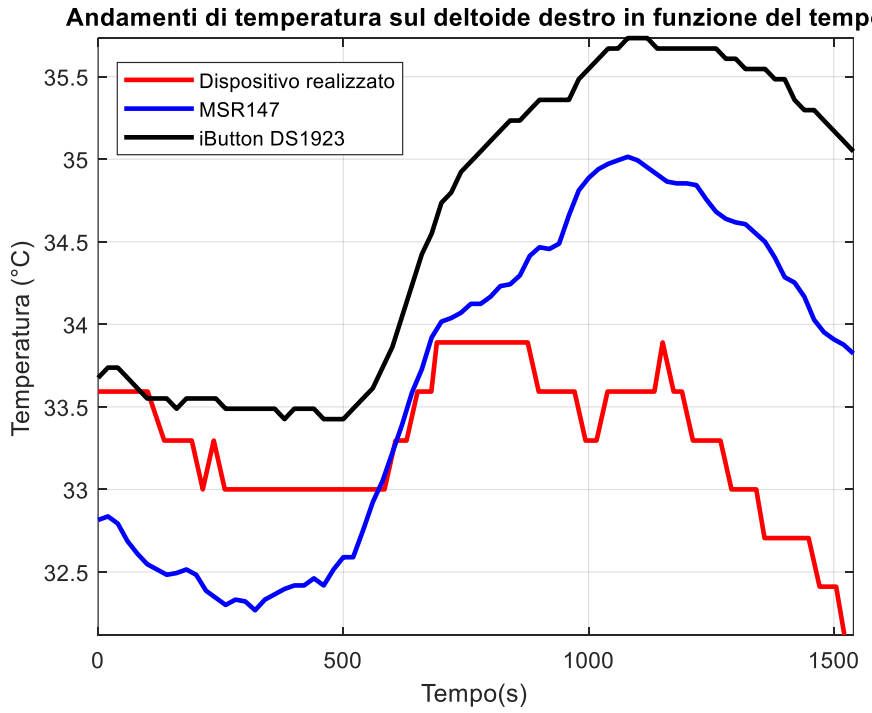


Figura 7.34 Andamenti della temperatura sul deltoide destro in funzione del tempo.

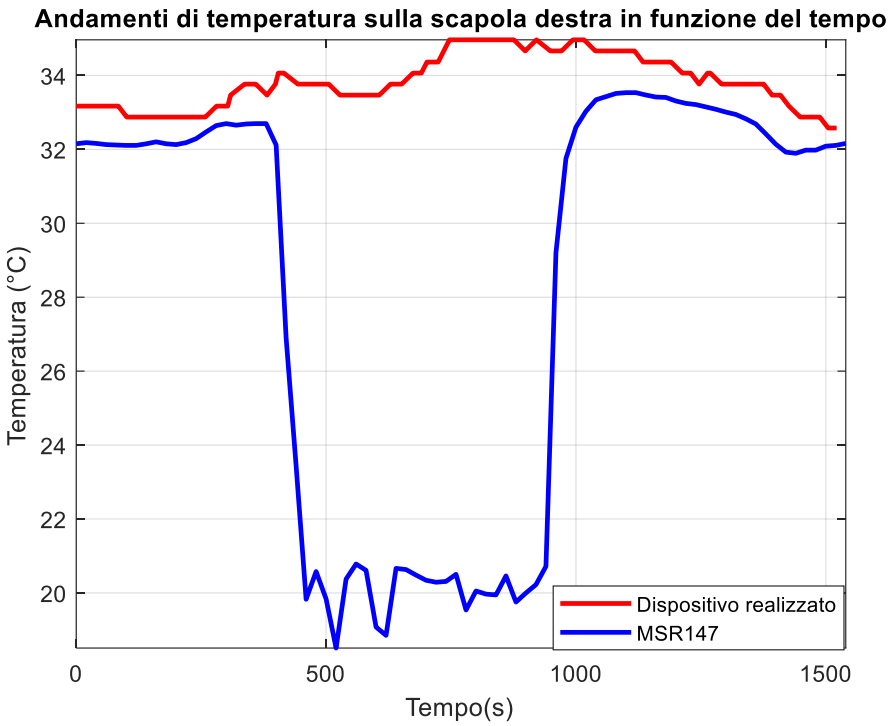


Figura 7.35 Andamenti della temperatura sulla scapola destra in funzione del tempo.

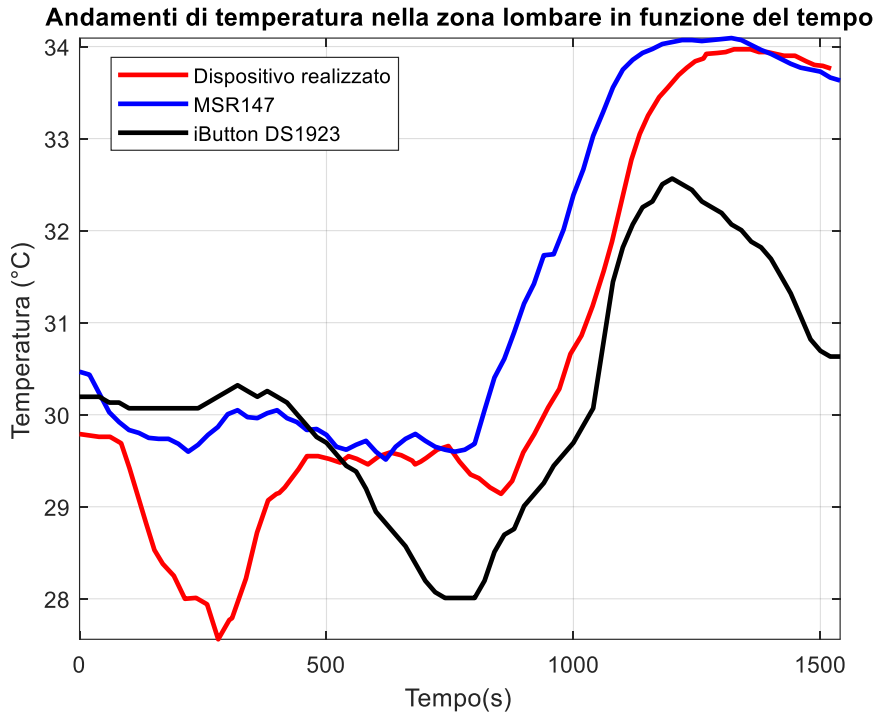


Figura 7.36 Andamenti della temperatura nella zona lombare in funzione del tempo.

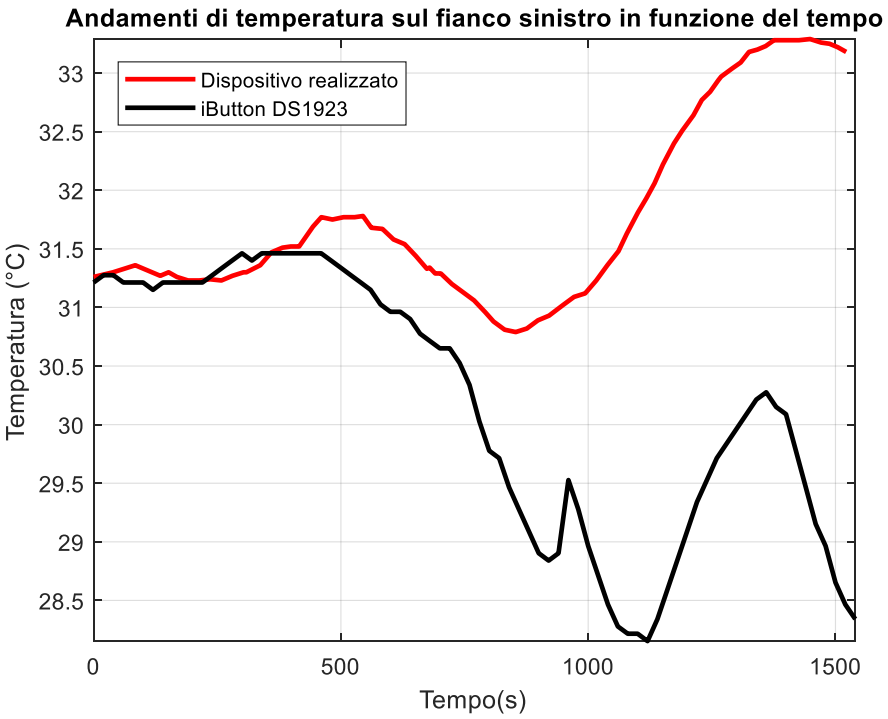


Figura 7.37 Andamenti della temperatura sul fianco sinistro in funzione del tempo.

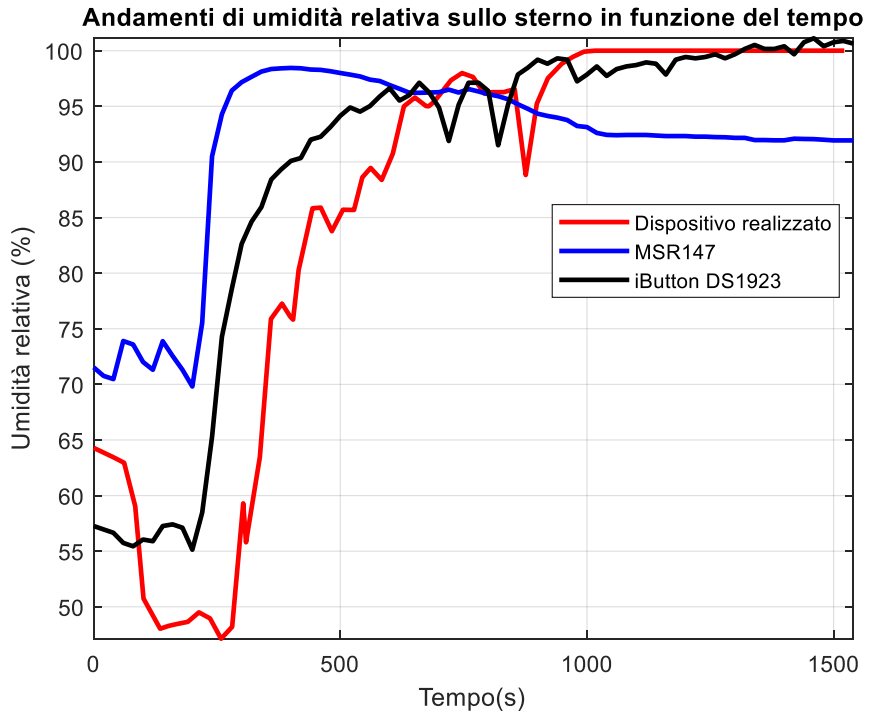


Figura 7.38 Andamenti dell'umidità relativa sullo sterno in funzione del tempo.

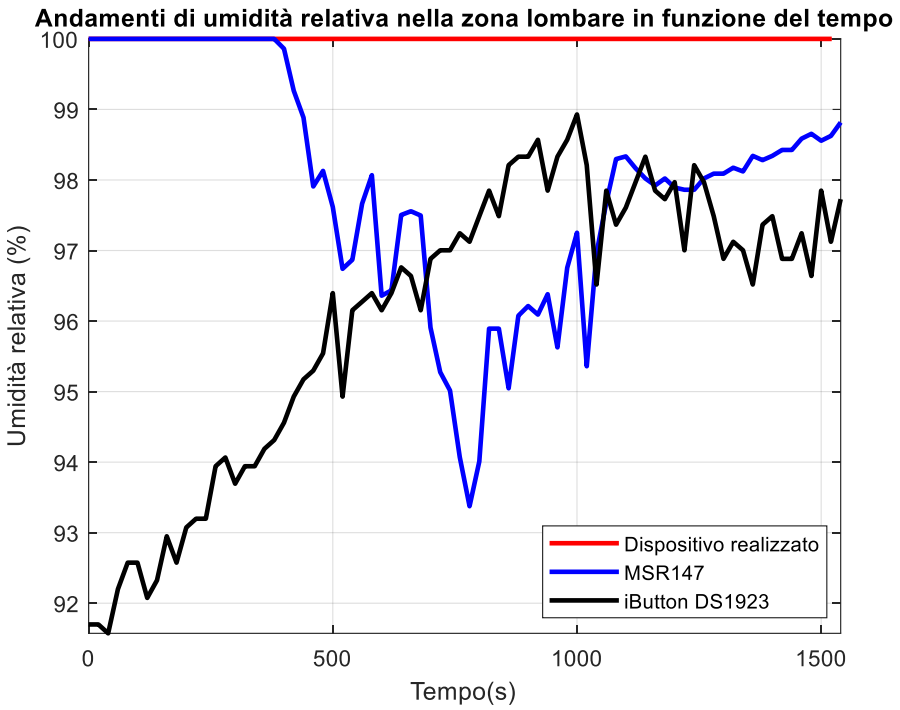


Figura 7.39 Andamenti dell'umidità relativa nella zona lombare in funzione del tempo.

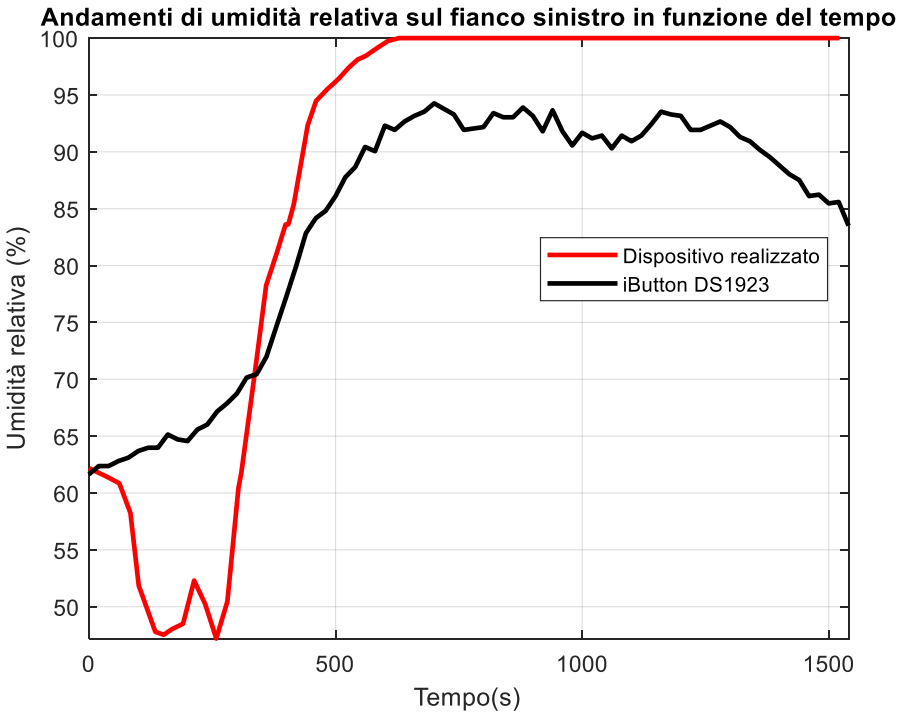


Figura 7.40 Andamenti dell'umidità relativa sul fianco sinistro in funzione del tempo.

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro si è realizzato un sistema indossabile per il monitoraggio continuo della temperatura e dell'umidità prodotta dal corpo umano durante attività sportiva.
Il dispositivo è dotato di una batteria interna ricaricabile che garantisce un'autonomia di circa 16 ore. Questa alimenta il microcontrollore, tre sensori digitali di temperatura e umidità relativa e quattro termistori. Tramite una clipse il dispositivo può essere collocato all'altezza della vita. I sensori hanno un ridotto ingombro rendendo possibile effettuare delle misure puntuali.
Il sistema acquisisce i dati e li invia ad un ricevitore sfruttando una comunicazione radio. Ciò è stato reso possibile grazie al modulo LoRa presente nel microcontrollore. La trasmissione dei dati non ha destato particolari problemi riuscendo a garantire un trasferimento di dati anche su alcune decine di metri.
Attraverso un software open source sono stati ottenuti i CAD dei contenitori di tutti i componenti del sistema per poi realizzarli attraverso stampa 3D. Il sistema così ultimato è stato testato in una camera climatica su volontario. I dati raccolti sono stati confrontati con una termocamera infrarossa e con i dati del test di Conconi svolto in contemporanea.
Dai dati raccolti nella prima prova è emerso che i valori di temepratura misurati dai sensori digitali sono mediamente inferirori di 3°C - 4°C rispetto alle termerature dei termistori. Tale differenza è stata attribuita alla presenza dei contenitori protettivi in PLA dei sensori digitali che, seppur dotati di aperture per favorire il passaggio del calore e dell'umidità corporea, aggiungono un contributo di resistenza termica. Altro aspetto riguarda la bagnabilità dei sensori digitali. Nella zona lombare e sul fianco sinistro vi sono stati valori di umidità relativa pari al 100% in seguito ad un contatto diretto con il sudore. Si può inoltre osservare che la sensazione associata ad un discomfort climatico viene raggiunta dopo 1000 secondi di attività fisica crescente corrispondente ad un'umidità relativa superiore al 70% e ad una temperatura superiore ai 34°C. Tali considerazioni sono concordi con i dati della termocamera che, a partire da questo istante di tempo, mostra esternamente la formazioni di sudore nel tessuto della maglietta con conseguente diminuzione della temperatura rilevata. I risultati ottenuti sono concordi con gli studi di Fanger secondo i qualli ad un aumento dello sforzo fisico la temperatura cutanea diminuisce a seguito di un aumento della sudorazione e con lo studio e con le considerazioni effettuate da G. Bartkowiak nello studio "Influence of undergarment structure on the parameters of the microclimate under hermetic protective clothing" [2.3] secondo il quale la stagnazione del sudore viene raggiunta approssimativamente dopo 20 minuti dall'inizio dell'attività.
In merito alla seconda prova è emerso che i sensori iButton sono meno proprensi alla saturazione rispetto a quelli del dispositivo e a quelli dell'MSR147. Tuttavia, per poter effettuare più misure in più parti del corpo, ne sono richiesti più di uno. Questi dispositivi sono inoltre più suscettibili alle sollecitazioni meccaniche e alla qualità del contatto con la pelle. Ciò facilita l'alterazione della misura. Non è stato possibile stabilire la bontà del dispositivo realizzato in quanto anche le soluzioni commerciali hanno mostrato delle criticità durante l'esecuzione del test.

Il dispositivo oggetto del lavoro di tesi potrebbe essere tuttavia migliorato riducendo le dimensioni grazie all'utilizzo di una PCB sulla quale vengono posizionati il microcontrollore, il circuito di condizionamento dei termistori e i connettori per la linea seriale I2C riservata ai sensori digitali. Sfruttando tale miglioramento sarebbe possibile integrare un modulo SD per il salvataggio dei dati acquisiti quando non è possibile effettuare una rappresentazione dei dati in tempo reale sfruttando la comunicazione radio. Per quanto riguarda i sensori digitali l'utilizzo di polimeri termoconduttivi potrebbe favorire una misura di temperatura più prossima a quella reale. Allo stesso modo evitare la saturazione dell'igrometro, variando la disposizione delle aperture sull'involucro, consentirebbe un monitoraggio dell'umidità anche in punti caratterizzati da elevata sudorazione.

Appendice

A1. Codice Trasmettitore

```
// DEFINIZIONE DELLE LIBRERIE

#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_SHT31.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <SPI.h>
#include <RH_RF95.h>

#define RFM95_CS 8      // pin8 Chip Select
#define RFM95_RST 4     // pin4 Radio Reset pin
#define RFM95_INT 3     // pin3 radio GPIO0/IRQ (interrupt request) pin
#define RF95_FREQ 915.0
#define VBATPIN A7 // pin tensione di batteria
#define MAX 1024

int ledpin = 13;
int led = 5; //  al pin 5 è connesso un led

float pin5 = A5; //canale analogico lettura tensione termistore
float pin4 = A4; //canale analogico lettura tensione termistore
float pin3 = A3; //canale analogico lettura tensione termistore
float pin2 = A2; //canale analogico lettura tensione termistore

float te1; //sht31d
float hu1;  //sht31d
float te2; //sht31d
float hu2;  //sht31d
float te280;
float hu280;
float pr280;
float tempo;

Adafruit_SHT31 sht31_1= Adafruit_SHT31();
Adafruit_SHT31 sht31_2= Adafruit_SHT31();
Adafruit_BME280 bme280=Adafruit_BME280();

char dato[13][15] = {0}; // array di tipo char contenente i dati dei
sensori
RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);
void setup() {
sht31_1.begin(0x44); // Inizializzazione del sensore  SHT31-D
sht31_2.begin(0x45);
bme280.begin(0x77);

pinMode(led, OUTPUT);
pinMode(pin5,INPUT);
```

```
pinMode(pin4,INPUT);
pinMode(pin3,INPUT);
pinMode(pin2,INPUT);

pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);

Serial.begin(115200);
  //delay(100);

Serial.println("Feather LoRa TX Test!");

  // manual reset
digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
// delay(10);
digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  //delay(10);

while (!rf95.init()) {
Serial.println("LoRa radio init failed");
while (1);
  }
Serial.println("LoRa radio init OK!");
if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
Serial.println("setFrequency failed");
while (1);
  }
Serial.print("Set Freq to: "); Serial.println(RF95_FREQ);
rf95.setTxPower(23, false); //impostazione potenza di trasmissione
}
intaccensione = 0; //variabile che regola il blink all'accensione

void loop() {
if (accensione==0){           // è la prima accensione?
digitalWrite(led, HIGH);   // accensione LED

delay(200);
digitalWrite(led, LOW);
delay(200);
digitalWrite(led, HIGH);
delay(200);
digitalWrite(led, LOW);
delay(200);
digitalWrite(led, HIGH);
delay(200);
digitalWrite(led, LOW);
accensione=1;
  }
// Misurazione della tensione di batteria
float Vbatt=analogRead(VBATPIN);
  Vbatt *=2; // moltiplica per 2
```

```
  Vbatt *=3.3; // moltiplica per 3.3 (tensione di alimentazione)
  Vbatt /=1024; // converte la misura in tensione
  Serial.print("Tensione di batteria (V): ");
Serial.println(Vbatt);

char cod0[5] = {"bat"};
char dato0[10] = "";
sprintf(dato0, "%.2f", Vbatt);//conversione del dato in char
char dato_0[15];
sprintf (dato_0, "%s%s", cod0, dato0);//aggiunta prefisso identificativo


// LETTURA DEI SENSORI ADAFRUIT SHT31-D
Wire.requestFrom(0x44, 2); // Richiesta di comunicazione con il SHT-31
indirizzo 0x44
te1 = sht31_1.readTemperature();
  hu1 = sht31_1.readHumidity();

Wire.requestFrom(0x45, 2); // Richiesta di comunicazione con il SHT-31
indirizzo 0x45
te2 = sht31_2.readTemperature();
  hu2 = sht31_2.readHumidity();

Serial.print(" Digital reading of temperature -SHT31- (°C) : ");
Serial.println(te1);
Serial.print(" Digital reading of relative humidity -SHT31- (%) : ");
Serial.println(hu1);
Serial.print(" Digital reading of temperature -SHT31- (°C) : ");
Serial.println(te2);
Serial.print(" Digital reading of relative humidity -SHT31- (%) : ");
Serial.println(hu2);

char cod1[5] = {"st1"};
char dato1[10] = "";
sprintf(dato1, "%.2f", te1); //conversione del dato in char
char dato_1[15];
sprintf (dato_1, "%s%s", cod1, dato1); //aggiunta prefisso identificativo

char cod2[5] = {"sh1"};
char dato2[10] = "";
sprintf(dato2, "%.2f", hu1); //conversione del dato in char
char dato_2[15];
sprintf (dato_2, "%s%s", cod2, dato2); //aggiunta prefisso identificativo

char cod3[5] = {"st2"};
char dato3[10] = "";

sprintf(dato3, "%.2f", te2); //conversione del dato in char
char dato_3[15];
sprintf (dato_3, "%s%s", cod3, dato3); //aggiunta prefisso identificativo
```

```
char cod4[5] = {"sh2"};
char dato4[10] = "";
sprintf(dato4, "%.2f", hu2); //conversione del dato in char
char dato_4[15];
sprintf (dato_4, "%s%s", cod4, dato4); //aggiunta prefisso identificativo

// LETTURA DEL SENSORE ADAFRUIT BME280
Wire.requestFrom(0x77, 3); // Richiesta di comunicazione con il BME280

te280 = bme280.readTemperature();
hu280 = bme280.readHumidity();
pr280 = bme280.readPressure()/100.0F;  //fattore di conversione in hPa

char cod5[5] = {"bmt"};
char dato5[10] = "";sprintf(dato5, "%.2f", te280); //conversione del dato
in char
char dato_5[15];
sprintf (dato_5, "%s%s", cod5, dato5); //aggiunta prefisso identificativo

char cod6[5] = {"bmh"};
char dato6[10] = "";
sprintf(dato6, "%.2f", hu280); //conversione del dato in char
char dato_6[15];

sprintf (dato_6, "%s%s", cod6, dato6); //aggiunta prefisso identificativo

char cod7[5] = {"bmp"};
char dato7[10] = "";
sprintf(dato7, "%.2f", pr280); //conversione del dato in char
char dato_7[15];
sprintf (dato_7, "%s%s", cod7, dato7); //aggiunta prefisso identificativo

Serial.print(" Digital reading of temperature -BME280- (°C) : ");
Serial.println(te280);
Serial.print(" Digital reading of relative humidity -BME280- (%) : ");
Serial.println(hu280);
Serial.print(" Digital reading of relative pressure -BME280- (hPa) : ");
Serial.println(pr280);

float tensione5 = (analogRead(pin5))*3.3/1024;
char cod8[5] = {"vg5"};
char dato8[10] = "";
sprintf(dato8, "%.2f", tensione5);//conversione del dato in char
char dato_8[15];
sprintf (dato_8, "%s%s", cod8, dato8); //aggiunta prefisso identificativo

float tensione4 = (analogRead(pin4))*3.3/1024;
char cod9[5] = {"vg4"};
char dato9[10] = "";
sprintf(dato9, "%.2f", tensione4);//conversione del dato in char
char dato_9[15];
```

```
sprintf (dato_9, "%s%s", cod9, dato9); //aggiunta prefisso identificativo

float tensione3 = (analogRead(pin3))*3.3/1024;
char cod10[5] = {"vg3"};
char dato10[10] = "";
sprintf(dato10, "%.2f", tensione3);//conversione del dato in char
char dato_10[15];
sprintf (dato_10, "%s%s", cod10, dato10); //aggiunta prefisso
identificativo

float tensione2 = (analogRead(pin2))*3.3/1024;
char cod11[5] = {"vg2"};
char dato11[10] = "";
sprintf(dato11, "%.2f", tensione2);//conversione del dato in char
char dato_11[15];

sprintf (dato_11, "%s%s", cod11, dato11); //aggiunta prefisso
identificativo

tempo=millis();
char cod12[5] = {"tmp"};
char dato12[10] = "";
sprintf(dato12, "%.0f", tempo);//conversione del dato in char
char dato_12[15];
sprintf (dato_12, "%s%s", cod12, dato12); //aggiunta prefisso
identificativo

if (Vbatt>= 3.60){
digitalWrite(led, HIGH); //accensione LED
delay(1000);
digitalWrite(led, LOW);    // spegni LED
}
else
{
digitalWrite(led, HIGH);   // accensione LED
}

//INVIO DEI DATI VIA RADIO
Serial.println("Transmitting...");

// creazionepacchettodati
for (int j=0 ; j<15 ; j++ ) {

dato[0][j] = dato_0[j];
dato[1][j] = dato_1[j];
dato[2][j] = dato_2[j];
dato[3][j] = dato_3[j];
dato[4][j] = dato_4[j];
dato[5][j] = dato_5[j];
dato[6][j] = dato_6[j];
dato[7][j] = dato_7[j];
```

```
dato[8][j] = dato_8[j];
dato[9][j] = dato_9[j];
dato[10][j] = dato_10[j];
dato[11][j] = dato_11[j];
dato[12][j] = dato_12[j];
}

uint8_tbuf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
uint8_tlen = sizeof(buf);

for (int i=0 ; i<13 ; i++) {
rf95.send((uint8_t*)dato[i], sizeof(dato[i])); // invio dati

delay(200);
 }
}
```

A2. Codice Ricevitore

```
#include <SPI.h>
#include <RH_RF95.h>

#define RFM95_CS 8
#define RFM95_RST 4
#define RFM95_INT 3
#define RF95_FREQ 915.0

RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

// Blinky on receipt
#define LED 13

void setup()
{
pinMode(LED, OUTPUT);
pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);

Serial.begin(115200);
while (!Serial) {
delay(1);
  }
delay(100);

  // manual reset
digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
delay(10);
digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
delay(10);

while (!rf95.init()) {
```

```
    //Serial.println("LoRa radio init failed");
while (1);
  }
  //Serial.println("LoRa radio init OK!");

if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    //Serial.println("setFrequency failed");
while (1);
  }
 // Serial.print("Set Freq to: "); Serial.println(RF95_FREQ);
rf95.setTxPower(23, false);
}
void loop()
{
if (rf95.available())
  {

bytebuf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
bytelen = sizeof(buf);

if (rf95.recv(buf, &len))
    {
digitalWrite(LED, HIGH);
Serial.print((char*)buf);
Serial.println("");
    }
else
    {
Serial.println("Receive failed");
}
  }
}
```

A3. Codice Matlab per l'acquisizione ed il monitoraggio dei dati

```
% LETTURA ED ACQUISIZIONE DATI DA PORTA SERIALE CON CHECK INTEGRITA'
% PACCHETTO DATI ACQUISITO (prefisso_misura).

clear all
close all
clc

delete(instrfind)

s1=serial('COM9');
set(s1,'Baudrate',115200);

i=1;
errore=0;
ce=0;

nrip = 1500; %numero di pacchetti dati da acquisire

batteria = zeros(); tempSHT31_1 = zeros(); humSHT31_1 = zeros();
```

```
tempSHT31_2 = zeros(); humSHT31_2 = zeros(); tempBME280 = zeros();
humBME280 = zeros(); pressBME280 = zeros(); tempch_A2=zeros();
tempch_A3=zeros(); tempch_A4=zeros(); tempch_A5= zeros();

tens5 = zeros(); tens4 = zeros(); tens3 = zeros(); tens2 = zeros();

counter = zeros(); % contatore del tempo
durata = zeros();

P2=load('coeff2.mat');
p2=P2.coeff2;
a2=p2(1); b2=p2(2); c2=p2(3);

P3=load('coeff3.mat');
p3=P3.coeff3;
a3=p3(1); b3=p3(2); c3=p3(3);

P4=load('coeff4.mat');
p4=P4.coeff4;
a4=p4(1); b4=p4(2); c4=p4(3);

P5=load('coeff5.mat');
p5=P5.coeff5;
a5=p5(1); b5=p5(2); c5=p5(3);

while (i<=nrip)
    fopen(s1);
    str=fgets(s1);
    if size(str,2)>2
    if str(1:3) == 'bat'
    sen = str2double(str(4:end));
    batteria(i)=sen;
    str=fgets(s1);
    if size(str,2)>2
    if str(1:3) == 'st1'
      sen = str2double(str(4:end));
      tempSHT31_1(i)=sen;
      str=fgets(s1);
      if size(str,2)>2
      if str(1:3) == 'sh1'
      sen = str2double(str(4:end));
      humSHT31_1(i)=sen;
      str=fgets(s1);
      if size(str,2)>2
      if str(1:3) == 'st2'
      sen = str2double(str(4:end));
      tempSHT31_2(i)=sen;
      str=fgets(s1);
      if size(str,2)>2
      if str(1:3) == 'sh2'
      sen = str2double(str(4:end));
      humSHT31_2(i)=sen;
      str=fgets(s1);
      if size(str,2)>2
      if str(1:3) == 'bmt'
      sen = str2double(str(4:end));
      tempBME280(i)=sen;
      str=fgets(s1);
```

```
if size(str,2)>2
if str(1:3) == 'bmh'
sen = str2double(str(4:end));
humBME280(i)=sen;
str=fgets(s1);
if size(str,2)>2
if str(1:3) == 'bmp'
sen = str2double(str(4:end));
pressBME280(i)=sen;
str=fgets(s1);
if size(str,2)>2
if str(1:3) == 'vg5'
sen = str2double(str(4:end));
tens5(i)=sen;
str=fgets(s1);
if size(str,2)>2
if str(1:3) == 'vg4'
sen = str2double(str(4:end));
tens4(i)=sen;
str=fgets(s1);
if size(str,2)>2
if str(1:3) == 'vg3'
sen = str2double(str(4:end));
tens3(i)=sen;
str=fgets(s1);
if size(str,2)>2
if str(1:3) == 'vg2'
sen = str2double(str(4:end));
tens2(i)=sen;
str=fgets(s1);
if size(str,2)>2
if str(1:3) == 'tmp'
sen = str2double(str(4:end));
counter(i)=sen;
else
errore = 1;
end
else
errore = 1;
end
else
errore =1;
end
else
errore = 1;
end
else
errore = 1;
end
else
errore = 1;
end
else
errore = 1;
end
else
errore = 1;
end
```

```
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end
  else
  errore = 1;
  end


if errore == 1
    i=i-1;
```

```
    ce=ce+1;
    fclose(s1);
    errore=0;
    pause(1)
else
    tempo=counter(1:i)./1000;
    durata(i)=tempo(i)-tempo(1);

    tempch_A2(i)=a2*tens2(i)^2+b2*tens2(i)+c2;
    tempch_A3(i)=a3*tens3(i)^2+b3*tens3(i)+c3;
    tempch_A4(i)=a4*tens4(i)^2+b4*tens4(i)+c4;
    tempch_A5(i)=a5*tens5(i)^2+b5*tens5(i)+c5;

    subplot(4,4,1)
    plot(durata(1:i),batteria(1:i))
    axis tight
    ylim ([0 5])
    xlabel('time (s)')
    ylabel('tensione (V)')
    grid on
    title('Andamento tensione di batteria')

    subplot(4,4,2)
    plot(durata(1:i),tempSHT31_1(1:i))
    axis tight
    ylim([10 50])
    xlabel('time (s)')
    ylabel('temperatura (°C)')
    grid on
    title('Andamento temperatura SHT31 (0x44)')

    subplot(4,4,3)
    plot(durata(1:i),humSHT31_1(1:i))
    axis tight
    ylim([0 105])
    xlabel('time (s)')
    ylabel('umidità relativa (%)')
    grid on
    title('Andamento umidità SHT31 (0x44)')

    subplot(4,4,4)
    plot(durata(1:i),tempSHT31_2(1:i))
    axis tight
    ylim([10 50])
    xlabel('time (s)')
    ylabel('temperatura (°C)')
    grid on
    title('Andamento temperatura SHT31 (0x45)')

    subplot(4,4,5)
    plot(durata(1:i),humSHT31_2(1:i))
    axis tight
    ylim([0 105])
    xlabel('time (s)')
    ylabel('umidità relativa (%)')
    grid on
    title('Andamento umidità SHT31 (0x45)')
```

```
subplot(4,4,6)
plot(durata(1:i),tempBME280(1:i))
axis tight
ylim([10 50])
xlabel('time (s)')
ylabel('temperatura (°C)')
grid on
title('Andamento temperatura BME280')

subplot(4,4,7)
plot(durata(1:i),humBME280(1:i))
axis tight
ylim([0 105])
xlabel('time (s)')
ylabel('umidità relativa (%)')
grid on
title('Andamento umidità relativa BME280')

subplot(4,4,8)
plot(durata(1:i),pressBME280(1:i))
axis tight
ylim([900 1100])
xlabel('time (s)')
ylabel('pressione (hPa)')
grid on
title('Andamento pressione atmosferica BME280')

subplot(4,4,9)
plot(durata(1:i),tempch_A2(1:i))
axis tight
ylim([10 50])
xlabel('time (s)')
ylabel('temperatura (°C)')
grid on
title('Andamento temperatura sul canale A2')

subplot(4,4,10)
plot(durata(1:i),tempch_A3(1:i))
axis tight
ylim([10 50])
xlabel('time (s)')
ylabel('temperatura (°C)')
grid on
title('Andamento temperatura sul canale A3')

subplot(4,4,11)
plot(durata(1:i),tempch_A4(1:i))
axis tight
ylim([10 50])
xlabel('time (s)')
ylabel('temperatura (°C)')
grid on
title('Andamento temperatura sul canale A4')

subplot(4,4,12)
plot(durata(1:i),tempch_A5(1:i))
axis tight
ylim([10 50])
```

```
        xlabel('time (s)')
        ylabel('temperatura (°C)')
        grid on
        title('Andamento temperatura sul canale A5')

        subplot(4,4,13)
        plot(durata(1:i),tens2(1:i))
        axis tight
        ylim([1 3])
        xlabel('time (s)')
        ylabel('tensione (V)')
        grid on
        title('Andamento tensione sul canale A2')

        subplot(4,4,14)
        plot(durata(1:i),tens3(1:i))
        axis tight
        ylim([1 3])
        xlabel('time (s)')
        ylabel('tensione (V)')
        grid on
        title('Andamento tensione sul canale A3')

        subplot(4,4,15)
        plot(durata(1:i),tens4(1:i))
        axis tight
        ylim([1 3])
        xlabel('time (s)')
        ylabel('tensione (V)')
        grid on
        title('Andamento tensione sul canale A4')

        subplot(4,4,16)
        plot(durata(1:i),tens5(1:i))
        axis tight
        ylim([1 3])
        xlabel('time (s)')
        ylabel('tensione (V)')
        grid on
        title('Andamento tensione sul canale A5')

       drawnow
       pause(0.05)
       pacchetto_plottato_nr = i
       ce
    end

   i=i+1;
   fclose(s1);
end
Durata_acquisizione_complessiva = tempo(i-1)-tempo(1)

fclose(s1);
delete(s1);
clear s1;
```

Bibliografia

[1.1] S.Silbernagl, A.Despopoulos. **Fisiologia – Atlante tascabile III edizione**. Casa Editrice Ambrosiana, 2008.

[1.2] D.U.Silverthorn. **Fisiologia Umana. Un approccio integrato VII edizione.** Pearson, 2017.

[1.3] H.Rosenberg, N.Pollock, A.Schiemann, T.Bulger, K.Stowell. **Malignant hyperthermia: a review**. Orphanet Journal of Rare Diseases, 2015.

[2.1] G.Alfano, V.Betta, F.R.d'Ambrosio, G.Riccio, **Lezioni di Fisica Tecnica.** LiguoriEditore, 2008.

[2.2] https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/597_2007_48_748.doc

[2.3] G. Bartkowiak, **Influence of undergarment structure on the parameters of the microclimate under hermetic protective clothing**. Central Institute for Labour Protection- National Research Institute, Department of Personal Protective Equipment, Wierzbowa 48, 90-133 Lódź, Poland, 2010.

[2.4] E. Lee, S. Han, K. Lee, J. Lee, G. Cho (2018) **Thermal properties of combat uniforms treated with microencapsulated octadecane and change in clothing microclimate via thermal manikin**, The Journal of The Textile Institute, 109:5, 585 - 595, DOI: 10.1080/00405000.2017.1361581.

[2.5] A. Kurczewska, J. Leśnikowski (2008), **Variable-Thermoinsulation Garments With a Microprocessor Temperature Controller**, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 14:1, 77-87, DOI: 0.1080/10803548.2008.11076751.

[3.1] A. Vallan, **Sensori di temperatura,** diapositive del corso di "Sensori e Misure per la Bioingegneria", Politecnico di Torino, 2016.

[3.2] Proprietà delle termocoppie: https://it.wikipedia.org/wiki/Termocoppia.

[3.3] Funzionamento sensori di umidità: https://www.itsensor.it/blog/sensori-umidita-come-funzionano/.

[3.4a] Datasheet SHT7x: http://www.mouser.com/ds/2/682/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5-469726.pdf

[3.4b] Datasheet SHTW2: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Datasheets/Humidity/Sensirion_Humidity_Sensors_SHTW2_Datasheet.pdf

[3.4c] Datasheet SHT1x: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/SHT1x_datasheet.pdf

[3.4d] Datasheet SHT3x:
https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Datasheets/Humidity/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital.pdf

[3.4e] Datasheet BME280:
https://www.embeddedadventures.com/datasheets/BME280.pdf

[3.4f] Datasheet DHT22:
https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf

[3.4g] Datasheet HTS221: https://www.st.com/resource/en/datasheet/hts221.pdf

[3.5] Brochure manichino termoriscaldato Thermetrics:
http://www.thermetrics.com/sites/default/files/product_brochures/Newton%20Manikin%20Thermetrics.pdf

[3.6] Datasheet MSR147:
https://www.msr.ch/media/pdf/Datalogger_MSR147WD_Datasheet.pdf

[3.7] Datasheet MSR145:
https://www.msr.ch/media/pdf/Data_logger_MSR145_Data_sheet.pdf

[3.8] Application note iButton: https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3808

[3.9] Datasheet iButton DS1996:
https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1996.pdf

[4.1] Datasheet Adafruit Feather M0 LoRa: https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-feather-m0-radio-with-lora-radio-module.pdf

[4.2] Datasheet Adafruit SHT31D: https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-sht31-d-temperature-and-humidity-sensor-breakout.pdf

[4.3] Datasheet Adafruit BME280: https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout.pdf

[4.4] Datasheet Adafruit MMA8451: https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-mma8451-accelerometer-breakout.pdf

[4.5] Datasheet Adafruit DHT22: https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/dht.pdf

[7.1] Grafico test di Conconi: http://www.ilconsigliasalute.com/come-eseguire-il-test-di-conconi-con-tapis-roulant-o-su-pista/

[7.2] Contorno corpo umano: https://www.pinterest.it/pin/108790147225989001/