

# 4.0 Gym Prototype

Luca Cinti<sup>1\*</sup>, Emanuele Lattanzi<sup>2</sup>

## Sommario

In questo elaborato abbiamo cercato di predisporre un'architettura per la raccolta dei dati in una piccola home gym, innanzitutto per verificare la fattibilità nel reperimento di alcune misurazioni, per poi passare all'analisi dei dati raccolti, con l'obiettivo di estrapolare delle metriche significative sia ai fini dell'allenamento, che dello studio delle caratteristiche termiche dell'ambiente.

## Keywords

IOT — Arduino — ESP32 — MQTT — Training Metrics

<sup>1</sup> Laurea Magistrale in Informatica Applicata, Università degli Studi di Urbino Carlo Bo, Urbino, Italia

<sup>2</sup> Docente di Programmazione per l'Internet of Things, Università degli Studi di Urbino Carlo Bo, Urbino, Italia

\*Corresponding author: l.cinti@campus.uniurb.it

## Introduzione

L'obiettivo preliminare di questo elaborato era verificare la fattibilità dell'allestimento di un sistema di raccolta dati, in una piccola home gym, costruendo l'infrastruttura per far comunicare attraverso diversi protocolli una rete di sensori.

Tra le più disparate metriche di possibile interesse ai fini dello studio di una palestra, sono state scelte due categorie di dati: da un lato i quelli relativi all'ambiente di allenamento, dall'altro i dati sull'esecuzione degli esercizi.

Per il progetto corrente sono state dunque prese in analisi le metriche seguenti:

- temperatura e umidità della stanza, prima durante e dopo l'allenamento
- variazione di eCO<sub>2</sub> e eTVOC (equivalent Total Volatile Organic Compounds)
- accelerazione del bilanciere durante l'esecuzione di un esercizio campione

## 1. Descrizione dell'ambiente

Funzionale alla comprensione di questo elaborato, è la descrizione dell'ambiente in cui è stata allestita la palestra: si tratta di una stanza appartenente ad un vecchio immobile disabitato, appositamente ristrutturata, le cui misure sono 5.05 x 4.95 metri, per un'altezza di 3.86 metri.

L'ambiente presenta una finestra, una porta finestra e un'arcaia di ingresso sulla quale sono state applicate due tende, fissate con velcro ai lati del muro, come isolante dal resto del locale, in quanto non sono presenti sistemi di riscaldamento centralizzato. Possiamo vederne una panoramica nell'immagine che segue (Figura 2).

Il primo punto di analisi è dunque diretta conseguenza di quanto appena detto: analizzare le performance termiche dell'ambiente, per trovare il miglior metodo di riscaldamento durante i mesi invernali.

Collegato a questo vi è il secondo punto in analisi: riscaldando un ambiente di circa 96 metri cubici, quanto più possibile isolato dal resto del locale, abbiamo ritenuto importante monitorare la qualità dell'aria durante l'allenamento.

### 1.1 La terza metrica

Come abbiamo visto in precedenza, come terzo oggetto di studio è stata presa in analisi l'accelerazione del bilanciere durante l'esecuzione di un esercizio campione.

L'esercizio selezionato è la distensione su panca piana, scelto in quanto ci garantiva il maggior grado di controllo sull'esecuzione, essendo uno degli esercizi base di ogni allenamento. Ne possiamo vedere uno schema in Figura 1.

La popolarità di tale esercizio ci garantiva inoltre buone potenzialità di espansione di questo studio ad un ampio campione di tester, nel caso fossimo riusciti a standardizzare il più possibile il metodo di acquisizione dei dati.

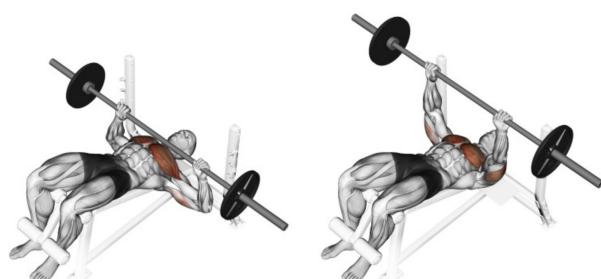
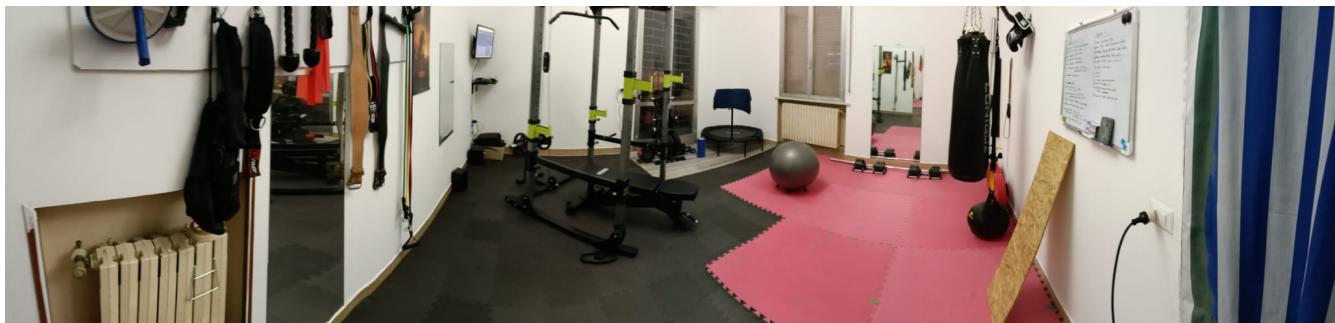


Figura 1. distensioni su panca piana



**Figura 2.** Visione panoramica dell'ambiente

## 2. Gli strumenti utilizzati

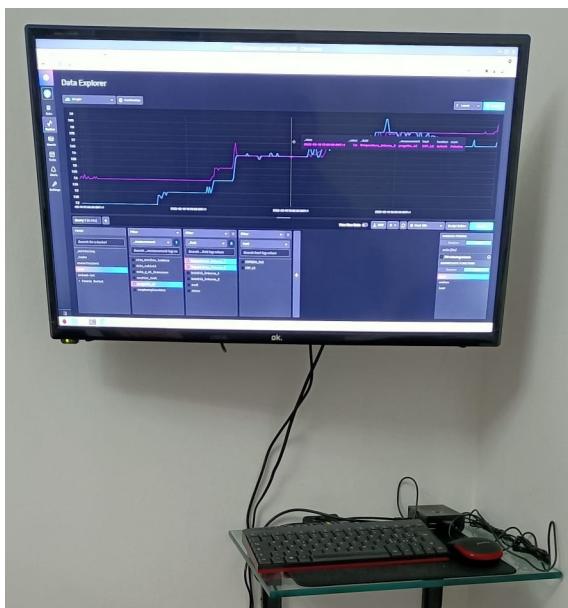
In questa sezione porremo l'attenzione sugli strumenti di indagine utilizzati, sulla loro costruzione, e sulle scelte di progetto e implementazione adottate.

### 2.1 Allestimento dell'infrastruttura

La prima necessità è stata dunque quella di creare l'infrastruttura attraverso la quale sarebbe avvenuta la comunicazione dei dati.

A livello di rete e internet sono stati fatti diversi tentativi, prima con due diversi router extender che prolungavano una rete casalinga fino al locale della palestra, e poi con un router con scheda SIM situato direttamente in loco. La prima soluzione è stata scartata in quanto, ad una distanza in linea d'aria dal router di casa di circa cinquanta metri, senza considerare i muri, la connessione era troppo instabile.

A questa rete è stato poi collegato un Raspberry Pi 4 che ha fatto sia da broker MQTT (di cui parleremo in seguito), che da semplice computer per la raccolta e visualizzazione dei dati, come vediamo in Figura 3.



**Figura 3.** Raspberry e monitor

### 2.2 I sensori utilizzati

Per raccogliere i dati sono stati utilizzati i seguenti sensori:

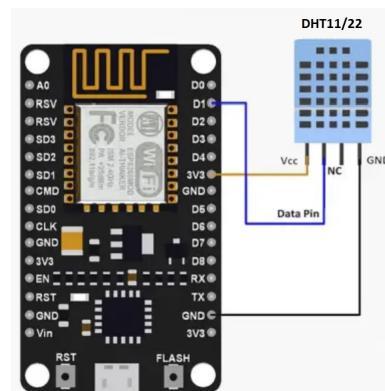
- due DHT11 e due DHT22 per temperatura e umidità
- un CCS811 per eCO<sub>2</sub> e eTVOC
- due GY-521 MPU-6050 per l'accelerazione

Si è scelto di collegare gli accelerometri a dei moduli di sviluppo ESP32 mini, potendo così accedere ad un'architettura double core, mentre tutti gli altri sensori sono stati collegati a delle normali ESP8266. Abbiamo adottato sensori DHT11 e DHT22 per temperatura e umidità, potendo così avere un confronto nella precisione dei due: vediamo le differenze tra le loro specifiche in Tabella 1.

**Tabella 1.** Specifiche DHT

	DHT11	DHT22
Range umidità	20-90%	0-100%
Precisione umidità	±5%	±2%
Range temperatura	0-50 °C	-40 +80 °C
Precisione temperatura	±2%	±0.5%
Tempo di lettura	6-10 s	2 s

Nelle tre immagini che seguono (Figure 4, 5, 6) sono mostrati gli schemi dei circuiti costruiti:



**Figura 4.** ESP8266 - DHT11/22

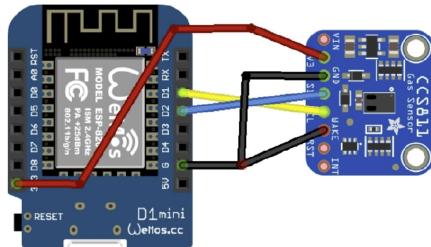


Figura 5. ESP8266 - CCS811

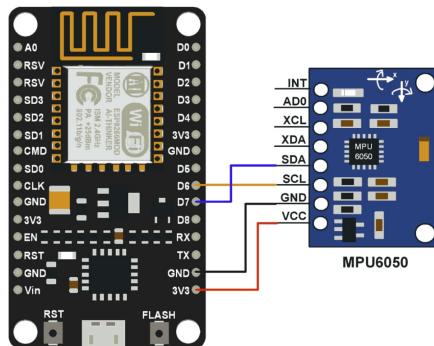


Figura 6. ESP32 - MPU-6050

### 2.2.1 I sensori per i dati ambientali e il loro obiettivo

Tenendo a mente il primo punto di indagine indicato nell'introduzione, ovvero analizzare i dati ambientali, è doveroso innanzitutto rispondere al perché abbiamo ritenuto delle metriche tuttosomma banali, quali umidità e temperatura, interessanti ai fini dell'elaborato.

Come già detto, il locale non presenta sistemi di riscaldamento centralizzato, e, raggiungendo nei mesi invernali temperature interne prossime agli zero gradi centigradi, si è scelto di riscaldarlo tramite un generatore di calore a GPL con una potenza di 10 KW, posizionato all'ingresso della palestra, ovvero con la parte frontale dentro il locale, e lo scarico fuori (si faccia riferimento alla Figura 7).

Tuttavia questo presentava altri problemi, sia a livello di sicurezza, trattandosi pur sempre di una combustione in un ambiente chiuso, per quanto la zona di scarico fosse sufficientemente grande e areata, che a livello pratico: il generatore di calore utilizzato è in grado di portare l'ambiente ad una temperatura confortevole in tempi contenuti, dell'ordine di dieci/quindici minuti (chiaramente in base alla temperatura di partenza), è dunque necessario spegnerlo per non surriscaldare l'ambiente. Questo comporta però un crollo della temperatura pressoché immediato. Si è scelto dunque di inserire una stufa da 3 KW il cui compito è quello di mantenere la temperatura costante.

Alla luce di quanto detto, assume ancora più importanza la seconda metrica oggetto di studio, ovvero la variazione di eCO<sub>2</sub> e eTVOC (equivalent Total Volatile Organic Compounds), come monitor indiretto della qualità dell'aria.

Importante ricordare a tal proposito che il sensore CCS811 non misura direttamente l'anidride carbonica o i composti organici volatili, ma misura la quantità equivalente di impurità nell'aria per ottenere quelle letture del sensore: in altre parole, il sensore legge determinati dati di qualità dell'aria, tali dati possono essere dovuti alla presenza di CO<sub>2</sub>, o da composti organici equivalenti capaci di dare quel tipo di lettura. È una sottigliezza ininfluente ai fini dell'elaborato, ma per dovere di chiarezza ne abbiamo ritenuto necessaria la precisazione.

Data questa premessa passiamo ora a descrivere le relative scelte di progetto.

Fare uno studio accurato delle performance termiche di un ambiente richiede una grande quantità di dati, sia a livello di caratteristiche ingegneristiche e architettoniche dell'ambiente, che dei materiali di costruzione, informazioni alle quali non avevamo completo accesso. Potevamo tuttavia estrarrele e farne una buona stima, sia attraverso l'analisi in loco di periti tecnici, che dai dati restituiti dai sensori.

Il dato che si è scelto di ricercare è la dispersione del calore dall'ambiente, che costituisce un buon aggregato e indice delle performance termiche della stanza.

Per ottenere tale informazione si è scelto di utilizzare i quattro sensori DHT come segue: due sono stati posizionati a due angoli della stanza, per ottenere la temperatura media interna, uno fuori dall'edificio per la temperatura esterna, e uno appena fuori dall'ingresso della palestra, comunque in un ambiente interno, ma non riscaldato.

Le due postazioni di rilevamento di temperatura e umidità esterne alla stanza, non avendo accesso a prese elettriche, sono state implementate con batteria e un meccanismo di *deep sleep* per il risparmio energetico. I relativi circuiti sono stati quindi dotati di collegamenti per una batteria da 650 mA e di un jumper per consentire la programmazione del modulo.

### 2.2.2 Gli accelerometri e il loro obiettivo

Un discorso a parte va fatto per gli accelerometri, che per noi costituivano l'argomento di maggiore interesse di questo studio.

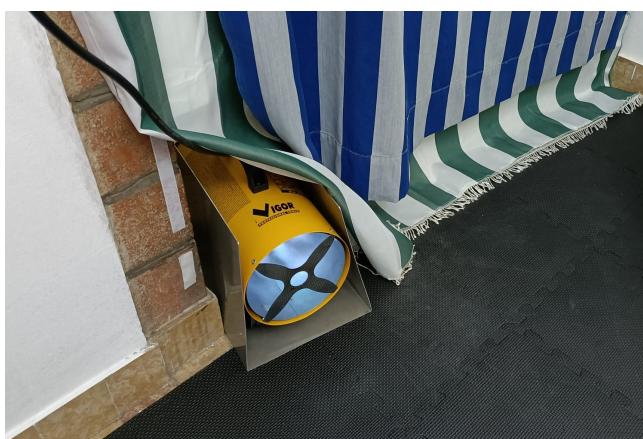


Figura 7. Termoventilatore GPL

Innanzitutto è necessario chiarire l'obiettivo dell'analisi, ovvero cercare di registrare se nell'esecuzione di un qualsiasi esercizio che coinvolge il sollevamento di un bilanciere, si rilevano delle imperfezioni, da cogliere attraverso le differenze nelle accelerazioni agli estremi dell'attrezzo: se un accelerometro posto a un estremo del bilanciere, avesse riscontrato accelerazioni diverse da quelle registrate all'estremo opposto, sarebbe stato possibile individuare degli errori nell'esecuzione dell'esercizio, dandoci così un feedback sulla qualità dello stesso, ed eventuali indicazioni per migliorarlo.

Con questo obiettivo in mente abbiamo ritenuto imprescindibile che entrambi i moduli fossero alimentati a batteria, per evitare perturbazioni nelle misurazioni dovute ad eventuali interferenze dei fili di alimentazione. Questo ha però aumentato la difficoltà nella costruzione del "sistema accelerometro", che includendo ora anche una batteria, diventava più ingombrante e difficilmente stabilizzabile sul bilanciere.

La soluzione che abbiamo adottato è stata quella di progettare delle scatole di plastica, appositamente disegnate in base alle misure del modulo ESP32 col sensore e la batteria, stampate in 3D. Per minimizzare le vibrazioni e i movimenti interni alla scatola, sono stati poi inseriti degli spessori in gommapiuma e dei tappi in plastica, aumentando così la stabilità del sistema. Ogni scatola presenta inoltre un foro per accedere alla porta USB dell'ESP32 per le future programmazioni del modulo.

Ne possiamo vedere il risultato nella Figura 8.



**Figura 8.** Scatola con accelerometro

Queste scatole sono state poi fissate agli anelli di bloccaggio dei dischi al bilanciere, come vediamo in Figura 9.

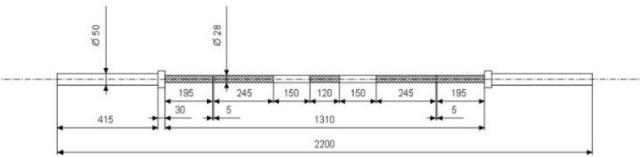
Aggiungiamo inoltre che i bilancieri utilizzati per questi test sono bilancieri standard olimpici, di cui riportiamo le misure nell'immagine che segue (Figura 10), che hanno, e questo vedremo in seguito che risulterà critico, la caratteristica di avere la zona di fissaggio dei pesi capace di ruotare attorno all'asse del bilanciere.

Tale accorgimento tecnico si utilizza per minimizzare la ro-



**Figura 9.** Anello di bloccaggio dischi su bilanciere

tazione, e le conseguenti accelerazione e variazione di momento angolare del sistema, in fase di movimento del carico: un'improvvisa rotazione del bilanciere attorno al suo asse orizzontale non comporta così la rotazione dei pesi (o comunque la riduce significativamente), che causerebbe maggiore instabilità nell'esercizio.



**Figura 10.** Misure bilanciere olimpico

Prima di passare alla raccolta e analisi dei dati aggiungiamo che i microcontrollori sono stati programmati tramite Arduino con la sua integrazione per Visual Studio Code. Eventuali particolarità o dettagli specifici di implementazione saranno affrontati successivamente.

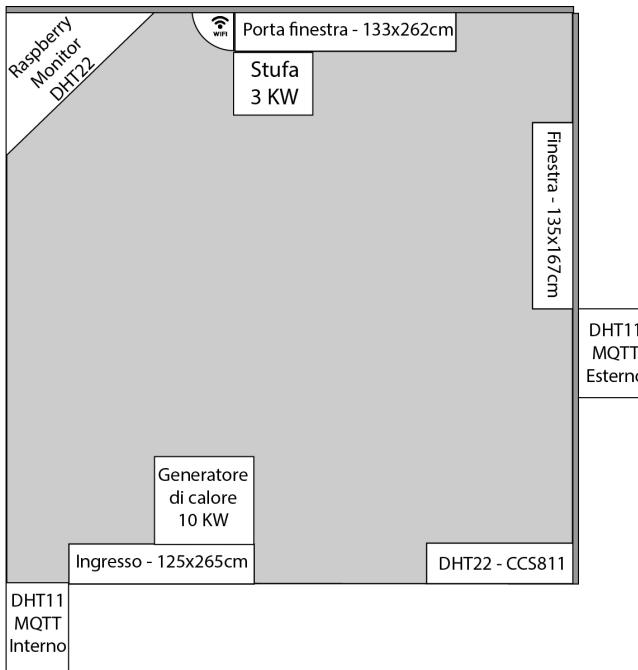
Tutto il codice è comunque consultabile nella repository GitHub [3] indicata in bibliografia.

### 2.3 Tecnologie di comunicazione adottate

I dati sono stati raccolti su un server remoto sul quale è stato installato *influxdb*, un database open source per serie temporali, particolarmente adatto ad applicazioni IOT.

Dei sette sensori di cui si è discusso, cinque comunicavano tramite il modulo WiFi del microcontrollore collegandosi direttamente al server remoto.

Per i due moduli con DHT11 posizionati fuori dalla palestra, quello interno al locale, e quello esterno all'edificio (per maggior chiarezza si faccia riferimento alla pianta del locale in Figura 11) si è optato per una soluzione differente: essendo alimentati a batteria, abbiamo scelto di utilizzare due tecnologie particolarmente adatte al risparmio energetico. Come protocollo di comunicazione si è scelto MQTT (Message



**Figura 11.** Pianta della palestra. Non in scala

Queuing Telemetry Transport), particolarmente meno energetivo del classico WiFi, con il Raspberry Pi 4 che funge da broker, e i due sensori da client.

Per l'invio dei dati su influxdb è stato poi appositamente configurato su Raspberry un *plugin telegraf*.

La seconda tecnologia per il risparmio energetico è più che altro un accorgimento a livello implementativo: invece di programmare i sensori con la classica modalità, ovvero in loop continuo, si è scelto di adottare il *deep sleep*, ovvero al termine di ogni lettura e invio dati, i moduli vengono letteralmente addormentati, lasciando attivo il Real Time Clock (RTC), che si occupa di risvegliare il sistema dopo un intervallo di tempo programmabile.

Nel nostro caso abbiamo visto che la durata della batteria, con questo accorgimento, è praticamente decupliata, passando da circa cinque ore a oltre due giorni.

Nell'immagine che segue (Figura 12) vediamo uno dei due sensori in oggetto.



**Figura 12.** Sensore DHT11 fuori dall'ingresso della palestra

### 3. I dati ambientali durante l'allenamento

Premettiamo che tutti i dati sono disponibili sia in forma aggregata che estensivamente nella repository GitHub indicata in bibliografia [1], oltre ad essere consultabili direttamente sul server influxdb.

Passiamo ora vedere le misurazioni effettuate, relative ad una data campione particolarmente indicativa, in cui è stata utilizzata la palestra. Alleghiamo i grafici estratti da influxdb nelle immagini che seguono (Figure 13, 14, 15), e condensati nella tabella in Figura 16.



**Figura 13.** Temperatura in gradi Celsius



**Figura 14.** Umidità in percentuale



**Figura 15.** eCO<sub>2</sub> in ppm e eTVOC in ppb

Le linee azzurre e viola sono relative ai due sensori interni, quella arancio al sensore fuori dall'ingresso, quella magenta al sensore esterno.

Timestamp	T. esterna	T. porta	T. interna 1	T. interna 2		
18:55	13,4	13,0	11,2	12,3		
19:09	12,4	13,2	20,4	18,0		
19:30	11,0	12,8	16,7	15,7		
20:00	10,6	12,7	16,9	15,3		
20:27	11,2	12,8	16,8	16,3		
20:37	11,1	12,7	15,1	15,4		
Timestamp	U. esterna	U. porta	U. interna 1	U. interna 2	eCO2	eTVOC
18:55	51,0	56,0	64,7	66,1	868	71
19:09	50,0	54,0	50,2	57,5	722	48
19:30	54,0	56,0	61,1	64,9	1330	141
20:00	63,0	57,0	63,9	70,3	1537	197
20:27	53,0	57,0	66,9	68,5	1647	287
20:37	57,0	58,0	73,9	73,6	1805	456

**Figura 16.** dati condensati in timestamp significativi

### 3.1 Analisi dei dati ambientali

Iniziamo questa analisi da una descrizione più approfondita dei grafici precedentemente allegati.

Come possiamo vedere in tabella, sono stati indicati dei timestamp significativi:

- 18:55, inizio dell'allenamento e accensione di stufa e generatore di calore
- 19:08, spegnimento del generatore di calore
- 19:30 e 20:01, due intertempi per mostrare l'andamento durante l'allenamento
- 20:27, spegnimento della stufa
- 20:37, fine allenamento

La variazione più importante in tutti gli indicatori avviene mentre il generatore di calore a GPL è acceso; vediamo infatti che le temperature interne hanno una rapidissima crescita, parallela ad un crollo dell'umidità. Molto positivo è inoltre il fatto che la qualità dell'aria non degradi troppo significativamente, registrando solo un picco nella quantità di anidride carbonica (e/o suoi composti equivalenti), comunque inferiore a quella generata dal metabolismo durante l'allenamento.

Particolarmente interessante risulta l'andamento della temperatura registrata dal sensore posizionato appena fuori dall'ingresso della stanza (linea arancio del grafico in Figura 13), che in questa fase presenta a sua volta un aumento, mostrando chiaramente i problemi di isolamento termico dovuti alla separazione degli ambienti ottenuta soltanto tramite due tende in tessuto sintetico.

Il discostamento tra i valori della temperatura interna è invece spiegato dall'orientamento della stufa elettrica, che evidentemente genera un flusso di aria calda più indirizzato verso uno dei sensori.

Dallo spegnimento del generatore GPL in poi, risulta evidente la discesa della temperatura della palestra fino ad un punto di stabilità, ovvero una situazione in cui il calore generato dalla stufa elettrica e dal metabolismo di chi si allena, è egualato dal calore disperso.

I due sensori esterni alla palestra mostrano un andamento banale, ovvero di graduale stabilizzazione attorno alla temperatura atmosferica per il sensore esterno, e alla temperatura dell'edificio per quello fuori dall'ingresso. Per questi ultimi sensori non è di interesse, ai fini dell'elaborato, l'andamento dell'umidità.

Torna invece ad essere di particolare interesse notare come le curve di CO<sub>2</sub> e umidità abbiano un andamento correlato: i loro aumenti sono dovuti al metabolismo di chi si allena, che emette costantemente anidride carbonica, vapore acqueo e composti organici di varia natura.

Nella fase terminale dell'allenamento registriamo altre due osservazioni: lo spegnimento della stufa causa l'ovvio abbassamento della temperatura interna e la sua convergenza verso un unico valore. Si può inoltre notare un difficilmente spiegabile aumento sia dell'umidità che di CO<sub>2</sub> e TVOC. Questi riteniamo invece che siano dovuti a due fattori: da un lato la natura dell'allenamento svolto, che prevedeva una forte componente aerobica sul finale, comportava un forte aumento del metabolismo di chi si allenava, dall'altro è possibile che la stufa elettrica fungesse dal moderatore per l'umidità.

## 4. Studio delle accelerazioni

I dati sono stati acquisiti durante l'esecuzione di un allenamento così strutturato: ogni esercizio su panca piana è stato svolto in blocchi di quattro serie da otto/dieci ripetizioni ognuna, con circa 90 secondi di pausa tra una serie e l'altra (col termine "ripetizione" si intende una discesa e risalita complete del bilanciere).

Gli accelerometri e i microcontrollori utilizzati permettono una lettura dei dati ogni millesimo di secondo, ma si è scelto, per non stressare troppo il modulo (causandone surriscaldamento, e relativo degradarsi della precisione), di effettuarne una ogni centesimo di secondo. Dilatare ulteriormente la finestra temporale è stato tuttavia scartato perché una distensione su panca piana, nelle sue fasi di concentrica e eccentrica (salita e discesa del bilanciere), richiede tra gli uno e i due secondi, di conseguenza abbiamo ritenuto opportuno avere circa 150 letture per ogni esecuzione.

L'implementazione più ovvia, ovvero quella che scrive su database ad ogni lettura (ogni centesimo di secondo) è stata scartata per motivi tecnici, ritenendo il tempo di invio dato di gran lunga superiore a quello di acquisizione dello stesso: inviare la lettura via internet e scriverla sul server remoto, richiede sicuramente molto più di un centesimo di secondo, oltre ad essere un tempo variabile, senza contare la quasi certa perdita di pacchetti nel caso di invii così frequenti.

Abbiamo dunque aggregato le letture nei loro valori medio e massimo, a partire dagli array sopra descritti, la cui dimensione è stata impostata a 35 elementi (corrispondenti ad un invio ogni 350 millesimi di secondo).

Si è scelto inoltre di parallelizzare i task principali eseguiti dai moduli, sfruttando l'architettura dual core delle ESP32. Invece di lavorare con il classico *while-loop*, vengono associati due task ai due core, eseguiti a loro volta su *cicli-for* infiniti. Uno dei due processori si occupa di raccogliere i dati, scrivendoli su un buffer condiviso, l'altro controlla, come da paradigma produttore-consumatore, se ci sono dati pronti per essere elaborati (calcolo della media e del massimo), e li invia. Il primo core, una volta riempito il primo array, passa a scrivere i dati su un secondo buffer.

L'idea di fondo è quella di permettere ad un core di effettuare continuamente le misurazioni, mentre all'altro di provvedere ai calcoli sui dati e al successivo invio. Così facendo, ipotizzando l'assenza di problemi di perdita dati in fase di comunicazione col server, si va ad annullare il tempo morto al termine del riempimento dell'array, consentendo una scrittura omogenea e continua sul database.

Prima di passare all'analisi dei grafici ottenuti, schematizziamo i dettagli generali delle scelte implementative a livello di codice, che, al solito, rendiamo disponibile nella repository GitHub, dove è disponibile anche lo storico delle precedenti implementazioni, essendo quest'ultima figlia di un lungo processo di *trial and error* volto all'ottenimento di un'analisi il più indicativa possibile.

- all'accensione del sensore seguono dieci secondi di "buffer" in cui si permette all'utente di posizionare e stabilizzare il modulo sul bilanciere.
- terminata questa fase di attesa entrano in esecuzione i due task paralleli sopra descritti
- il primo core si occupa di raccogliere i dati negli array, scartando i valori non plausibili, in quanto è stata riscontrata (molto raramente) un'anomalia sulle letture dei sensori, che a volte registrano dei valori di accelerazione fino a  $80 \text{ m/s}^2$ . I valori scelti come soglie massime nelle tre direzioni spaziali sono stati impostati, in modulo, non superiore a  $17 \text{ m/s}^2$  lungo l'asse verticale, a  $5 \text{ m/s}^2$  nella direzione parallela al bilanciere, e a  $10 \text{ m/s}^2$  per le accelerazioni orizzontali
- una volta pronto un buffer di dati, il secondo core procede con l'elaborazione, calcolando per ogni misurazione prima il vettore risultante tramite il teorema di Pitagora in tre dimensioni, e successivamente la media tra tutti i vettori così ottenuti. Oltre a questo viene estratto il valore massimo
- sempre il secondo core invia i dati al server con influxdb

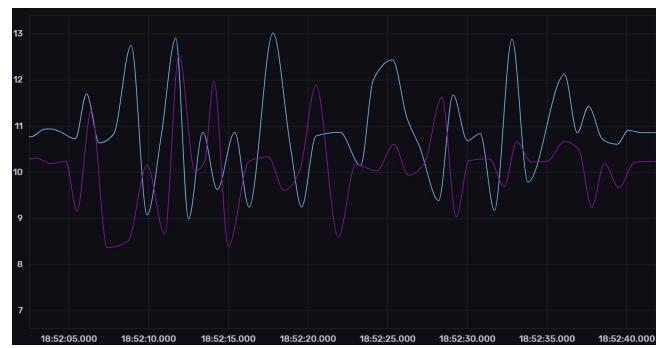
In Figura 17 è mostrato l'andamento delle misurazioni relativo a un allenamento di panca piana completo, come sopra descritto; sull'asse delle ascisse è rappresentato il tempo, mentre sulle ordinate abbiamo l'accelerazione in  $\text{m/s}^2$ . Si può vedere chiaramente come nelle zone "disturbate" del grafico siano intervallate da zone di relativa quiete: le prime indicano i momenti di esecuzione dell'esercizio, mentre le seconde corrispondono alle pause di riposo.



**Figura 17.** esercizio completo

In questa figura si può notare come con il passare del tempo, le curve diventino man mano più sporche e caotiche, come se i dati ottenuti subissero un degrado progressivo.

Ai fini dello studio faremo però riferimento principalmente alle Figure 18 e 19, relative a una sola serie di un esercizio.



**Figura 18.** accelerazione media



**Figura 19.** accelerazione massima

Come è purtroppo evidente, i grafici offrono pochi spunti di analisi. Si registra un andamento delle curve in qualche modo correlabile a un moto di salita e discesa del bilanciere, ma i grafici relativi all'accelerometro destro e sinistro sono troppo disomogenei visto che siamo in presenza di un movimento costante e controllato del bilanciere, che dovrebbe essere testimoniato da due curve pressoché sovrapposte, o al limite di poco scostate lungo l'asse del tempo.

Una riflessione più approfondita su questi risultati verrà riportata nella sezione successiva.

## 5. Risultati dello studio

### 5.1 Risultati delle letture dei dati ambientali

Con la sola lettura dei grafici è già possibile giungere a conclusioni abbastanza accurate rispetto alle performance termiche dell'ambiente, grazie in particolare ad un fattore: nella fase centrale dell'allenamento, avendo come uniche fonti di calore quello generato da chi si allena (stimato in letteratura a 200 Watt, per attività di medio-alta intesità) e dalla stufa elettrica, possiamo posizionare la dispersione del calore nell'ordine dei 3000 Watt.

Con un'analisi più approfondita, e grazie ai dati raccolti dai sensori, siamo stati tuttavia in grado di indagare meglio i singoli fattori che contribuiscono a tale dispersione. Il procedimento dettagliato è fornito al solito nei documenti allegati [2], qui ne mostriamo una sintesi e le conclusioni a cui siamo giunti.

In ultima analisi quello che dobbiamo cercare è condensato nella formula  $P = H\Delta T$ , dove  $P$  è la potenza dispersa media,  $H$  è il coefficiente di scambio termico per trasmissione, e  $\Delta T$  è la differenza di temperatura con l'ambiente verso cui avviene la dispersione. L'ultimo termine ci è fornito dai sensori, mentre  $H$  si ottiene da  $H = UA$ , con  $U$  che è la trasmittanza termica per unità di superficie, valore dipendente dal materiale e noto in letteratura [4], e  $A$  è l'area di dispersione.

In Tabella 2 vediamo i valori ottenuti per l'involucro della palestra (per involucro si intende ciò che delimita il volume di un ambiente, perciò pareti, pavimentazione, finestre, ecc...).

**Tabella 2.** Calcolo del coefficiente di scambio termico

	<b>U</b> ( $W/m^2K$ )	<b>A</b> ( $m^2$ )	<b>H</b> ( $W/K$ )
Finestre a un vetro	6	5,73	34,38
Pareti	1,4	68,16	95,45
Soffitto e pavimento	1,65	50	82,5
Porta	20	30,31	66,2

Sommando i coefficienti così calcolati al coefficiente di scambio termico dovuto alla ventilazione (calcolato in 40,19  $W/K$ ), otteniamo per  $H$  un valore di 318,69  $W/K$ . Una prima conclusione che possiamo trarre è che l'isolamento della stanza dal resto dell'edificio, ottenuto con le due tende fissate con il velcro, comporta sì una grande dispersione di calore, ma comunque molto minore rispetto a quanto ne viene assorbito dagli elementi opachi dell'involucro (pareti, soffitto e pavimento). Questo assorbimento di calore è dovuto alla natura di tali elementi opachi: pessimi conduttori e con grande inerzia termica.

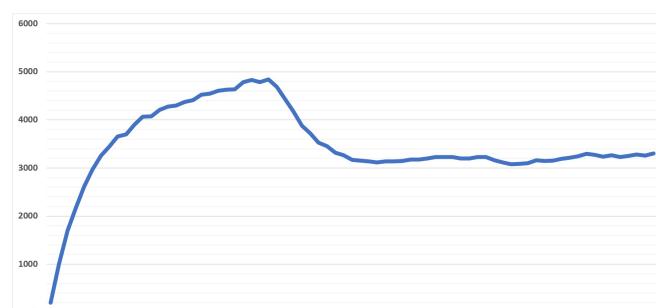
In Figura 20 possiamo infine vedere le istantanee in momenti significativi di diversi allenamenti, con associate le

relative temperature e la potenza dispersa in base alla formula che ripetiamo  $P = H\Delta T$ . Sono stati evidenziati in verde gli orari di accensione del generatore di calore e della stufa elettrica, in arancio e rosso rispettivamente i momenti di spegnimento del generatore e della stufa.

TIMESTAMP	T. ESTERNA	T. INTERNA	P. DISPERSA MEDIA
14/02/2022 17:52	7,7	7,8	
14/02/2022 18:08	7,5	17,1	3059,4
14/02/2022 18:30	6,8	12,6	1848,4
14/02/2022 18:50	6,9	12,9	1912,1
14/02/2022 19:12	7,0	11,4	1402,2
14/02/2022 21:00		8,9	
16/02/2022 18:04	7,8	8,2	
16/02/2022 18:20	5,8	18,9	4174,8
16/02/2022 18:37	5,6	21,3	5003,4
16/02/2022 19:05	5,0	15,0	3186,9
16/02/2022 19:34	4,7	15,1	3314,4
16/02/2022 19:54	4,6	12,7	2581,4
21/02/2022 17:55	13,4	11,8	
21/02/2022 18:08	12,4	19,2	2167,1
21/02/2022 18:30	11,0	16,2	1657,2
21/02/2022 19:01	10,6	16,1	1752,8
21/02/2022 19:27	11,2	16,6	1720,9
21/02/2022 19:37	11,1	15,3	1338,5
23/02/2022 18:38	12,0	10,8	
23/02/2022 18:59	12,0	20,3	2645,1
23/02/2022 19:20	11,8	15,3	1115,4
23/02/2022 20:00	11,9	13,8	605,5
23/02/2022 21:00	11,8	11,6	-63,7
03/03/2022 18:13	9,2	7,4	
03/03/2022 18:35	6,9	17,9	3505,6
03/03/2022 18:59	5,9	13,7	2485,8
03/03/2022 19:33	5,8	13,6	2485,8
03/03/2022 20:30	5,5	9,4	1242,9

**Figura 20.** Potenza dispersa in Watt

In Figura 21 riportiamo uno sguardo approfondito sul singolo allenamento del 16 febbraio, giornata con una temperatura esterna particolarmente rigida, con l'andamento della potenza dispersa nel tempo.



**Figura 21.** Potenza dispersa durante un allenamento

La proporzionalità diretta tra la potenza dispersa e l'escursione termica tra la stanza e l'esterno, testimonia come sia corretto spegnere il generatore GPL dopo pochi minuti dalla sua accensione, in quanto la percentuale di calore disperso diventa sempre maggiore con l'aumento della temperatura interna.

## 5.2 Risultati delle letture degli accelerometri

Nel paragrafo 4 si evince come purtroppo i dati ottenuti dai due moduli con gli accelerometri non consentano nessun tipo di analisi in termini di esecuzione dell'esercizio.

Il lungo processo di continue modifiche al codice e di vero e proprio *trial and error*, ci ha consentito tuttavia di individuare con chiarezza i punti sui quali intervenire.

Il primo problema da risolvere è quello delle rotazioni del bilanciere: per quanto i bilancieri olimpionici siano costruiti per essere il più giroscopicamente stabili possibile, delle rotazioni possono comunque avvenire, andando a modificare il valore dell'accelerazione misurata.

Essendo tuttavia un problema di natura prettamente geometrica, si può risolvere essenzialmente in due modi: o cambiando la progettazione delle scatole, facendo sì che l'accelerometro si trovi il più possibile vicino al centro di rotazione (se non addirittura lungo esso), o intervenendo a livello di codice, catturando con il modulo MPU-6050 non più solamente le accelerazioni lungo le tre dimensioni spaziali, ma anche le rotazioni, potendo così perfezionare il dato registrato con semplici correzioni matematiche.

In seconda istanza sarà da affrontarsi il problema del degradarsi della qualità delle letture nel tempo, ben rappresentato in Figura 17. L'indagine in tal senso è più ostica: un fattore che ingenuamente potrebbe esserne causa è il surriscaldamento del modulo ESP32, che man mano risulta meno affidabile negli invii dei dati tramite WiFi, visto che si trova compresso tra la plastica della scatola, il sensore, la batteria, e un supporto di gommapiuma. Riteniamo poco plausibile che sia questa la causa, ma è bene indagare se ci sia correlazione tra tale degrado e l'aumento di temperatura del sensore, e anche in questo caso ci viene in aiuto l'MPU-6050, che essendo dotato anche di un termometro interno, può fornirci anche tale informazione.

Si faccia infine riferimento alla Figura 22, in cui è raffigurato il grafico delle accelerazioni registrate ai capi del bilanciere a seguito di una sollecitazione casuale.



**Figura 22.** Scostamento temporale

Quello che possiamo dedurne è di fatto il problema principale di questa analisi: tra i dati inviati dai due moduli si registra uno scostamento temporale, per di più casuale, che non dovrebbe essere presente. L'analisi accurata delle esportazioni dal database influxdb, che nuovamente lasciamo in

allegato, lo testimoniano chiaramente.

Fortunatamente è possibile affrontare tale problematica con varie tecniche, delle quali segnaliamo l'assegnazione del *timestamp* ai valori delle accelerazioni non più dal server remoto, ma direttamente dai microcontrollori. Le ESP32 tuttavia non hanno un orologio interno (oltre al RTC, che però è inutile ai fini della sincronizzazione), sarà dunque necessario implementare un meccanismo per ottenerne, e soprattutto mantenere, la sincronia tra le letture dei due moduli.

## 6. Sviluppi futuri

Riteniamo lo studio dei dati ambientali soddisfacente e esauritivo, per quanto sarebbe di indubbio interesse approfondire lo studio dei composti organici nell'aria in relazione al metabolismo del soggetto.

È tuttavia agli sviluppi degli accelerometri che intendiamo dedicare le ricerche future, in quanto vediamo in questi delle buone potenzialità, sia a livello commerciale, che di ricerca ai fini della biomeccanica del movimento, branca delle scienze motorie sempre più coadiuvata dalle moderne tecnologie. Segnaliamo in particolare la possibilità di includere un modello di *Machine learning* per l'*anomaly detection* nell'esecuzione dell'esercizio.

Inoltre, una volta ottenuto un prototipo funzionante nel caso specifico delle distensioni su panca piana, questo sarà adattabile ad ogni esercizio che coinvolga il sollevamento di un bilanciere.

## Riferimenti bibliografici

- [1] *Allegati consultabili*. URL: [https://github.com/SinergiaDeveloper1/IOT\\_Gym4.0/tree/master/Relazione/Allegati](https://github.com/SinergiaDeveloper1/IOT_Gym4.0/tree/master/Relazione/Allegati).
- [2] *Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana*. URL: [https://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure\\_until2012/IT\\_TABULA\\_TypologyBrochure\\_POLITO\\_2011.pdf](https://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure_until2012/IT_TABULA_TypologyBrochure_POLITO_2011.pdf).
- [3] *Repository dell'intero progetto*. URL: [https://github.com/SinergiaDeveloper1/IOT\\_Gym4.0](https://github.com/SinergiaDeveloper1/IOT_Gym4.0).
- [4] *Tabella trasmittanza termica*. URL: <https://www.ingdemurtas.it/tabelle/>.