

4.0 Gym Prototype

Luca Cinti^{1*}, Emanuele Lattanzi²

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 — Gym Metrics

¹Laurea Magistrale in Informatica Applicata, Università degli Studi di Urbino Carlo Bo, Urbino, Italia

²Docente 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 eCO₂ 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'arcata 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.

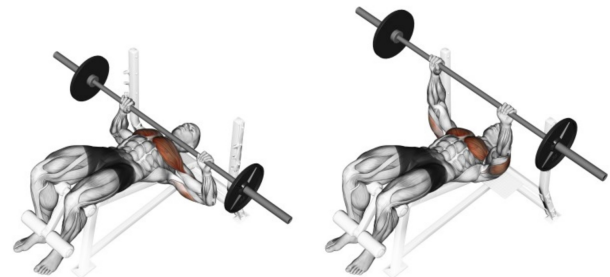


Figura 1. distensioni su panca piana



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.

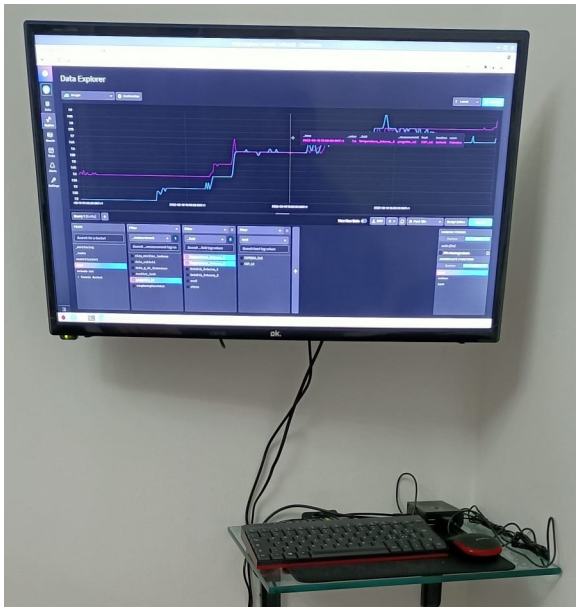


Figura 3. Raspberry e monitor

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 eCO₂ 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 nella tabella che segue.

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:

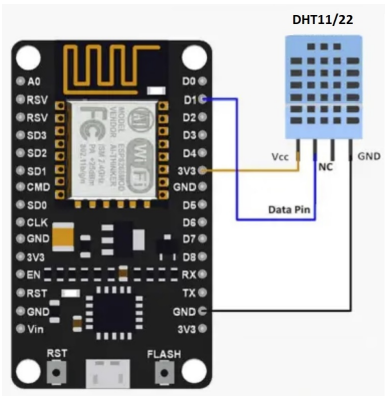


Figura 4. ESP8266 - DHT11/22

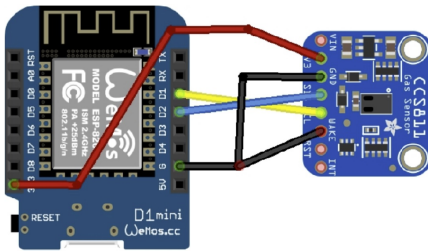


Figura 5. ESP8266 - CCS811

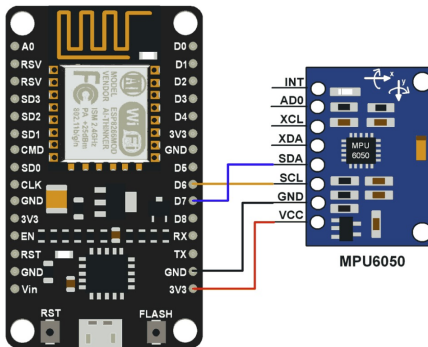


Figura 6. ESP32 - MPU-6050

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 tuttosommato 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).



Figura 7. Termoventilatore GPL

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 eCO₂ 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 dati dalla presenza di CO₂, o da composti organici equivalenti capaci di dare quel tipo di letture. È una sottigliezza ininfluyente 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 estrapolarle 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 con 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.

Innanzitutto è necessario chiarire l'obiettivo dell'analisi, ovvero cercare di registrare se, nell'esecuzione di un qualsiasi esercizio che coinvolga 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.

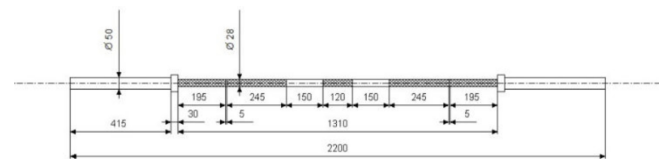


Figura 10. Misure bilanciere olimpico

Prima di passare alla raccolta e analisi dei dati ci è doveroso aggiungere che tutti i microcontrollori sono stati programmati tramite Arduino. Eventuali particolarità o dettagli specifici di implementazione saranno affrontati in fase di analisi dei dati.

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

3. Raccolta dati

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.

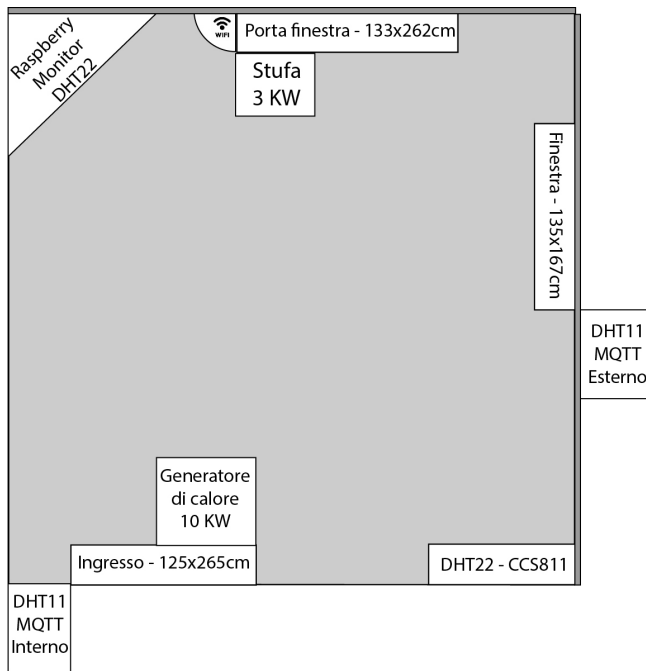


Figura 11. Pianta della palestra. Non in scala

Come protocollo di comunicazione si è scelto MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), particolarmente meno energivoro del classico WiFi, con il Raspberry Pi 4, come precedentemente detto, 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 decuplicata, passando da circa cinque ore a oltre due giorni.

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

4. 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, oltre ad essere consultabili direttamente sul server influxdb.

Passiamo ora vedere i dati raccolti, relativi 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



Figura 12. Sensore DHT11 fuori dall'ingresso della palestra

tabella in Figura 16.



Figura 13. Temperatura in gradi Celsius



Figura 14. Umidità in percentuale

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

4.1 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



Figura 15. eCO₂ in ppm e eTVOC in ppb

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

- 19:30 e 19:01, 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, come era intuibile, 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, si nota chiaramente una 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 eguagliato 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 CO₂ 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 sono da registrarsi due fattori: da un lato lo spegnimento della stufa causa l'ovvio abbassamento della temperatura interna e la sua convergenza verso un unico valore; dall'altro vediamo un difficilmente spiegabile aumento sia dell'umidità che di CO₂ e TVOC. Questi sono invece dovuti alla natura dell'allenamento svolto, che prevedeva una forte componente aerobica sul finale, ben testimoniata dai grafici riportati.

4.2 Analisi delle accelerazioni

A differenza del paragrafo precedente, per quanto riguarda gli accelerometri i grafici verranno analizzati singolarmente, in quanto ognuno, pur facendo riferimento alla stessa tipologia di esercizio, eseguito nel modo più controllato possibile, è specchio di differenti implementazioni a livello di codice, ogni volta alla ricerca di maggior pulizia e indicatività nei dati raccolti.

Ogni esercizio 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).

Prima di passare all'analisi di grafici, schematizziamo i dettagli generali della prima implementazione, evidenziandone in seguito solo le modifiche sostanziali. Il codice completo e la sua storia, al solito, è disponibile nella repository GitHub.

- All'accensione del sensore seguono dieci secondi di "buffer" in cui si permetteva all'utente di posizionare e stabilizzare il modulo. Terminata questa fase di attesa, veniva effettuata la tara sull'accelerazione, e la sua normalizzazione attorno allo zero (semplicemente veniva sottratta lungo l'asse verticale, l'accelerazione di gravità).
- il sensore entra nel ciclo While-Loop, all'interno del quale, ogni centesimo di secondo, vengono raccolte le accelerazioni lungo i tre assi cartesiani e inserite in tre rispettivi array, dimensionati in modo da contenere 40 misurazioni.
- Una volta riempiti i buffer, il sensore procede a calcolare la media delle accelerazioni lungo i tre assi, per poi sommare tali medie vettorialmente, tramite il teorema di Pitagora in tre dimensioni.
- Invio del dato al server con influxdb.

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.

Si nota subito che 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.

Si è scelto dunque di aggregare le letture nel loro valore medio, a partire dagli array sopra descritti, dimensionati tramite una stima, in modo tale da rendere il tempo di elaborazione e invio a database non in grado di sporcare eccessivamente il dato.



Figura 17. 21 febbraio 2022, prima implementazione

Con riferimento alla Figura 17, analizziamo questa lettura della prima implementazione.

Sull'asse delle ascisse è rappresentato il tempo, mentre sulle ordinate abbiamo l'accelerazione in m/s^2 . Il grafico può essere diviso in due parti da quel picco attorno alle 19 e 11, registrato da entrambi gli accelerometri, seguito dalla loro momentanea disconnessione, fino alle 19 e 15. Le curve successive, e vedremo che questo sarà un problema ricorrente che tratteremo nelle conclusioni, presentano un andamento caotico e di difficile interpretazione.

La prima parte del grafico tuttavia mostra chiaramente tre serie di allenamento (zone "disturbate" del grafico), intervallate dai detti 90 secondi di pausa in cui entrambe le accelerazioni destra e sinistra rimangono costanti. Da un lato è positivo il fatto che gli accelerometri scrivano correttamente le proprie letture, ma i dati relativi alla singola esecuzione, così come della serie intera, non offrono un andamento tale da trarre conclusioni o analisi.

Passiamo dunque al grafico della seconda implementazione, nell'immagine che segue in Figura 18.



Figura 18. 3 marzo 2022, seconda implementazione



Figura 19. Umidità in percentuale



Figura 20. eCO₂ in ppm e eTVOC in ppb

5. Analisi dei dati

5.0.1 Subsubsection

6. Conclusioni

Riferimenti bibliografici