

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN BIOINGEGNERIA

Progettazione e sviluppo di uno stadiometro digitale portatile per la stima del grado di malnutrizione infantile nei paesi a basso reddito

Relatore

Bonaldo Stefano

Correlatore

Prof. Paccagnella Alessandro

Laureando

Carraro Giacomo

Matr. 2089954

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Data di laurea 14/07/2026

Abstract

La malnutrizione rappresenta una delle sfide più importanti a livello globale e in particolar modo nei paesi a basso e medio reddito, dove il problema della denutrizione nel 2018 ha colpito circa 200 milioni di bambini ed è responsabile del 45% dei decessi dei bambini con età inferiore ai 5 anni. Sia la malnutrizione acuta che quella cronica sono caratterizzate da un basso rapporto peso/altezza e per diagnosticarle ci sono alcuni indici come, ad esempio, gli indici HAZ (altezza per età), WHZ (peso per altezza) e il MUAC (Mid-Upper Arm Circumference). I primi due indici necessitano della misura dell'altezza e a tal fine ho deciso di collaborare con la ONG "Medici con l'Africa CUAMM" per realizzare un dispositivo elettronico in grado di raccogliere facilmente questo dato.

Il dispositivo si poggia sulla testa del paziente e ne misura l'altezza tramite un sensore posto sulla base. Un PCB con un microcontrollore gestisce il dato, lo visualizza su uno schermo LCD e lo invia a uno smartphone tramite Bluetooth.

Lo scopo della tesi è migliorare il prototipo precedente in modo che possa funzionare anche sotto l'esposizione del sole. Per fare questo, sono stati prima selezionati nuovi sensori TOF con prestazioni migliori e più robusti sotto al sole. Sono poi stati analizzati e testati in diverse condizioni al fine di accertarsi che potessero essere una buona soluzione per il mio progetto.

È stato anche ridisegnato lo schematico e il PCB con l'obiettivo di integrare un microcontrollore STM32, più performante e industrialmente più maturo rispetto ad Arduino Nano. È stato integrato anche un circuito migliore per la gestione della carica della batteria, al fine di migliorare la durata della batteria, portando l'autonomia di utilizzo fino a una giornata intera. Infine, è stato anche aggiornato il modulo Bluetooth per la trasmissione dei dati a un dispositivo mobile.

Il firmware è stato completamente riscritto integrando tutti i risultati e i modelli ottenuti dalle analisi fatte sui sensori, ed è stato ottimizzato affinché sia il meno energivoro possibile.

Indice

1. Introduzione	1
2. Malnutrizione infantile	3
2.1. Malnutrizione acuta	4
2.2. Malnutrizione cronica	7
3. Metodi di diagnosi della malnutrizione	9
3.1. Stadiometro tradizionale	9
3.2. Stadiometro digitale	12
3.2.1. Necessità per il nuovo prototipo	12
4. Analisi delle performance del sensore	14
4.1. Sensore TOF	14
4.2. Selezione del sensore	18
4.3. Descrizione dell'acquisizione dei dati	21
4.4. Studio delle performance del sensore VL53L5CX	26
4.4.1. Influenza della luce ambientale sulle misure	26
4.5. Studio delle performance del sensore VL53L8	29
4.5.1. Influenza della luce ambientale sulle misure	31
4.5.2. Influenza dell'inclinazione del sensore sulle misure	35
4.5.3. Influenza della frequenza di campionamento del sensore sulle misure	39
4.5.4. Analisi del filtro digitale utilizzato	46
4.5.5. Curve di calibrazione	57
4.5.6. Prestazioni medie nel tempo	62
4.6. Considerazioni finali	65
5. Sviluppo del prototipo	67
5.1. Schematico e hardware	67
5.1.1. Microcontrollore	74
5.1.2. BLE	80

5.1.3. Batteria	86
5.2. PCB	89
5.2.1. Power layer	90
5.2.2. Ground layer	91
5.2.3. Layer superiore	92
5.2.4. Layer inferiore	93
5.3. Firmware	95
5.3.1. Interfacce software	95
5.3.2. Logica principale	99
5.4. Test finale della scheda	106
5.5. Chassis	109
6. Validazione e test	111
7. Conclusioni	121

Indice delle Figure

Figura 1. Logo CUAMM	1
Figura 2. Tabella WHZ semplificata per ragazzi di fino ai 5 anni di età	5
Figura 3. Rapporto di probabilità di mortalità in base al rapporto peso-altezza	6
Figura 4. Tabella HAZ semplificata per ragazzi di età compresa tra i 2 e i 5 anni	8
Figura 5. Stadiometro tradizionale	9
Figura 6. cursore di uno stadiometro	9
Figura 7. Piano di Francoforte	11
Figura 8. Principio di funzionamento dei sensori TOF	15
Figura 9. TOF 3D	16
Figura 10. Involucro tipico di un sensore VL53Lxx	17
Figura 11. FOV dei sensori VL53L5CX e VL53L8	18
Figura 12. Mappatura delle zone in modalità 8x8	19
Figura 13. Supporto telescopico	22
Figura 14. Supporto rotante per i sensori	23
Figura 15. Distanze in modalità 8x8 acquisite all'interno (VL53L5CX)	26
Figura 16. Distanze in modalità 8x8 acquisite sotto al sole (VL53L5CX)	27
Figura 17. Test del sensore VL53L5CX sotto al sole	29
Figura 18. Test del sensore VL53L8 sotto al sole	30
Figura 19. Distanze in modalità 8x8 acquisite sotto all'ombra (VL53L8)	32
Figura 20. Distanze in modalità 8x8 acquisite sotto al sole (VL53L8)	33
Figura 21. Distanze - Confronto delle inclinazioni a quota di 1000 mm (VL53L8)	36
Figura 22. Media delle distanze - Confronto delle inclinazioni a quota di 1000 mm (VL53L8)	36
Figura 23. Deviazione standard - Confronto delle inclinazioni a quota di 1000 mm (VL53L8)	37

Figura 24. Effetto dell'inclinazione sulla mappa di profondità acquisita dal VL53L8	38
Figura 25. Distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza all'ombra (VL53L8)	39
Figura 26. Media delle distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza all'ombra (VL53L8)	40
Figura 27. Deviazione standard - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza all'ombra (VL53L8)	41
Figura 28. Distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza al sole (VL53L8)	42
Figura 29. Media delle distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza al sole (VL53L8)	43
Figura 30. Deviazione standard - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza al sole (VL53L8)	44
Figura 31. Stato delle acquisizioni del sensore VL53L8	47
Figura 32. Numero di occorrenze degli stati 0 e 6 in ogni zona del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole	48
Figura 33. Numero di occorrenze degli stati 0 e 6 in ogni zona del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole	48
Figura 34. Numero di occorrenze dello stato 10 in ogni zona del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole	48
Figura 35. Numero di occorrenze dello stato 10 in ogni zona del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole	48
Figura 36. Numero di occorrenze degli stati errati in ogni zona del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole	49
Figura 37. Numero di occorrenze degli stati errati in ogni zona del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole	49
Figura 38. Applicazione del filtro sulle zone del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole	50
Figura 39. Confronto delle medie senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 4x4	51

Figura 40. Confronto delle standard deviation senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 4x4	52
Figura 41. Applicazione del filtro sulle zone del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole	53
Figura 42. Confronto delle medie senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 8x8	54
Figura 43. Confronto delle standard deviation senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 8x8	55
Figura 44. Ratio vs. Inclinazioni reali in configurazione 4x4 all'ombra	57
Figura 45. Ratio vs. Inclinazioni reali in configurazione 4x4 al sole	58
Figura 46. Retta di calibrazione delle inclinazioni	59
Figura 47. Retta di calibrazione delle altezze	60
Figura 48. Andamenti delle medie, delle deviazioni standard e degli errori standard nel tempo all'ombra	62
Figura 49. Andamenti delle medie, delle deviazioni standard e degli errori standard nel tempo al sole	63
Figura 50. Schema a blocchi del dispositivo	67
Figura 51. Connettore USB tipo C	68
Figura 52. BQ24075	69
Figura 53. TPS63001	70
Figura 54. MIC2039 SOT-23-6 (M6)	71
Figura 55. ST7789 display Adafruit	72
Figura 56. STC3100	73
Figura 57. Nucleo STM32F446RE	74
Figura 58. STM32F446RE pinout	75
Figura 59. Comunicazione UART	77
Figura 60. Comunicazione I ² C	78
Figura 61. Comunicazione SPI	79
Figura 62. Architettura del protocollo BLE	81

Figura 63. Struttura GATT	84
Figura 64. Power layer del PCB	90
Figura 65. Ground layer del PCB	91
Figura 66. Vie e piste del layer superiore del PCB	92
Figura 67. Render 3D del layer superiore	92
Figura 68. Vie e piste del layer inferiore del PCB	94
Figura 69. Render 3D del layer inferiore	94
Figura 70. Interfaccia di STM32CubeIDE	95
Figura 71. Interfaccia di puTTY	96
Figura 72. Interfaccia di KiCad	98
Figura 73. Configurazione dei pin del microcontrollore	100
Figura 74. Diagramma di flusso del firmware	101
Figura 75. Diagramma di flusso della funzione getResultMeasures	103
Figura 76. Visualizzazione delle misure in tempo reale sul display	104
Figura 77. Visualizzazione del risultato sul display	105
Figura 78. Collegamenti per il caricamento del firmware del BLE sulla scheda	106
Figura 79. Collegamenti per il caricamento del firmware dello strumento sulla scheda	107
Figura 80. Scocca dello stadiometro	109
Figura 81. Altezze acquisite all'interno e all'esterno all'ombra dallo stadiometro	116
Figura 82. Altezze acquisite all'esterno sotto al sole dallo stadiometro	120

1. Introduzione

Il Cuamm (Collegio Universitario Aspiranti e Medici Missionari) venne fondato a Padova nel 1950 dal professor Francesco Canova e dal vescovo Girolamo Bartolomeo Bortignon, con lo scopo di formare medici da inviare nei Paesi in via di sviluppo.



Figura 1. Logo CUAMM

I primi partirono nel 1954 e in questo primo decennio vennero inviati una cinquantina di medici verso 15 paesi, di cui 10 africani (Congo, Ghana, Kenya, Libia, Marocco, Nigeria, Somalia, Swaziland, Tanganika e Uganda). In seguito, sotto la gestione di Don Luigi Mazzucato (dal 1955 al 2008) e poi di Don Dante Carraro (dal 2008), l'organizzazione crebbe sempre più fino al diventare una delle prime ONG riconosciute in Italia per la promozione e la tutela della salute delle popolazioni africane. Nel 2002 l'organizzazione decise di assumere ufficialmente il nome di Medici con l'Africa Cuamm, per sottolineare che il proprio impegno non è "per", ma "con" l'Africa.

Fino ad oggi sono state inviate circa 1600 persone in 41 paesi, soprattutto in Africa, portando insieme ai medici e agli infermieri locali cure e servizi negli ospedali, nei distretti, nelle scuole e nelle università.

Attualmente l'organizzazione interviene in nove paesi (Angola, Etiopia, Mozambico, Repubblica Centrafricana, Sierra Leone, Sud Sudan, Tanzania, Costa d'Avorio e Uganda), prestando particolare attenzione alla salute materna, neonatale, infantile e adolescenziale, al fine di garantire l'accesso all'assistenza qualificata al parto e alle emergenze ostetriche e di ridurre la mortalità e la morbosità materna, fetale e neonatale.

L'organizzazione interviene inoltre contro le malattie infettive (HIV/AIDS, tubercolosi e malaria) e croniche, tra cui il diabete, l'ipertensione e i tumori alla cervice.

Si impegna infine a garantire una buona nutrizione attraverso politiche e programmi nazionali e a gestire i casi di malnutrizione acuta e cronica, problemi ancora molto diffusi in Africa, soprattutto nei periodi di siccità.

Nella presente tesi ci si concentrerà unicamente su quest'ultimo problema, dato che l'obiettivo del lavoro è la realizzazione di uno stadiometro digitale portatile per la misurazione dell'altezza. Grazie a questo strumento, a una bilancia e al MUAC è possibile calcolare gli indici che classificano il tipo e il livello di malnutrizione infantile.

Nel capitolo seguente verranno descritti tutti gli aspetti della malnutrizione, con particolare attenzione alla denutrizione infantile (acuta e cronica): ne verranno illustrate brevemente le cause, gli effetti e gli indici utilizzati per classificarne la tipologia.

Nel capitolo tre verrà presentato lo stato dell'arte dello stadiometro e il prototipo progettato, riassumendo i pregi e i limiti della versione precedentemente sviluppata e le modifiche apportate.

Il capitolo quarto costituisce il primo capitolo corposo: vi si analizzeranno le prestazioni della componente principale dello strumento, ovvero il sensore di prossimità. Dopo una descrizione del principio di funzionamento del sensore TOF e delle motivazioni che hanno portato alla scelta dei sensori VL53L5CX e VL53L8, verranno presentate le analisi condotte per valutarne l'affidabilità e l'idoneità al progetto, esaminando le prestazioni in diversi scenari e condizioni operative.

Il capitolo cinque è l'altro capitolo di maggiore estensione. Vi verranno illustrate tutte le fasi dello sviluppo del prototipo finale: si partirà dall'analisi dello schema elettrico e delle componenti hardware, per poi procedere con la descrizione del PCB (Printed Circuit Board), dell'algoritmo del firmware e delle problematiche riscontrate in fase di test con le relative soluzioni. Il capitolo si concluderà con la presentazione della scocca meccanica dello stadiometro.

Negli ultimi capitoli invece analizzerò tutti i risultati e le eventuali problematiche del prototipo finito.

2. Malnutrizione infantile

La malnutrizione infantile è una delle principali sfide della sanità pubblica nei paesi a basso e medio reddito e, in particolare, nel continente africano, dove incide significativamente sulla mortalità e sullo sviluppo infantile. Basti pensare che nel 2022, a livello globale, si è stimato che circa 149 milioni di bambini con età inferiore ai 5 anni soffrissero di ritardo della crescita, risultando più bassi del normale per la loro età, mentre altri 45 milioni soffrivano di deperimento, risultando troppo magri rispetto alla loro altezza. Questi fenomeni sono associati al decesso di quasi la metà di tali bambini, aggravando ulteriormente la situazione.

Con il termine malnutrizione non si intende esclusivamente il problema della denutrizione: si tratta di un termine più generale che si riferisce sia alla carenza che all'eccesso di nutrienti, allo squilibrio tra i nutrienti essenziali o a un loro utilizzo compromesso. Pertanto, include diverse condizioni, come sovrappeso, obesità e patologie legate all'alimentazione. Tuttavia, nella presente tesi ci si concentrerà sulla malnutrizione derivante da carenze nell'assunzione di nutrienti.

Esistono tre sotto forme di denutrizione: deperimento, ritardo della crescita e sottopeso. La denutrizione rende soprattutto i bambini molto più vulnerabili alle malattie e alla morte.

I bambini con un peso basso rispetto alla loro fascia di età sono definiti **sottopeso**. Un bambino sottopeso può presentare un **ritardo della crescita**, un **deperimento** o **entrambi**.

2.1. Malnutrizione acuta

Il **deperimento**, chiamato anche **malnutrizione acuta**, è definito come un basso rapporto peso-altezza. Indica solitamente una perdita di peso recente e grave, anche se può persistere per un lungo periodo; si verifica quando un individuo non assume cibo a sufficienza e/o contrae malattie infettive, come la diarrea. Tale condizione aumenta il rischio di morte nei bambini se non trattata adeguatamente.

Sebbene i termini deperimento e malnutrizione acuta vengano spesso utilizzati in modo intercambiabile, secondo la Classificazione Internazionale delle Malattie le due definizioni differiscono leggermente.

I neonati e i bambini di età inferiore a 5 anni vengono definiti deperiti se presentano un punteggio z del rapporto peso-altezza (WHZ) inferiore a -2 deviazioni standard (DS) rispetto alla mediana degli standard dell'OMS, oppure se la circonferenza del braccio a metà tra la spalla e il gomito (MUAC) è inferiore a 125 mm.

Il deperimento viene classificato come:

- deperimento grave:
 - se WHZ è inferiore a -3 DS;
 - oppure se il MUAC è inferiore a 115 mm in un bambino tra 6 e 59 mesi di età.
- deperimento moderato:
 - se WHZ è compreso tra -3 DS e -2 DS;
 - oppure se il MUAC è compreso tra 115 mm e 125 mm in un bambino tra 6 e 59 mesi di età.

La malnutrizione acuta viene definito allo stesso modo del deperimento ma, in aggiunta, si valuta la presenza o meno l'edema nutrizionale. L'edema nutrizionale è un edema bilaterale con fovea che insorge dai piedi e può progredire fino alle gambe e al resto del corpo, compreso il viso. Questa piccola differenza risulta cruciale in quanto un bambino potrebbe non risultare deperito anche se presenta una malnutrizione acuta grave, la quale può risultare letale.

La malnutrizione acuta può essere suddivisa in:

- **Malnutrizione acuta grave (SAM)** se:
 - è presente l'edema nutrizionale e/o
 - $WHZ < -3$ DS e/o
 - $MUAC < 115$ mm.
- **Malnutrizione acuta moderata (MAM)** se:
 - $-3 DS \leq WHZ < -2 DS$, e/o
 - $115 \text{ mm} \leq MUAC < 125 \text{ mm}$, e
 - L'edema nutrizionale risulta assente.

I valori di riferimento WHZ sono disponibili sul sito dell'OMS, in tabelle come quella riportata di seguito.

Weight-for-height BOYS 2 to 5 years (z-scores)					 World Health Organization		
cm	-3 SD	-2 SD	-1 SD	Median	1 SD	2 SD	3 SD
65.0	5.9	6.3	6.9	7.4	8.1	8.8	9.6
65.5	6.0	6.4	7.0	7.6	8.2	8.9	9.8
66.0	6.1	6.5	7.1	7.7	8.3	9.1	9.9
66.5	6.1	6.6	7.2	7.8	8.5	9.2	10.1
67.0	6.2	6.7	7.3	7.9	8.6	9.4	10.2
67.5	6.3	6.8	7.4	8.0	8.7	9.5	10.4
68.0	6.4	6.9	7.5	8.1	8.8	9.6	10.5
68.5	6.5	7.0	7.6	8.2	9.0	9.8	10.7
69.0	6.6	7.1	7.7	8.4	9.1	9.9	10.8
69.5	6.7	7.2	7.8	8.5	9.2	10.0	11.0
70.0	6.8	7.3	7.9	8.6	9.3	10.2	11.1
70.5	6.9	7.4	8.0	8.7	9.5	10.3	11.3
71.0	6.9	7.5	8.1	8.8	9.6	10.4	11.4

Figura 2. Tabella WHZ semplificata per ragazzi di fino ai 5 anni di età

È opportuno precisare che il termine "acuto" indica solitamente una condizione che insorge e peggiora rapidamente, in contrapposizione al termine "cronico", riferito a condizioni che si sviluppano o peggiorano nel tempo. In questo contesto, tuttavia, "acuto" non implica che il problema possa o debba essere sempre risolto in tempi brevi. I bambini con MAM non necessitano sempre di cure mediche o nutrizionali urgenti, ma richiedono piuttosto un maggiore supporto sociale, servizi di consulenza e operatori sanitari adeguatamente formati.

Le stime mostrano che i bambini con SAM ($WHZ < -3$ DS) presentano un rischio di morte circa 9 volte superiore rispetto ai bambini con $WHZ > -1$ DS e circa 5 volte superiore rispetto ai bambini con MAM ($-3 \text{ DS} < WHZ < -2 \text{ DS}$).

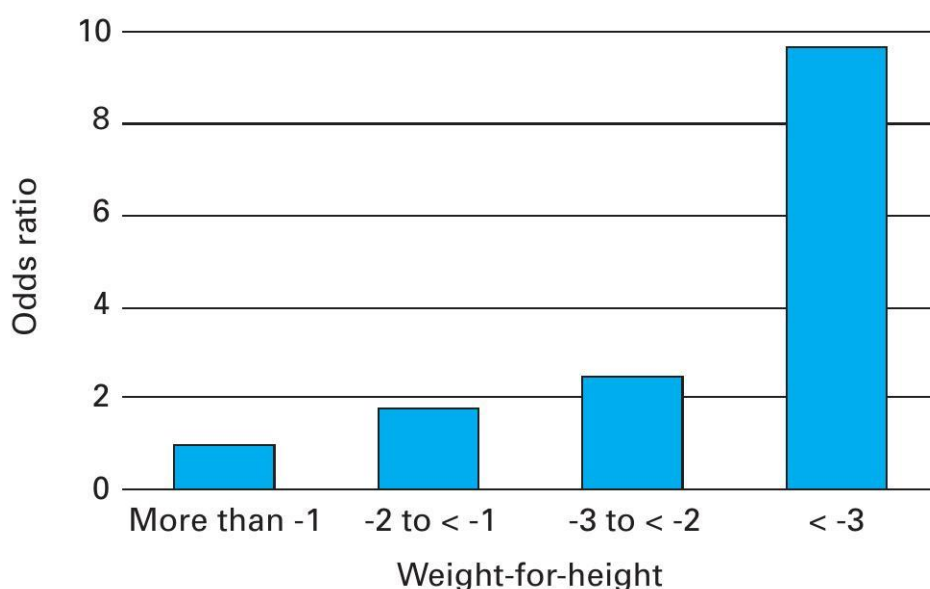


Figura 3. Rapporto di probabilità di mortalità in base al rapporto peso-altezza

2.2. Malnutrizione cronica

L'**arresto della crescita** è definito come bassa statura in rapporto all'età e rappresenta il risultato di una **denutrizione cronica** o ricorrente (in inglese stunting). È solitamente associato a condizioni di povertà, a un cattivo stato di salute e di nutrizione materna, a malattie frequenti e a pratiche di alimentazione e di cura inappropriate nei primi anni di vita. La malnutrizione cronica, oltre a causare il ritardo staturale, compromette lo sviluppo fisico e cognitivo del bambino, riducendo la resistenza alle malattie e limitando la capacità di apprendimento scolastico e la produttività nel lungo termine.

Per la diagnosi di malnutrizione cronica viene utilizzato come indicatore l'indice HAZ (Height-for-Age Z-score), ovvero il punteggio z del rapporto altezza-per-età. Esso misura di quante deviazioni standard l'altezza di un bambino si discosta dalla mediana di una popolazione di riferimento in buono stato di salute della stessa età e dello stesso sesso. La popolazione di riferimento adottata a livello internazionale è quella definita dagli WHO Child Growth Standards (2006), ricavati dallo studio Multicentre Growth Reference Study (MGRS).

La malnutrizione cronica è definita da un rapporto altezza/età inferiore a -2 z-score rispetto agli standard di crescita dell'OMS. In base all'entità dello scostamento, si distinguono due livelli di gravità:

- **Malnutrizione cronica grave** se HAZ è inferiore a -3 DS
- **Malnutrizione cronica moderata** se HAZ compreso tra -3 DS e -2 DS;

I bambini con malnutrizione cronica moderata che non ricevono adeguato supporto nutrizionale possono progredire verso forme più severe e potenzialmente letali. Alcuni studi classificano anche una malnutrizione cronica lieve quando HAZ è minore di -1 ed è utile ai fini epidemiologici per cogliere precocemente tendenze di rallentamento della crescita a livello di popolazione.

I valori di riferimento HAZ con cui confrontare le altezze rilevate sono disponibili sul sito dell'OMS, in tabelle come quella riportata di seguito.

Height-for-age BOYS 2 to 5 years (z-scores)		 World Health Organization						
Year: Month	Months	-3 SD	-2 SD	-1 SD	Median	1 SD	2 SD	3 SD
4: 4	52	92.5	96.9	101.2	105.6	109.9	114.2	118.6
4: 5	53	93.0	97.4	101.7	106.1	110.5	114.9	119.2
4: 6	54	93.4	97.8	102.3	106.7	111.1	115.5	119.9
4: 7	55	93.9	98.3	102.8	107.2	111.7	116.1	120.6
4: 8	56	94.3	98.8	103.3	107.8	112.3	116.7	121.2
4: 9	57	94.7	99.3	103.8	108.3	112.8	117.4	121.9
4:10	58	95.2	99.7	104.3	108.9	113.4	118.0	122.6
4:11	59	95.6	100.2	104.8	109.4	114.0	118.6	123.2
5: 0	60	96.1	100.7	105.3	110.0	114.6	119.2	123.9
WHO Child Growth Standards								

Figura 4. Tabella HAZ semplificata per ragazzi di età compresa tra i 2 e i 5 anni

Un aspetto rilevante per una trattazione rigorosa riguarda il limite intrinseco del cut-off $HAZ < -2$. La soglia utilizzata per definire lo stunting non dispone di una base clinica o biologica univocamente definita. Nei paesi a basso e medio reddito il rallentamento della crescita lineare tende a interessare l'intera popolazione, determinando uno spostamento verso il basso dell'intera distribuzione staturale, tale per cui anche i bambini più alti risultano generalmente al di sotto di quanto sarebbero stati in condizioni ottimali. Poiché la definizione di stunting si basa sulla coda inferiore di tale distribuzione, potrebbe non rappresentare adeguatamente questo fenomeno di popolazione. Per questo motivo, alcuni studi sostengono che il cut-off di -2 DS sia insufficientemente sensibile. La letteratura più recente propone pertanto l'utilizzo complementare della mean HAZ a livello di coorte o di popolazione, indicatore più sensibile nel rilevare tendenze generali di growth faltering anche in assenza di un'elevata prevalenza di stunting conclamato.

3. Metodi di diagnosi della malnutrizione

Come è stato appena descritto, la diagnosi della malnutrizione infantile, sia acuta che cronica, si basa sulla misurazione di parametri antropometrici fondamentali, tra cui il peso corporeo, la statura e la circonferenza del braccio a metà tra la spalla e il gomito (MUAC). Tali misurazioni, confrontate con i valori di riferimento degli standard di crescita dell'OMS, consentono di calcolare gli indici WHZ e HAZ e di classificare il tipo e il livello di malnutrizione del bambino.

Gli strumenti impiegati per la rilevazione di questi parametri devono soddisfare requisiti di accuratezza, robustezza e semplicità d'uso, in quanto vengono spesso utilizzati in contesti a risorse limitate, da operatori sanitari con livelli di formazione eterogeni. La bilancia è lo strumento deputato alla misurazione del peso, mentre il MUAC viene rilevato mediante un semplice nastro metrico graduato. La statura, infine, viene misurata attraverso lo stadiometro, strumento di cui si tratta nel presente capitolo.

3.1. Stadiometro tradizionale



Figura 5. Stadiometro tradizionale



Figura 6. Corsore di uno stadiometro

Lo stadiometro tradizionale è uno strumento di misura molto semplice impiegato per la rilevazione dell'altezza e generalmente è composto da:

- **Un'asta verticale:** è la colonna portante dello strumento e può essere fissata perpendicolarmente al pavimento o alla parete. Su di essa è incisa una scala metrica graduata in centimetri e millimetri, che parte dal basso (con lo zero in corrispondenza della pedana) e sale verso l'alto fino ad altezze superiori ai 2 m nei modelli per adulti.
- **Un'asta mobile (o cursore):** è un braccio rigido orizzontale, perpendicolare all'asta verticale, che può scorrere liberamente lungo di essa. Una volta poggiato sul capo del soggetto, viene bloccato in quella posizione tramite un meccanismo di fissaggio a pressione o a vite, consentendo la lettura del valore indicato sull'asta verticale con tutta calma.
- **La base (o pedana):** è la parte su cui è fissata l'asta verticale. Garantisce la perpendicolarità dell'asta e fornisce una superficie di appoggio piana e uniforme.

Solitamente per ottenere una misurazione affidabile dell'altezza, si segue il seguente protocollo. Per prima cosa, si verifica che lo stadiometro sia posizionato su una superficie piana e stabile. Successivamente si chiede al paziente di rimuovere scarpe, indumenti ingombranti e accessori per capelli e di posizionarsi sulla pedana con i talloni e i malleoli a contatto e le punte dei piedi leggermente divaricate, con un angolo di circa 60 gradi. Le ginocchia non devono essere piegate mentre l'occipite, le scapole, i glutei ed i talloni devono rimanere a contatto con il montante dello stadiometro. Si chiede infine all'individuo di fissare un punto all'orizzonte in modo che la visione sia mantenuta secondo il piano di Francoforte (il piano che passa tra il forame uditivo ed il margine inferiore dell'orbita), il quale deve essere parallelo al pavimento. questo punto si può procedere con la rilevazione della misura.

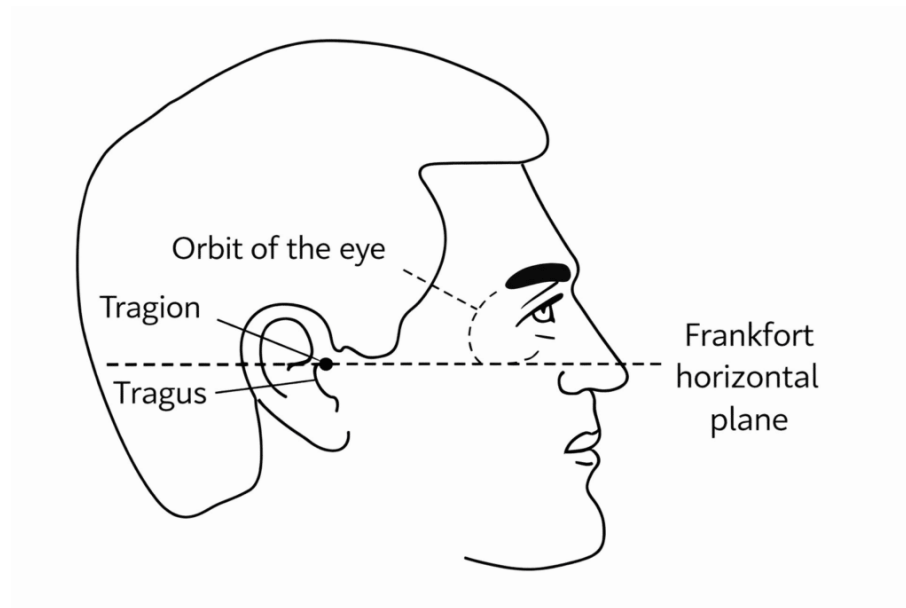


Figura 7. Piano di Francoforte

Nonostante la sua semplicità costruttiva, lo stadiometro tradizionale trova impiego in numerosi contesti clinici: ambulatori medici, studi di medicina generale e sportiva, reparti pediatrici e studi di nutrizione e dietologia per la valutazione antropometrica e dello stato nutrizionale del paziente.

3.2. Stadiometro digitale

Accanto alle versioni tradizionali esistono stadiometri portatili, concepiti per il monitoraggio antropometrico sul campo da parte di organizzazioni come il CUAMM. Alcuni di essi replicano la struttura classica adottando materiali più leggeri e meno rigidi, come il seca 217; altri si presentano in formato digitale e con dimensioni nettamente ridotte, come l'HM250U, che impiega un sensore a ultrasuoni e un sensore di tipo G per la misurazione della statura.

In questo contesto si inserisce il prototipo sviluppato in precedenza dallo studente Federico Dal Lago, con l'obiettivo di realizzare uno stadiometro digitale, compatto e a basso costo, adatto all'utilizzo sul campo da parte degli operatori del CUAMM. Il dispositivo impiegava un sensore TOF 10120 per l'acquisizione della distanza e un sensore MPU6050, con funzione combinata di giroscopio e accelerometro, per rilevare l'inclinazione dello strumento e garantire un corretto posizionamento durante la misurazione. Era inoltre dotato di un modulo Bluetooth per la trasmissione del risultato a uno smartphone. L'elaborazione dei dati e la gestione delle periferiche erano affidate a un microcontrollore Arduino Nano, basato su ATmega328. A causa delle limitate risorse di memoria Flash e SRAM di tale microcontrollore, era stato necessario integrare un secondo dispositivo dello stesso tipo per consentire il salvataggio della misura su memoria SD, con l'associazione di data e ora della rilevazione.

3.2.1. Necessità per il nuovo prototipo

L'ultima versione dello stadiometro precedente era stata testata in Uganda da personale medico qualificato e non qualificato; tuttavia, erano emerse alcune limitazioni che ne hanno reso necessario l'aggiornamento.

Le prime criticità riguardavano il sensore TOF, il quale non consentiva l'acquisizione dell'altezza in presenza di intense fonti luminose e richiedeva un posizionamento tale che la distanza misurata dal suolo fosse il più possibile perpendicolare. Di conseguenza, l'operatore non poteva effettuare misurazioni all'aperto e, prima di ciascuna rilevazione, era tenuto a orientare correttamente lo strumento.

Un'ulteriore problematica riguardava la durata insufficiente della batteria durante le fasi di standby.

L'obiettivo della presente tesi è lo sviluppo di una nuova versione dello stadiometro basata su un microcontrollore più potente e professionale, l'STM32F446RE, in sostituzione della soluzione precedente che richiedeva l'impiego di due microcontrollori Arduino, e la risoluzione delle criticità sopra descritte, in particolare quelle legate al sensore. A tal fine, sono state condotte ricerche per l'individuazione di alternative più idonee e, una volta identificati i possibili sostituti, sono state eseguite le analisi necessarie a verificarne l'idoneità per gli scopi del progetto. È stato inoltre deciso di eliminare lo slot per la memoria SD, non strettamente necessario, mentre il modulo BLE è stato sostituito con una versione più recente e meglio integrabile con il nuovo microcontrollore. Particolare attenzione è stata dedicata alla gestione dei consumi energetici, con l'obiettivo di garantire un'autonomia in standby di diversi giorni.

4. Analisi delle performance del sensore

La scelta e la caratterizzazione del sensore di misura rappresentano il fulcro dell'intero progetto, in quanto le prestazioni dello stadiometro dipendono in misura determinante dall'affidabilità e dall'accuratezza del sensore impiegato per la rilevazione della distanza. Un sensore inadeguato, come evidenziato dalle limitazioni del prototipo precedente, compromette l'utilizzabilità dello strumento sul campo, indipendentemente dalla qualità delle restanti componenti hardware e software.

Il presente capitolo illustra il percorso che ha portato alla selezione dei sensori TOF VL53L5CX e VL53L8CX e ne analizza le prestazioni in modo sistematico. Si parte da una descrizione del principio di funzionamento della tecnologia TOF e dalle motivazioni che ne hanno determinato la scelta rispetto ad alternative quali i sensori a ultrasuoni. Vengono quindi descritte la struttura dei dati acquisiti e le modalità di acquisizione, per poi procedere con l'analisi sperimentale dei due sensori. Quest'ultima comprende la valutazione del comportamento in presenza di luce solare diretta, la determinazione della frequenza di campionamento ottimale, l'effetto dell'inclinazione del sensore sull'acquisizione dei dati, la scelta del filtro digitale più appropriato, il confronto tra le configurazioni a 4×4 e 8×8 zone, la definizione delle curve di calibrazione in funzione dell'inclinazione e dell'altezza misurata, e infine lo studio dell'andamento dell'errore standard nel tempo, al fine di determinare i tempi minimi necessari per l'acquisizione di un risultato stabile e affidabile.

4.1. Sensore TOF

Tra le tecnologie di sensoristica per la misura della distanza e la ricostruzione tridimensionale dell'ambiente, i sensori Time of Flight (TOF) hanno assunto negli ultimi anni un ruolo di crescente rilevanza, grazie alla loro capacità di fornire misure accurate, veloci e compatte in un'ampia varietà di contesti applicativi. Il presente capitolo ne illustra il principio fisico, l'architettura hardware e le modalità di integrazione in sistemi embedded basati su microcontrollore.

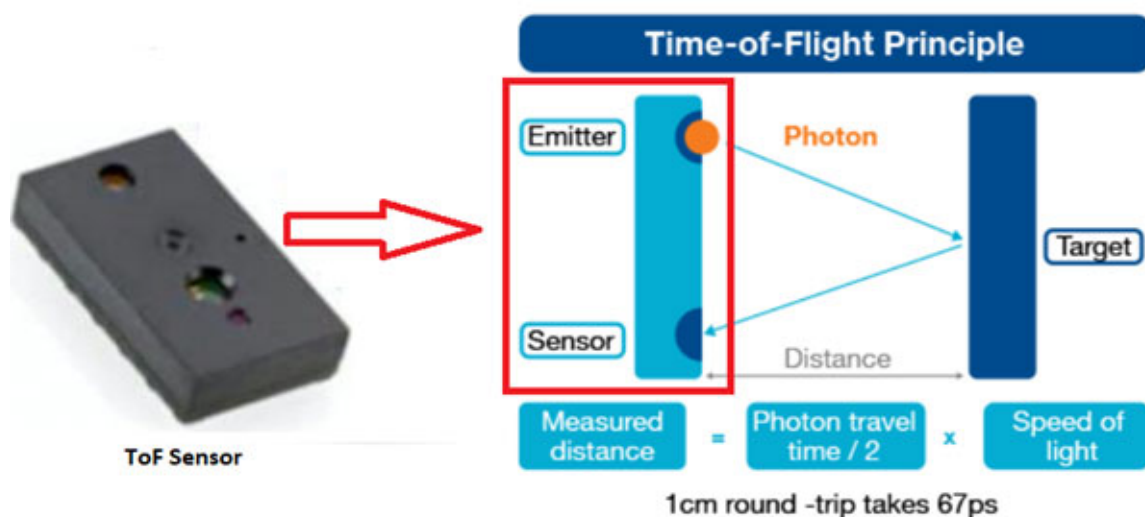


Figura 8. Principio di funzionamento dei sensori TOF

Il funzionamento di un sensore TOF si fonda su un principio di natura elettromagnetica di immediata comprensione: la distanza da un oggetto può essere determinata misurando il tempo necessario affinché un segnale luminoso, emesso dalla sorgente, raggiunga la superficie target e torni al rilevatore. Applicando la relazione fondamentale:

$$d = (c \cdot t) / 2$$

dove c rappresenta la velocità della luce nel mezzo di propagazione e t il tempo di volo totale, è possibile risalire alla distanza con una risoluzione che, nei dispositivi di fascia alta, raggiunge il millimetro o il sotto-millimetro. La semplicità apparente di questo principio cela, tuttavia, una notevole complessità realizzativa: la velocità della luce impone la misura di intervalli temporali dell'ordine dei nanosecondi o dei picosecondi, richiedendo circuiti di timing ad altissima precisione.

Dal punto di vista architetturale, un sensore TOF è composto da una sorgente di emissione (tipicamente un laser VCSEL o un LED infrarosso nell'intorno degli 850-940 nm), da un sistema ottico di trasmissione e ricezione, da un rilevatore fotosensibile e da un'unità di elaborazione digitale. Il tipo di rilevatore più diffuso nelle implementazioni moderne è lo SPAD (Single Photon Avalanche Diode), un fotodiodo polarizzato in regime di breakdown controllato, in grado di convertire l'arrivo di un singolo fotone in un impulso elettrico rilevabile. Questa sensibilità estrema consente di operare anche in condizioni di bassa riflettività o elevata distanza, al costo di una maggiore complessità nella gestione del rumore e delle correlazioni

spurie. Esistono anche i sensori matriciali (TOF 3D), in cui gli SPAD sono organizzati in array bidimensionali per ricostruire una mappa di profondità dell'intera scena.

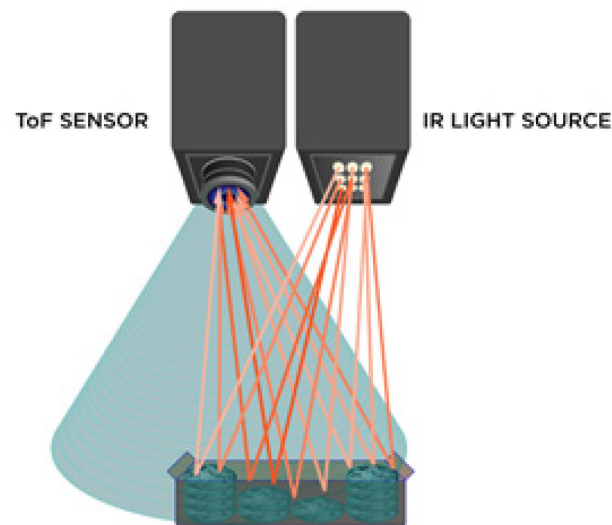


Figura 9. TOF 3D

Le modalità di misura si dividono in due grandi famiglie. Nella tecnica a tempo diretto (dTOF, Direct Time of Flight), il sistema emette impulsi luminosi brevissimi e misura, tramite un convertitore tempo-digitale (TDC), l'istante di ricezione del fotone riflesso. L'accumulo statistico di molti eventi di rilevamento consente di costruire un istogramma temporale dal quale estrarre il picco corrispondente alla riflessione sull'oggetto bersaglio. Questa tecnica garantisce elevata risoluzione a lungo raggio ed è alla base dei sistemi Lidar impiegati nella guida autonoma. Nella tecnica a modulazione di fase (iToF, Indirect Time of Flight), il segnale emesso è invece modulato sinusoidalmente a frequenza nota, e la distanza viene ricavata dallo sfasamento tra il segnale trasmesso e quello ricevuto. Pur presentando una distanza massima non ambigua inversamente proporzionale alla frequenza di modulazione, questa tecnica risulta più semplice da implementare in formato integrato e ha trovato ampia diffusione nei sensori matriciali per la ricostruzione di mappe di profondità in tempo reale.



Figura 10. *Involucro tipico di un sensore VL53Lxx*

L'integrazione di sensori TOF in sistemi embedded è oggi agevolata dalla disponibilità di dispositivi fortemente miniaturizzati, quali la famiglia VL53Lxx di STMicroelectronics o il TMF8821 di ams-OSRAM, che racchiudono in un package di pochi millimetri quadrati l'emettitore, il rilevatore, l'ottica e il DSP di elaborazione, esponendo i dati di distanza calibrati attraverso un'interfaccia I²C standard. Il microcontrollore host si limita a configurare i parametri operativi del sensore (modalità di ranging, frequenza di campionamento, soglie di allarme) e a leggere i risultati al momento segnalato dal pin di interrupt dedicato, realizzando un'architettura event-driven efficiente dal punto di vista energetico.

Le sorgenti di errore che influenzano la misura TOF meritano una trattazione attenta in sede progettuale. La riflettività della superficie bersaglio, l'angolo di incidenza del fascio luminoso, la presenza di luce ambientale intensa e il fenomeno del multipath (ovvero la sovrapposizione di riflessioni indirette provenienti da superfici diverse) concorrono a determinare l'incertezza della misura finale. I moderni sensori TOF integrano meccanismi di compensazione e forniscono, accanto al valore di distanza, indici di qualità del segnale (sigma estimator, signal rate) che permettono al sistema di rilevare e scartare misure non affidabili.

In sintesi, la tecnologia Time of Flight rappresenta una soluzione matura e versatile per la misura non a contatto della distanza e per la percezione spaziale dell'ambiente, con un rapporto prestazioni/ingombro che la rende particolarmente adatta ai sistemi embedded vincolati in termini di spazio, consumo energetico e costo. La sua crescente diffusione (dai moduli di autofocus negli smartphone ai Lidar per la guida autonoma, passando per la robotica collaborativa e la domotica) testimonia la capacità di questa tecnologia di adattarsi a requisiti applicativi profondamente eterogenei, confermandone il ruolo centrale nel panorama della sensoristica moderna.

4.2. Selezione del sensore

Nel precedente prototipo venivano utilizzati:

- Il **sensore TOF10120**, un sensore a basso costo che consente di acquisire risultati precisi, accurati e ripetibili fino ad una distanza di 1.80 m. Presenta anche un vetro di protezione opaco per preservare la vita del sensore e per aumentare la robustezza delle misure.
- Il **modulo GY-521** gestisce il sensore MPU-6050, un chip prodotto da InvenSense che integra al suo interno un accelerometro a tre assi, un giroscopio a tre assi, un sensore di temperatura, un oscillatore di clock interno e un processore di movimento digitale (DMP). Nel contesto del prototipo, il modulo viene impiegato esclusivamente per verificare la perpendicolarità del sensore TOF rispetto al suolo, garantendo così l'affidabilità della misura di distanza. Un errore di posizionamento del sensore di qualche grado può infatti introdurre errori anche di alcuni centimetri nella misurazione dell'altezza del paziente.

Il nuovo prototipo è invece equipaggiato con un unico sensore TOF multi-zona che, a differenza del TOF10120, è in grado di acquisire più distanze in modo simultaneo, rendendo superfluo l'impiego di un sensore aggiuntivo per la correzione dell'inclinazione. A tale scopo sono stati valutati i sensori VL53L5CX e VL53L8, entrambi dotati di un ampio campo visivo (FOV, Field of View) quadrato di 65° in diagonale, suddivisibile fino a 64 zone e in grado di generare una mappa di profondità di dimensioni 8×8 . È inoltre possibile ridurre la risoluzione a 16 zone, ottenendo una matrice 4×4 , al fine di conseguire prestazioni più stabili in ambienti ad elevata luminosità.

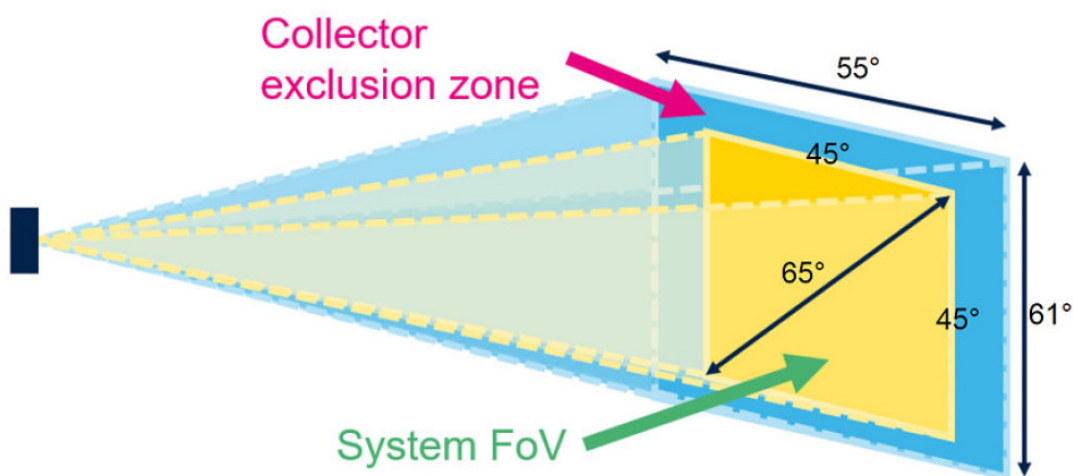


Figura 11. FOV dei sensori VL53L5CX e VL53L8

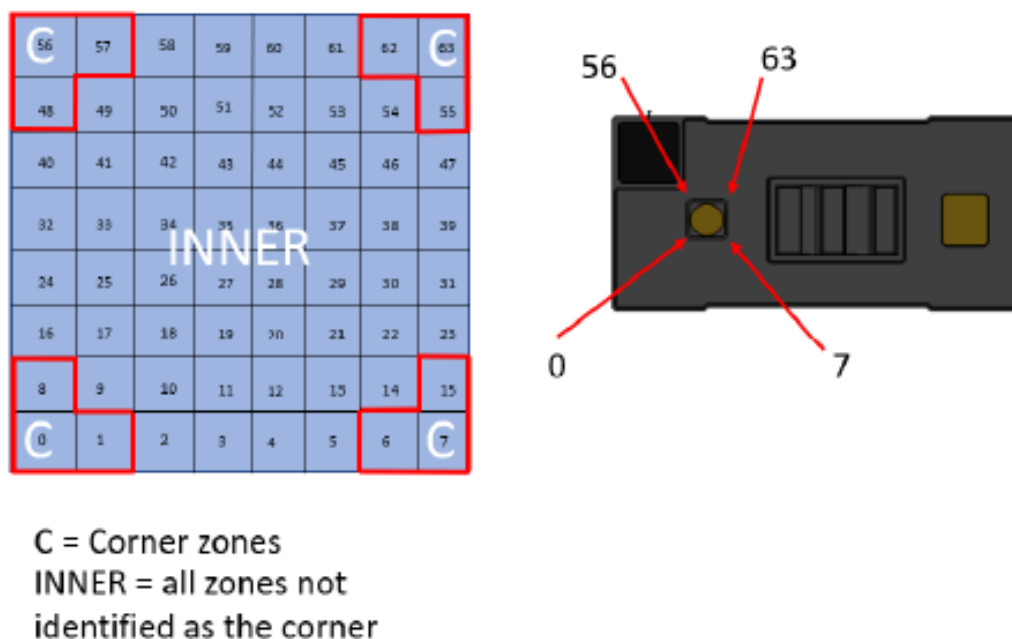


Figura 12. Mappatura delle zone in modalità 8x8

I vantaggi non si limitano a quelli descritti. Entrambi i sensori sono in grado di identificare più oggetti (target) all'interno di una singola zona contemporaneamente. Ciò è reso possibile da circuiti e algoritmi che consentono un'analisi più complessa del segnale di ritorno: quest'ultimo viene campionato e rappresentato come un istogramma temporale dell'energia luminosa ricevuta e, tramite un algoritmo di peak detection, vengono identificati i massimi locali all'interno dell'istogramma. Ogni massimo viene interpretato come un target distinto, dal quale si ricava una distanza corrispondente al tempo di volo associato. Questa caratteristica consente di acquisire l'altezza del paziente anche in presenza di piccoli ostacoli.

Oltre a questo, i due nuovi sensori presentano anche prestazioni migliori. Secondo i datasheet il VL53L5CX al buio presenta una portata fino a 4 m mentre sotto una luce ambientale con intensità di 5 klux arriva fino a 1.70 m. Il VL53L8 al buio ha le medesime prestazioni mentre in ambienti più luminosi raggiunge anche i 2.85 m.

Prima di orientarsi definitivamente verso la tecnologia TOF, è stata valutata anche l'adozione di un sensore a ultrasuoni, il quale presenta un costo contenuto e il vantaggio di non essere influenzato dalla luminosità ambientale. Tuttavia, questa tipologia di sensore risulta in generale meno precisa e più sensibile alle variazioni di temperatura. Un ulteriore aspetto da considerare è che, non mappando l'area sottostante come i sensori VL53L5CX e VL53L8, richiederebbe comunque l'integrazione di un sensore G per la correzione dell'inclinazione, con un aumento

della complessità hardware sostanzialmente equivalente a quella del prototipo precedente. Viene inoltre meno la capacità di rilevare più oggetti all'interno della stessa zona, con la conseguente impossibilità di ignorare eventuali ostacoli.

Per tali motivi, si è deciso di procedere con la verifica e la caratterizzazione delle performance dei sensori VL53L5CX e VL53L8 e qualora le analisi evidenziassero delle prestazioni insufficienti, si prenderà in considerazione di cambiare tipologia e di adottare un sensore a ultrasuoni.

4.3. Descrizione dell'acquisizione dei dati

Sono stati creati due strumenti con dei pezzi riciclati e servono per acquisire più misure consecutive mantenendo fissata l'altezza e l'inclinazione. Senza questi apparecchi, le altezze e le inclinazioni reali del sensore sarebbero molto imprecise e poco riproducibili. In questa fase si richiede che le quote in cui viene posizionato il sensore siano il più fedeli possibili al valore voluta. Stesso discorso vale anche per l'inclinazione ma non si richiede una precisione elevata dato che è solo un'informazione che serve per correggere l'altezza rilevata e non è il risultato che restituirà lo strumento.

Strumenti per l'acquisizione delle altezze

Per l'acquisizione dell'altezza sono stati creati due supporti:

- L'apparecchio mostrato nell'immagine 13 è un supporto telescopico a base circolare in plastica, che permette di essere regolato in altezza e mantenere una posizione stabile una volta bloccato. È composto da due elementi tubolari coassiali: un tubo esterno fisso, collegato alla base, all'interno del quale scorre un secondo tubo di diametro inferiore. Sulla sommità del tubo interno è fissa a un'asta orizzontale in legno compensato. Facendo scorrere il secondo tubolare, è possibile variare l'altezza dell'asta in un intervallo compreso tra 900 mm e 1600 mm circa e tramite un meccanismo di serraggio posto nella zona di giunzione tra i due tubi si può anche bloccare il supporto alla quota desiderata. Nel caso in cui è necessario raggiungere delle quote al di fuori di questo intervallo, è possibile aggiungere una seconda asta in legno parallela alla prima, collegandole tramite quattro barre filettate passanti. Posizionando sotto alla prima asta le quattro barre filettate più lunghe (~700 mm), si possono acquisire anche altezze inferiori ai 300 mm mentre se vengono posizionate sopra si possono raggiungere quote superiori ai 2000 mm. Infine, sull'asta in legno smontabile è incollata una livella a bolla, che consente di verificare e correggere la planarità del piano di riferimento rispetto al pavimento. La regolazione avviene agendo sui dadi dei bulloni che fissano le barre filettate alle due aste, avvitando o svitando per compensare eventuali dislivelli.

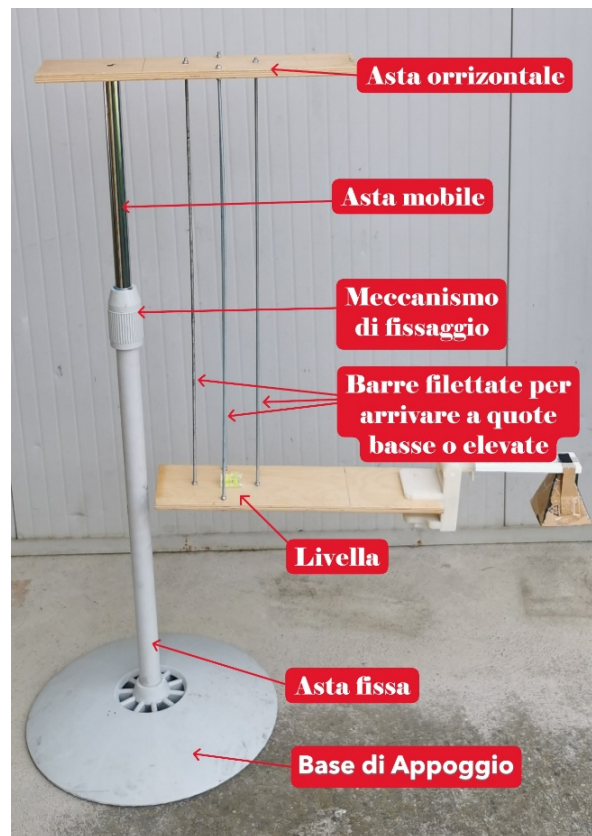


Figura 13. *Supporto telescopico*

- Il dispositivo mostrato nell'immagine 14 è stato realizzato completamente con una stampante 3D ed è un supporto progettato per fissare i sensori TOF su una superficie piana e regolarne l'inclinazione rispetto al terreno. Il fissaggio al supporto sottostante avviene tramite una morsa a vite, che garantisce un ancoraggio stabile. Sulla parte superiore della morsa è montato un secondo elemento, incernierato attorno a un asse orizzontale e parallelo al pavimento, che consente di ruotare l'asta porta-sensori nel piano verticale. L'asta porta-sensori è accoppiata all'elemento rotante tramite un secondo foro, ortogonale al precedente, nel quale si inserisce l'albero dell'asta stessa. Tra questi due componenti, per la lettura dell'angolo di inclinazione sono stati posti un cursore fissato all'asta e un semicerchio graduato, con risoluzione di 5° , fissato all'elemento rotante. Sull'asta è inoltre applicata una livella a bolla, che permette di portare l'asta in posizione orizzontale e definire così lo zero della scala graduata prima di eseguire qualsiasi regolazione angolare. Infine, vi sono anche un paio di viti che servono per bloccare la rotazione.

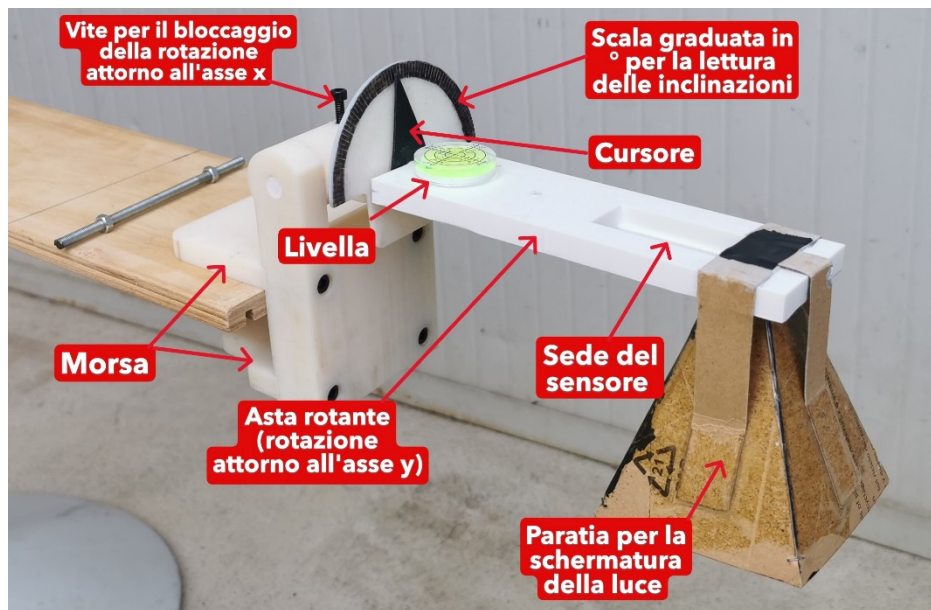


Figura 14. *Supporto rotante per i sensori*

Sulla punta dell'asta dove vengono inseriti i sensori TOF è stata attaccata una paratia che serve per schermare la luce esterna e permettere un funzionamento migliore sotto la luce solare.

È solo grazie a questi due supporti che sono stato in grado di effettuare misure più consistenti, proprio perché è possibile posizionare il sensore ad un'altezza e un'inclinazione voluta e stabile per tutta la durata dell'acquisizione dei dati.

Tuttavia, questi supporti non sono perfetti perché, essendo stati creati abbastanza di fretta e con materiali riciclati, presentano alcuni problemi:

- Il supporto telescopico è un po' traballante e a causa del peso delle aste orizzontale in legno e delle altre componenti presenti (quindi le viti, il secondo supporto, la scheda nucleo STM32F446RE e il sensore) facevano piegare in avanti l'asta verticale superiore e quindi inclinavano le aste orizzontali. Pertanto, bisogna regolare le barre filettate e/o il secondo supporto al fine di settare il sensore a inclinazione iniziale pari a 0° .
- Il supporto rotante per l'alloggio del sensore era fatto totalmente in plastica ed è capitato più di qualche volta che si rompesse la morsa perché si stringeva troppo oppure in generale si rompesse a causa di una caduta.

Procedimento per l'estrazione dei dati

Per misurare l'altezza è stato caricato un apposito firmware temporaneo sulla Nucleo F446RE al fine di estrarre i dati nelle condizioni desiderate e di trasmetterli al PC in modo opportuno. Come accennato in precedenza, i sensori TOF VL53L5CX e VL53L8 possono essere configurati in modalità 4x4 o 8x8 e via software si può scegliere la velocità di campionamento e il numero di target rilevabili. Quest'ultimo parametro è posto a 2 perché, nel caso in cui fosse presente un ostacolo, il sensore può registrare sia la distanza dall'ostacolo che quella dal terreno.

Il firmware è stato programmato in modo che acquisisca 10 misure e le salvi in una struttura. Le invia poi sottoforma di stringa al computer e ripete questa procedura una trentina di volte. Vengono raccolte e inviate solo 10 misure alla volta perché ogni misura ha un peso non indifferente sulla memoria del microcontrollore. Ogni dato viene acquisito e salvato in una struttura *RANGING_SENSOR_Result_t* che contiene i seguenti campi:

- *NumberOfZones*: valore salvato in formato *uint32_t* che indica il numero di zone in cui è suddiviso il sensore, in base alla configurazione scelta. Con la configurazione 4x4 si ottengono 16 zone, con la configurazione 8x8 se ne ottengono 64;
- *ZoneResult [RANGING_SENSOR_MAX_NB_ZONES]*: è a sua volta una struttura contenente un numero di elementi pari al numero di zone impostato.

Questa struttura, denominata *RANGING_SENSOR_ZoneResult_t*, contiene i seguenti campi:

- *NumberOfTargets*: numero massimo di target rilevabili per zona, impostato in fase di configurazione, in formato *uint8_t*;
- *Distance [RANGING_SENSOR_NB_TARGET_PER_ZONE]*: struttura contenente le distanze degli *n* oggetti rilevati dal sensore (*n* = *NumberOfTargets*);
- *Status [RANGING_SENSOR_NB_TARGET_PER_ZONE]*: contiene gli stati delle distanze rilevate. Uno stato pari a 0, 6 o 10 indica una distanza valida; qualsiasi altro valore indica una misura non valida;
- *Ambient [RANGING_SENSOR_NB_TARGET_PER_ZONE]*: contiene le misure della luce ambientale che arriva al sensore, espressa in *kcps/SPAD*, ovvero il numero di fotoni rilevati per secondo per ogni sensore elementare;

- *Signal [RANGING_SENSOR_NB_TARGET_PER_ZONE]*: contiene le misure della luce emessa dal sensore e riflessa dal target, anch'essa espressa in kcps/SPAD.

Queste ultime informazioni sono salvate in formato `uint32_t` o in formato `float`, tipi di dato che occupano 4 byte ciascuno, mentre il dato in formato `uint8_t` occupa 1 byte. Nel caso peggiore, ovvero con configurazione 8×8 e *NumberOfTargets* = 2, la memoria necessaria per salvare un singolo risultato ammonta a circa 2 KB; per questo motivo non è possibile salvare un numero elevato di acquisizioni contemporaneamente.

Per leggere i dati e salvarli sul PC è stato scritto un codice in Python che consente di leggere le stringhe ricevute e di salvarle in un file `.txt`. Ogni riga corrisponde a un'acquisizione e ogni valore è separato da quello adiacente mediante una virgola. Tramite un codice scritto in MATLAB, i dati vengono quindi convertiti e salvati in un file `.mat`, più agevole da gestire. Il file finale contiene tutti i dati necessari alle analisi, oltre ad alcune informazioni aggiuntive non utilizzate. I dati rilevanti sono:

- *data*: struttura contenente le matrici di tutte le prove effettuate nelle condizioni specificate; ogni riga della matrice contiene tutte le informazioni relative a una singola acquisizione;
- *distance*: struttura data riformattata come matrice tridimensionale contenente esclusivamente le informazioni sulle distanze. La prima dimensione corrisponde al numero di prove effettuate, la seconda al numero di acquisizioni e la terza al numero di zone moltiplicato per il numero di oggetti rilevati;
- *state*: matrice tridimensionale analoga a *distance*, contenente le informazioni sugli stati delle misure.

Una volta ottenute queste informazioni, è stato verificato inizialmente se il sensore selezionato funzionasse in presenza di luce solare diretta e se le misure fossero affidabili. Successivamente sono stati condotti studi per analizzare l'influenza della variazione dell'inclinazione e della frequenza di campionamento sui dati acquisiti e per definire le modalità di filtraggio delle misure valide.

4.4. Studio delle performance del sensore VL53L5CX

Per il sensore VL53L5CX sono state effettuate due sessioni di misurazioni: una in ambiente chiuso, all'interno di un edificio, e una all'aperto in presenza di luce solare diretta. Per ciascuna sessione sono state acquisite 12 serie di misure, ottenute combinando 4 altezze (400, 800, 1200 e 1600 mm) e 3 inclinazioni (0° , 3° e 6°), ciascuna contenente 300 campioni acquisiti a una frequenza di campionamento di 3 Hz.

Come si vedrà, per questo sensore sono stati raccolti meno dati rispetto al VL53L8, poiché l'obiettivo iniziale era esclusivamente verificare l'affidabilità del sensore nelle due condizioni ambientali. A causa di alcune problematiche, illustrate di seguito, non è stato ritenuto necessario acquisire ulteriori serie di dati né condurre analisi più approfondite.

4.4.1. Influenza della luce ambientale sulle misure

Ambiente interno

Una volta elaborati i dati grezzi nel modo opportuno, tramite MATLAB viene generato il seguente grafico.

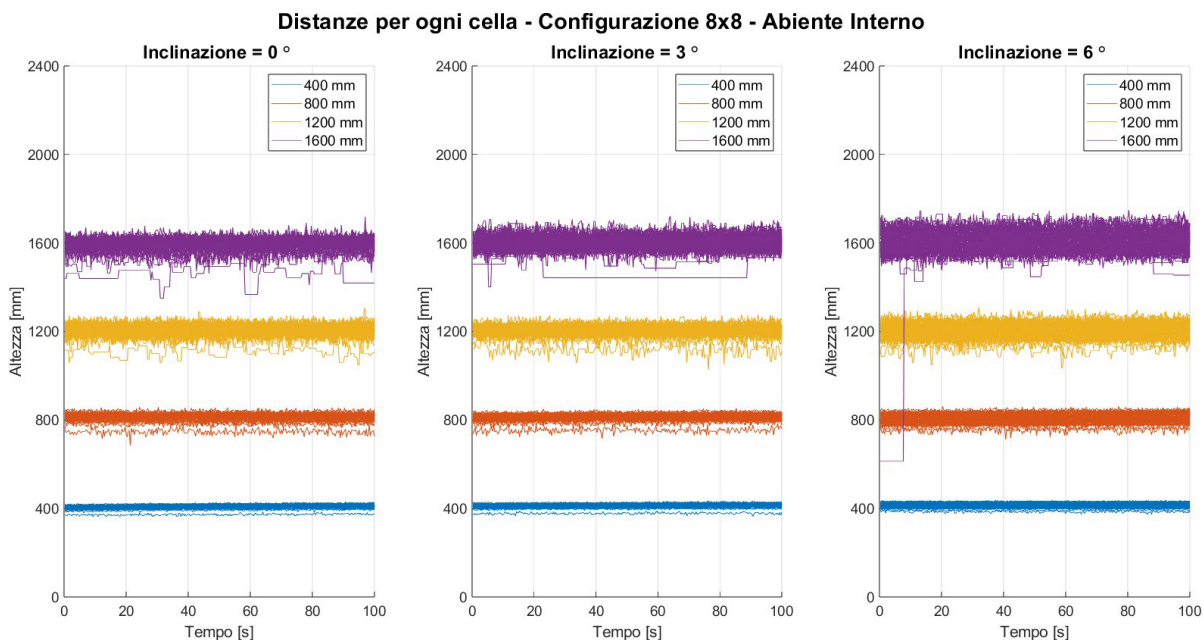


Figura 15. Distanze in modalità 8x8 acquisite all'interno (VL53L5CX)

In ciascun grafico sono riportati i 64 andamenti temporali dei valori registrati dalle zone del sensore. Sull'asse delle ascisse è riportata la durata necessaria per raccogliere i dati di ciascuna prova, mentre sull'asse delle ordinate sono riportate le altezze misurate.

Si osserva innanzitutto che, a eccezione di alcune misurazioni errate acquisite da alcune celle, i dati risultano in generale ottimi in queste condizioni.

Si nota inoltre che a quote reali più basse le misure risultano più concentrate e meno rumorose, mentre all'aumentare dell'altezza alcune celle, presumibilmente quelle più esterne, tendono a registrare valori che si discostano maggiormente dal valore reale. Un andamento simile si osserva anche al variare dell'inclinazione del sensore, sebbene con effetti più attenuati: all'aumentare dell'inclinazione le misure risultano più rumorose e tendono a discostarsi le une dalle altre.

Tutto sommato si può affermare che il sensore VL53L5CX funzioni perfettamente in ambienti interni, riuscendo ad acquisire altezze fino a quote di 1600 mm e inclinazioni di 6°.

Ambiente esterno sotto al sole

Osservando invece le altezze acquisite in presenza di luce solare diretta, la situazione cambia drasticamente.

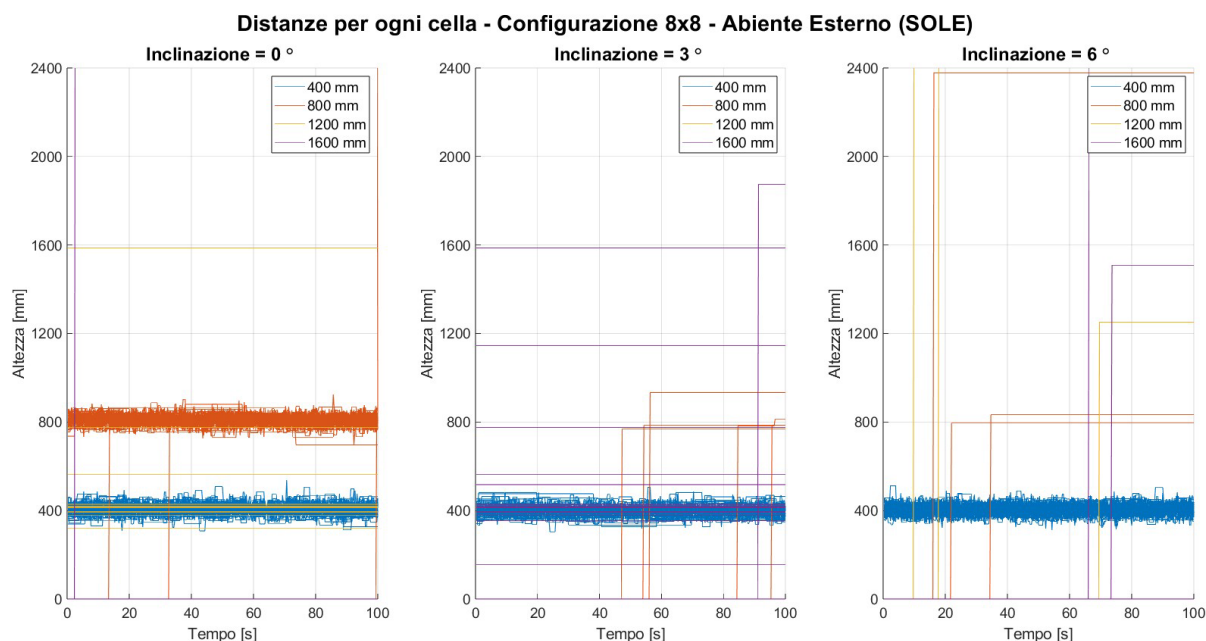


Figura 16. Distanze in modalità 8x8 acquisite sotto al sole (VL53L5CX)

Nel primo grafico, con il sensore inclinato di 0° , fino a 800 mm il comportamento è simile a quello registrato in ambiente chiuso: le misure sono abbastanza stabili, ma si discostano maggiormente le une dalle altre rispetto al caso precedente. Le misure a 1200 mm e 1600 mm falliscono invece completamente: i valori scompaiono quasi interamente dal grafico, con alcune celle fisse a 0 mm, altre bloccate su valori costanti del tutto casuali e altre ancora che restituiscono inizialmente 0 mm per poi registrare, a partire da un certo istante, un valore casuale che rimane costante, producendo un andamento a semiretta orizzontale.

La situazione peggiora ulteriormente in presenza di inclinazione, anche minima. Con un'inclinazione di 3° o 6° , le acquisizioni falliscono già a partire da 800 mm con le modalità appena descritte, mentre a 400 mm il sensore continua a comportarsi come in assenza di inclinazione.

Si può pertanto concludere che il sensore VL53L5CX, pur funzionando correttamente in ambiente chiuso, risulta completamente inaffidabile in presenza di luce solare diretta. Poiché il dispositivo deve poter operare anche in questa condizione, il sensore non può essere impiegato nel progetto.

4.5. Studio delle performance del sensore VL53L8

Prima di riscrivere il firmware dedicato al nuovo sensore e di procedere con la raccolta e l'elaborazione sistematica dei dati, è stato scelto di utilizzare il codice di test generato automaticamente da STM32CubeIDE al fine di verificare preliminarmente se il sensore offrisse prestazioni superiori rispetto al precedente. Tramite il software PuTTY sono state lette in tempo reale le distanze e gli stati restituiti da ciascuna cella, eseguendo un rapido confronto tra il VL53L5CX e il VL53L8.

L'obiettivo di questa fase non era caratterizzare le prestazioni del nuovo sensore in modo approfondito, bensì valutare in primo luogo se risultasse effettivamente più affidabile del precedente e, in caso affermativo, se potesse rappresentare una soluzione idonea al problema riscontrato. A tal fine, entrambi i sensori sono stati spostati verticalmente tra quote di $1600 \div 1650$ mm e circa 1000 mm, al fine di osservarne il comportamento a diverse altezze in presenza di luce solare diretta.

```
53L5A1 Simple Ranging demo application | 53L5A1 Help
-----
Use the following keys to control application
'r' : change resolution
's' : enable signal and ambient
'c' : clear screen

Cell Format :

      Distance [mm] :      Status
-----
Catana, Ital
|  X :  X |  X :  X |  X :  X |  X :  X |
|  X :  X |  X :  X |  X :  X |  X :  X |
|  X :  X |  X :  X |  X :  X |  X :  X |
|  X :  X |  X :  X |  X :  X |  X :  X |
|-----|
```

Figura 17. Test del sensore VL53L5CX sotto al sole

```
53L8A1 Simple Ranging demo application
-----
VL53L5A1_RANGING_SENSOR_Init failed
Use the following keys to control application
'r' : change resolution
's' : enable signal and ambient
'c' : clear screen

Cell Format :
```

Distance [mm] :				Status							
X	:	X	1475	:	10	1438	:	10	1473	:	0
1569	:	0	1502	:	10	X	:	X	X	:	X
1548	:	10	1582	:	10	X	:	X	1563	:	10
X	:	X	1614	:	10	1541	:	0	X	:	X

Figura 18. *Test del sensore VL53L8 sotto al sole*

Testando i sensori nelle medesime condizioni, ovvero all'aperto sotto la luce solare, nello stesso giorno e a distanza di qualche minuto, è emerso un comportamento nettamente differente tra i due dispositivi. In particolare, il VL53L5CX non restituiva alcun valore valido a quote superiori a 1000 mm, mentre il VL53L8 riusciva ad acquisire misure in tutte le zone, sebbene con una certa instabilità. Le distanze registrate variavano generalmente entro un range di 100 mm e alcune celle restituivano misure non valide per alcuni secondi, per poi riprendere correttamente l'acquisizione.

Nonostante le prestazioni del nuovo sensore non fossero ottimali, esse risultavano decisamente superiori a quelle del VL53L5CX; è stato pertanto deciso di procedere con l'acquisizione sistematica dei dati e con lo studio dell'effetto della luce ambientale sulle misure, esattamente com'era stato fatto per il VL53L5CX.

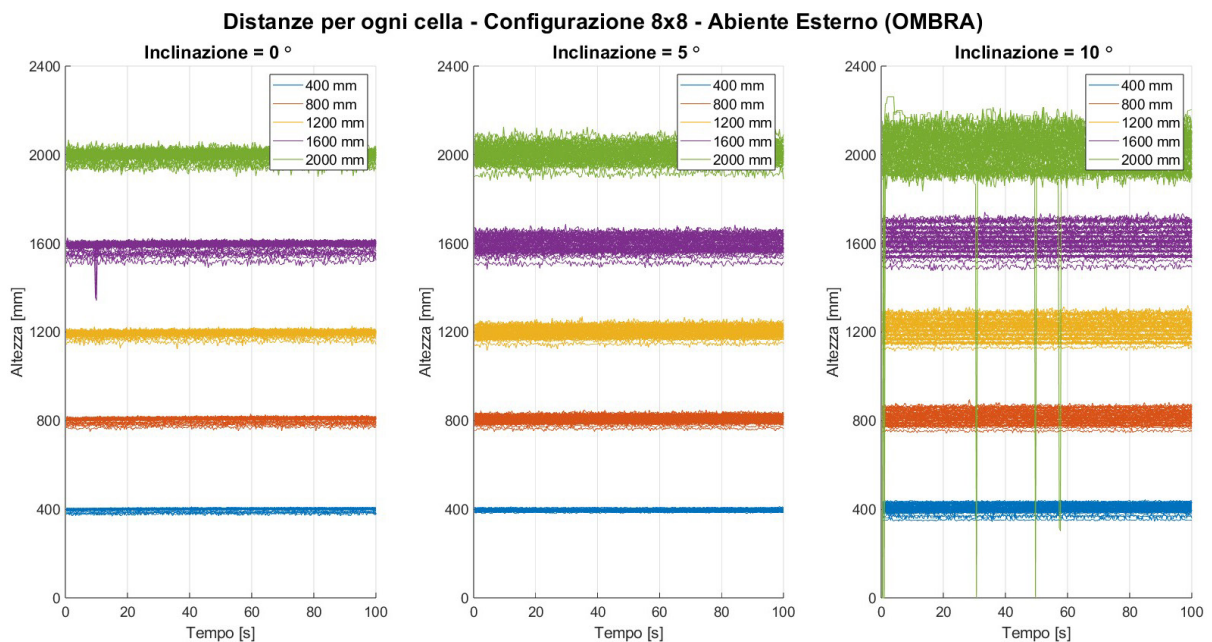
Per il sensore VL53L8 sono state acquisite 30 serie di misure. Il sensore è stato posizionato alle altezze di 400, 800, 1200, 1400, 1600 e 2000 mm e inclinato con angoli di circa 0°, 5°, 10°, 15° e 20°. Poiché le condizioni in ambiente chiuso e in ambiente esterno all'ombra sono risultate sostanzialmente equivalenti, si è scelto di effettuare le prove esclusivamente in esterno: una sessione sotto un portico, quindi in condizioni di ombra, e una in presenza di luce solare diretta.

4.5.1. Influenza della luce ambientale sulle misure

Al fine di effettuare un confronto con il sensore precedente, le misure sono state acquisite in configurazione 8x8 e con frequenza di campionamento pari a 3 Hz. Poiché i comportamenti osservati alle inclinazioni di 3° e 6° erano risultati molto simili tra loro, è stato scelto di non replicare le medesime inclinazioni; è stata invece adottata un'inclinazione di 5° per il confronto con i casi precedenti e inclinazioni superiori per valutare se valori più elevati influenzassero in misura maggiore la qualità delle misure.

Ambiente esterno sotto al sole

Osservando i primi due grafici, relativi alle inclinazioni di 0° e 5°, si può notare che fino a 1600 mm le prestazioni non differiscono in modo sostanziale rispetto a quelle del VL53L5CX. A un'analisi più attenta si osserva che i grafici risultano leggermente meno rumorosi e che gli intervalli tra le misure sono più contenuti, ma l'entità di tali differenze non è particolarmente evidente.



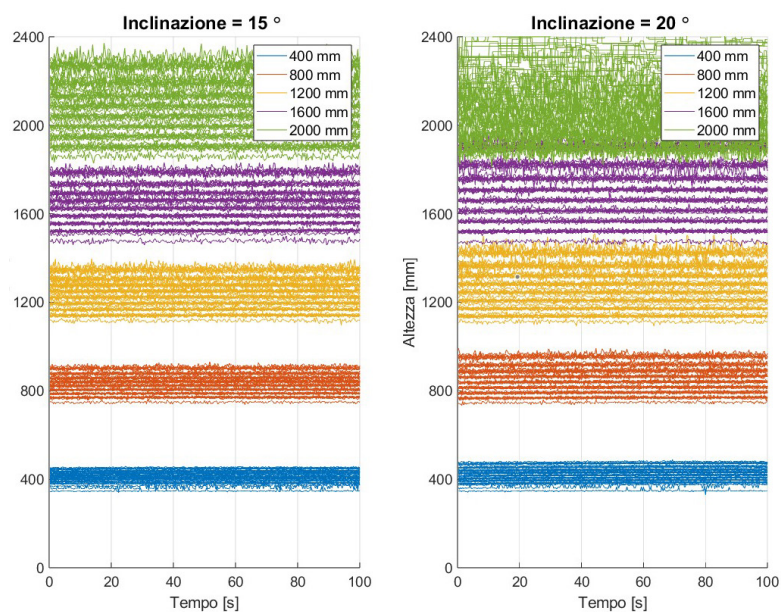


Figura 19. Distanze in modalità 8x8 acquisite sotto all'ombra (VL53L8)

Rispetto alle prove precedenti è stata aggiunta una quota supplementare di 2000 mm e tre ulteriori inclinazioni: 10°, 15° e 20°. Si osserva con maggiore chiarezza come, all'aumentare dell'inclinazione e dell'altezza, il range delle misure aumenti in maniera considerevole. Tra 0° e 5° di inclinazione tali effetti non sono particolarmente evidenti, mentre a 10° e 15° il range medio tra le misure aumenta di circa il 50% rispetto alle inclinazioni precedenti; a 20° si registra un ulteriore incremento, sebbene di entità inferiore.

Tralasciando l'effetto della variazione di altezza e inclinazione sulla dispersione delle misure tra celle differenti, che verrà analizzato più in dettaglio in seguito, la rumorosità delle singole celle tende in generale a rimanere contenuta, anche se in alcuni istanti alcune di esse restituiscono misure non valide, come si osserva ad esempio a 2000 mm con inclinazione di 0° o a 1600 mm con inclinazione di 0°.

Poiché per il VL53L5CX erano state effettuate un numero di prove nettamente inferiore rispetto al VL53L8, non è possibile affermare con certezza che quest'ultimo sia effettivamente superiore in condizioni di ombra; è stato tuttavia confermato che il sensore non presenta criticità operative e che è in grado di funzionare correttamente anche in condizioni più gravose rispetto a quelle testate in precedenza.

Ambiente esterno sotto al sole

Come già osservato per il sensore precedente, l'esposizione alla luce solare diretta comporta un peggioramento delle prestazioni; tuttavia, rispetto al VL53L5CX, il sensore VL53L8 funziona in modo soddisfacente fino a 1600 mm con inclinazioni di 0° e 5°. Si registra un aumento del rumore e si osservano occasionali fallimenti di una o due celle per brevi istanti, ma non emergono ulteriori criticità significative.

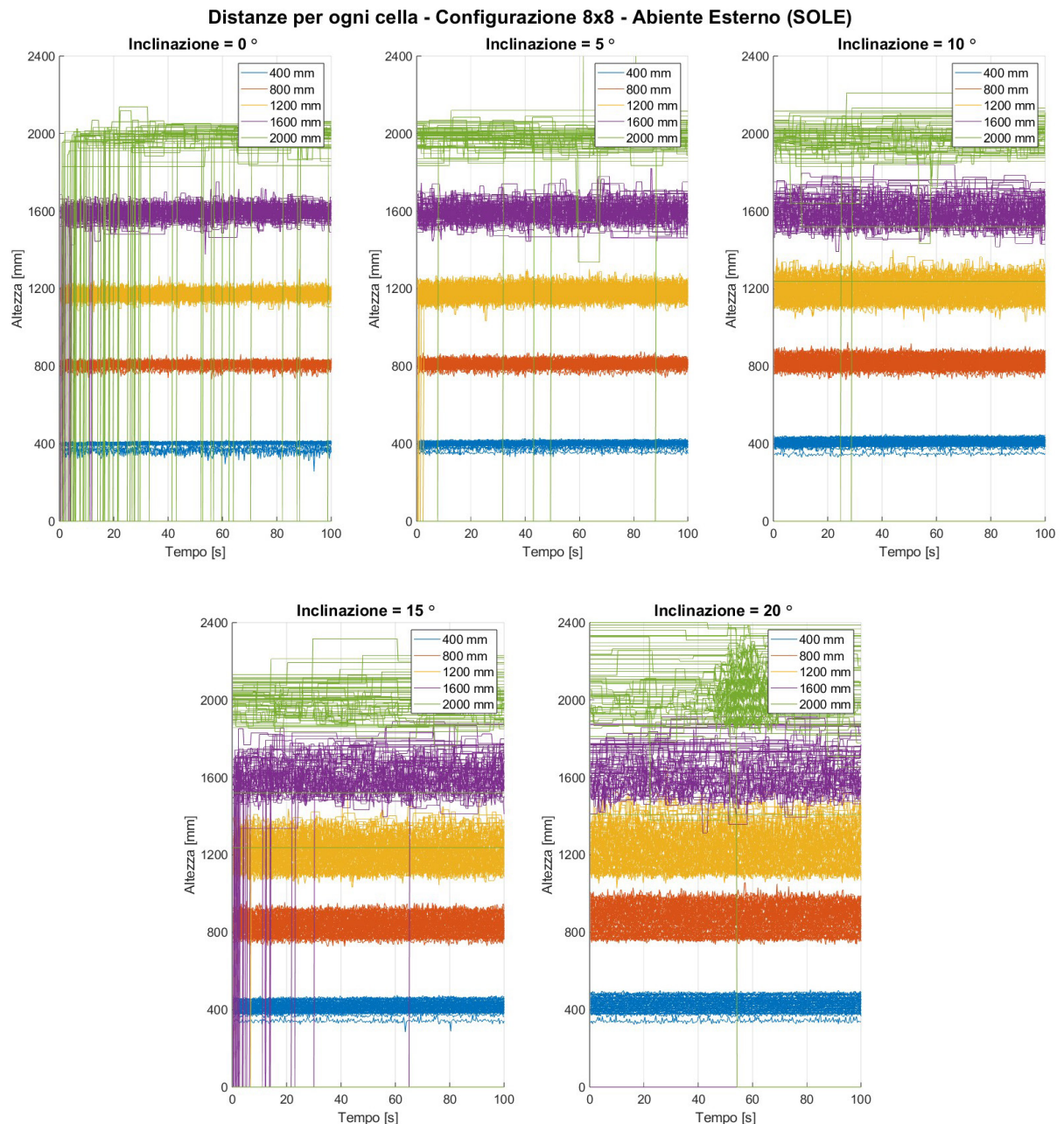


Figura 20. Distanze in modalità 8x8 acquisite sotto al sole (VL53L8)

La situazione si complica all'altezza di 2000 mm, dove il rumore risulta eccessivo. Sebbene alcune celle riescano a restituire valori prossimi a quello reale, molte altre falliscono per quasi tutta la durata della prova; a tale quota le misure non appaiono sufficientemente affidabili per produrre un risultato valido.

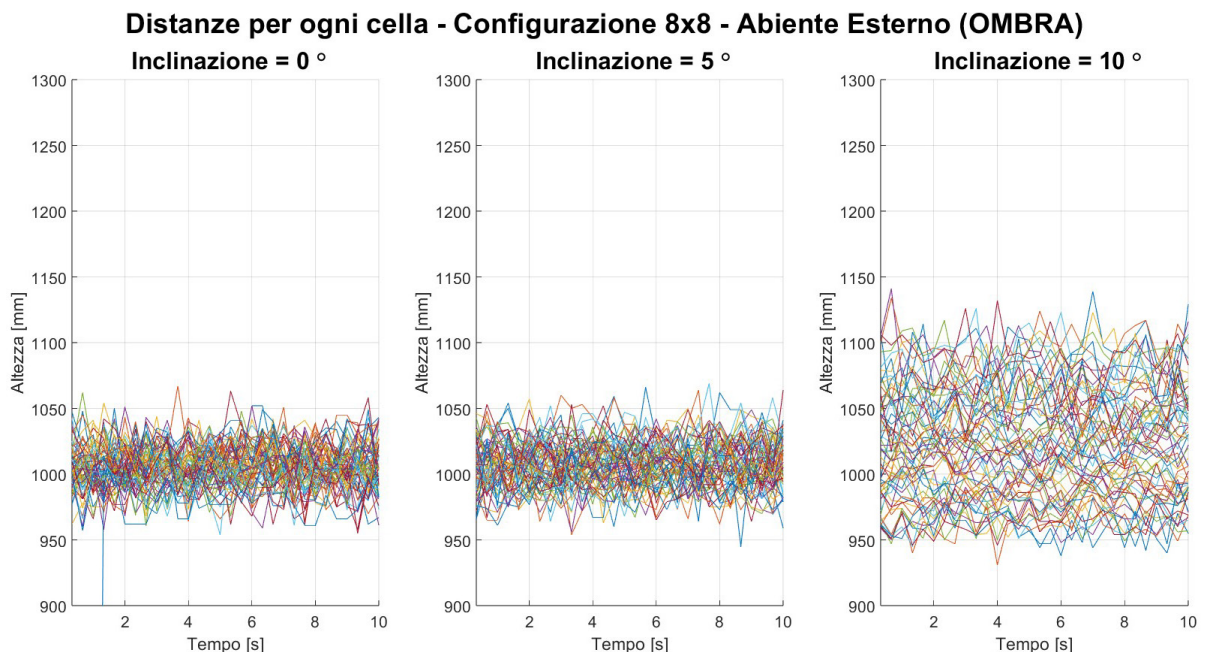
Anche l'aumento dell'inclinazione incide negativamente sulle prestazioni. Rispetto alle condizioni di ombra, all'aumentare dell'inclinazione si osserva non solo un incremento del range tra le misure, ma anche un aumento della rumorosità e del numero di fallimenti nell'acquisizione delle celle.

Nonostante queste limitazioni, si può affermare con certezza che il sensore VL53L8 presenta prestazioni nettamente superiori rispetto al VL53L5CX in presenza di luce solare. Sebbene ad altezze e inclinazioni elevate le prestazioni risultino meno soddisfacenti, il sensore funziona in modo adeguato almeno fino a 1200 mm. È opportuno ricordare che l'obiettivo del progetto è la misurazione dell'altezza di bambini, per cui non si raggiungeranno mai quote particolarmente elevate. Il sensore VL53L8 è pertanto da considerarsi una valida opzione e le analisi proseguiranno al fine di caratterizzarne le prestazioni nel modo più completo possibile.

4.5.2. Influenza dell'inclinazione del sensore sulle misure

L'analisi precedente ha evidenziato come l'inclinazione del sensore influenzi in modo non trascurabile la dispersione delle misure tra le celle. Al fine di caratterizzare questo effetto in modo più sistematico, è stata condotta una serie di acquisizioni a quota fissa di 1000 mm, in configurazione 8x8 e con frequenza di campionamento di 10 Hz, variando l'inclinazione del sensore secondo i valori definiti in precedenza. Nel seguito vengono presentate e discusse esclusivamente le acquisizioni registrate in condizioni di penombra, in quanto le misure effettuate in presenza di luce solare diretta mostrano un andamento analogo, caratterizzato unicamente da un incremento del rumore, senza aggiungere informazioni significative ai fini dell'analisi.

Si osserva che l'aumento dell'inclinazione produce sul grafico delle misure un effetto di espansione asimmetrico rispetto al valore reale: i valori minimi non scendono significativamente al di sotto dei 950 mm, mentre i valori massimi aumentano progressivamente, generando un'espansione verso l'alto. Fino a 5° tale espansione non è apprezzabile rispetto al caso a 0° ; a 10° i valori massimi raggiungono quasi 1150 mm, a 15° si avvicinano a 1200 mm e a 20° arrivano a circa 1250 mm.



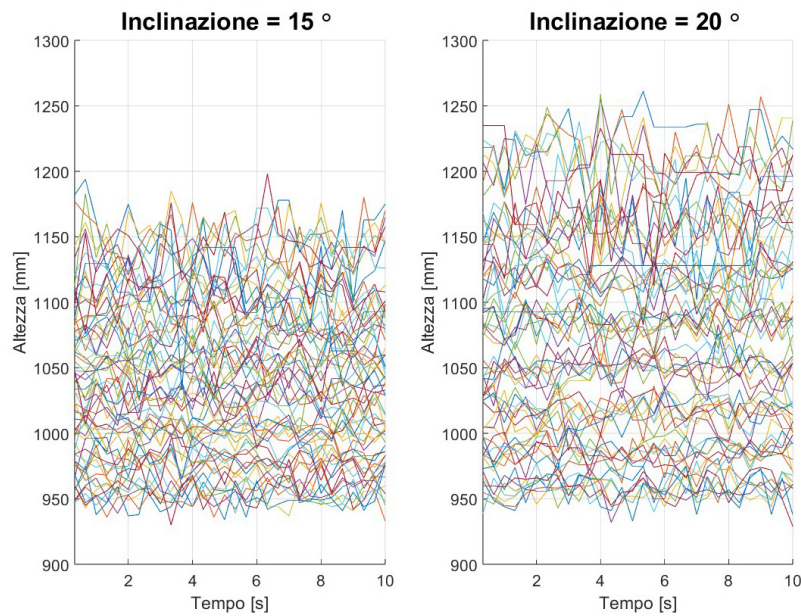


Figura 21. Distanze - Confronto delle inclinazioni a quota di 1000 mm (VL53L8)

I grafici seguenti consentono di analizzare più in dettaglio gli effetti della variazione dell'inclinazione.

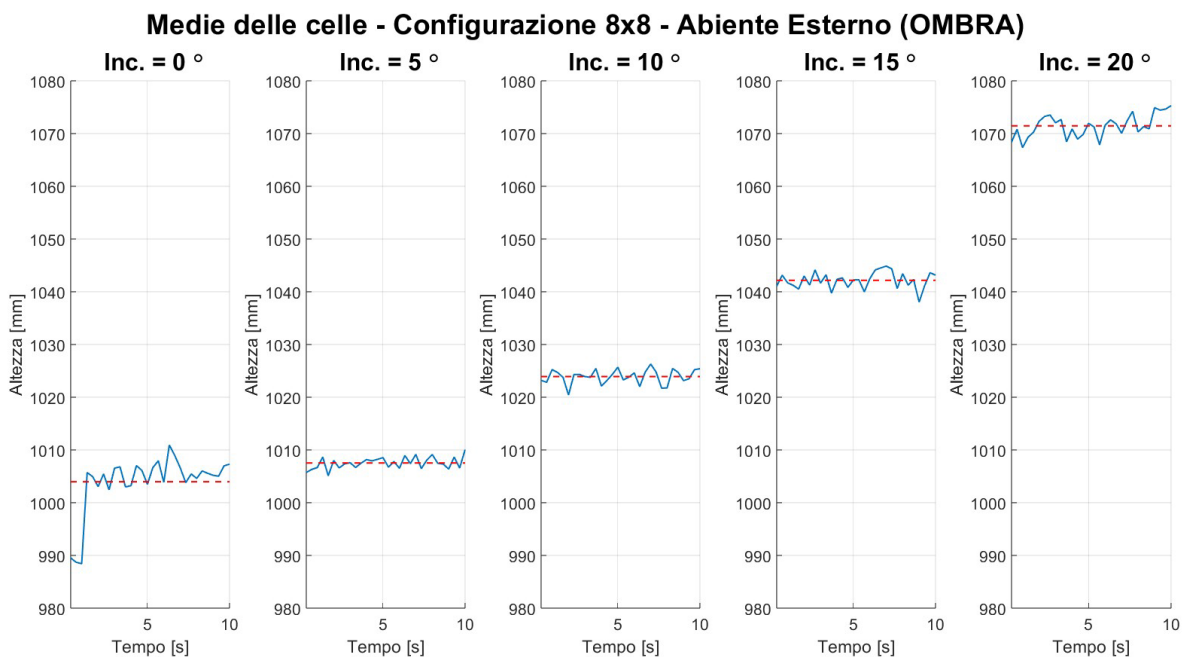


Figura 22. Media delle distanze - Confronto delle inclinazioni a quota di 1000 mm (VL53L8)

Il primo effetto riguarda l'innalzamento della media. Tra 0° e 5° si osserva un aumento trascurabile: la media generale passa da circa 1004 mm a circa 1008 mm. È opportuno notare che il fallimento di una cella nel primo secondo a 0° abbassava la media nell'intorno dei

990 mm, influenzando il valore complessivo; al netto di questo episodio, il comportamento fino a 5° può essere considerato pressoché invariato. A 10° si registra il primo aumento considerevole, con la media che oscilla intorno a 1024 mm; a 15° intorno a 1042 mm e a 20° intorno a 1071÷1072 mm.

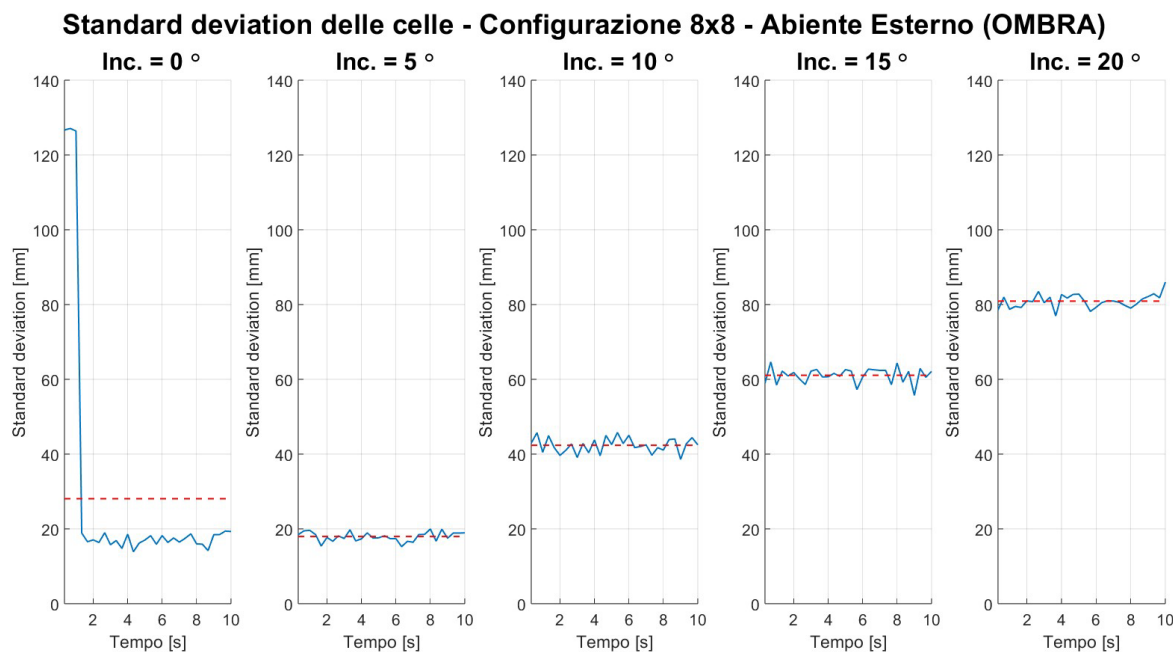


Figura 23. Deviazione standard - Confronto delle inclinazioni a quota di 1000 mm (VL53L8)

Il secondo effetto si osserva nei grafici della deviazione standard, che spiega l'origine dell'espansione del range nel grafico delle misure. A 0°, nel primo secondo, la deviazione standard raggiunge valori elevati fino a circa 127 mm, per poi scendere al di sotto dei 20 mm. A 5° si mantiene intorno ai 18 mm e, escludendo il fallimento della cella a 0°, presenta un andamento pressoché identico a quello dell'inclinazione di 0°. A partire da 10° la deviazione standard inizia ad aumentare in modo significativo, attestandosi intorno ai 42 mm; a 15° intorno ai 61 mm e a 20° intorno agli 81 mm. In pratica, a partire da 5°, ogni incremento di 5° comporta un aumento della deviazione standard di circa 20 mm.

È opportuno precisare che tali valori si riferiscono esclusivamente a una quota di 1000 mm e a condizioni di penombra. Come evidenziato nella sezione precedente, anche la quota influenza la dispersione delle misure, mentre la luce solare diretta aumenta la rumorosità dei dati; entrambi questi fattori si ripercuotono sui valori della deviazione standard.

Questi effetti trovano spiegazione nel fatto che, inclinando il sensore, la luce emessa percorre distanze differenti per raggiungere le singole zone del ricevitore. In configurazione 8x8, con il

senso inclinato lungo un solo asse, le altezze misurate tendono a distribuirsi su 8 quote distinte. Questa tendenza è riscontrabile anche nel grafico delle altezze nel tempo, ma diventa evidente solo ad altezze e inclinazioni elevate, come ad esempio a 1600 mm con un'inclinazione di 20°. L'effetto può tuttavia essere reso visibile anche a quote e inclinazioni inferiori rappresentando i dati come nella figura seguente, dove sono riportati i valori medi nel tempo di ciascuna cella su una griglia.

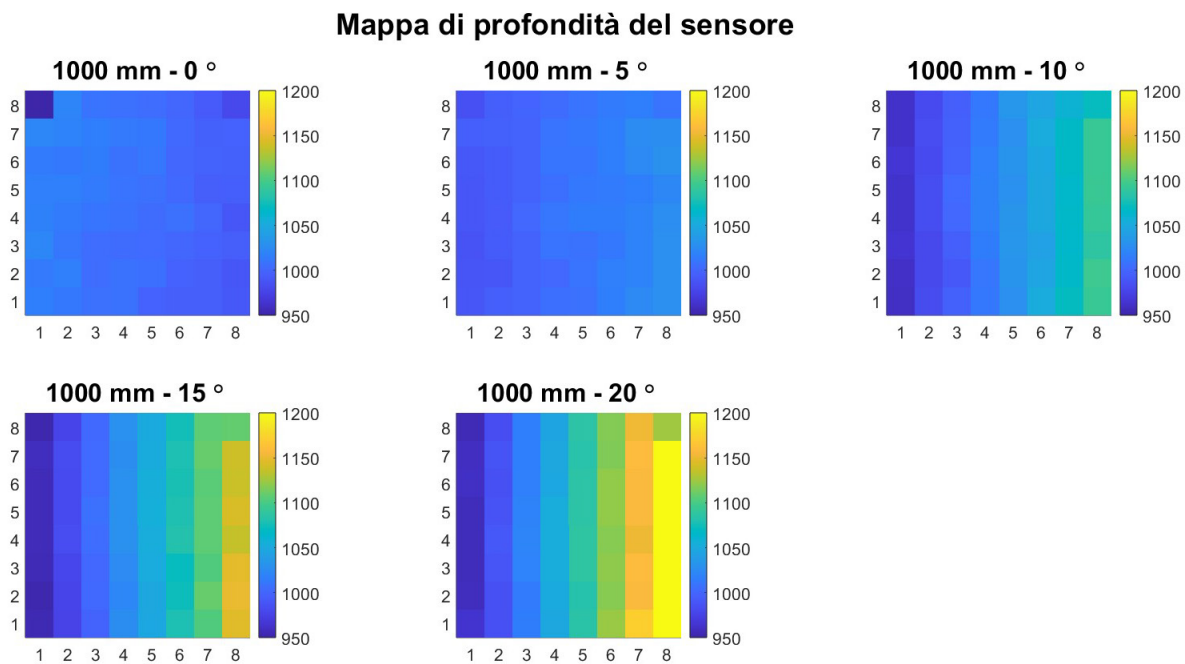


Figura 24. Effetto dell'inclinazione sulla mappa di profondità acquisita dal VL53L8

A 0° e 5° le celle presentano mediamente valori molto simili tra loro, nell'intorno dei 1000 mm. A 0° si nota che una cella in alto a sinistra presenta un valore medio inferiore o uguale a 950 mm, presumibilmente a causa del fallimento nell'acquisizione registrato nel primo secondo. A partire da 10° le altezze si distribuiscono su 8 valori medi distinti, che partono da un minimo di circa 990 mm sul lato sinistro e aumentano progressivamente verso destra fino a circa 1100 mm. A 15° e 20° l'andamento è analogo, con valori minimi sempre nell'intorno dei 990 mm e massimi che raggiungono rispettivamente circa 1150 mm e 1200 mm.

Da questa analisi si conclude che nel prototipo finale sarà necessario correggere la misura in funzione dell'inclinazione del dispositivo.

4.5.3. Influenza della frequenza di campionamento del sensore sulle misure

La frequenza di campionamento è un parametro configurabile del sensore che determina il numero di misure acquisite per secondo. Una frequenza più elevata consente di ottenere un maggior numero di campioni in un dato intervallo di tempo, ma può influire sulla qualità delle singole misure. L'obiettivo di questa analisi è determinare la frequenza di campionamento ottimale, ovvero quella che garantisce il miglior compromesso tra velocità di acquisizione e affidabilità delle misure.

L'analisi è stata condotta in configurazione 8x8, a quota fissa di circa 1000 mm e con inclinazione del sensore mantenuta costante a 0°. L'unico parametro variato è la frequenza di campionamento, per la quale sono stati considerati i valori di 1, 2, 3, 5 e 10 Hz. Nel seguito vengono analizzate e confrontate le acquisizioni registrate in condizioni di penombra e in presenza di luce solare diretta, al fine di valutare l'eventuale interazione tra la frequenza di campionamento e le condizioni di illuminazione ambientale.

Ambiente esterno sotto all'ombra

In condizioni di penombra il sensore presenta il seguente comportamento.

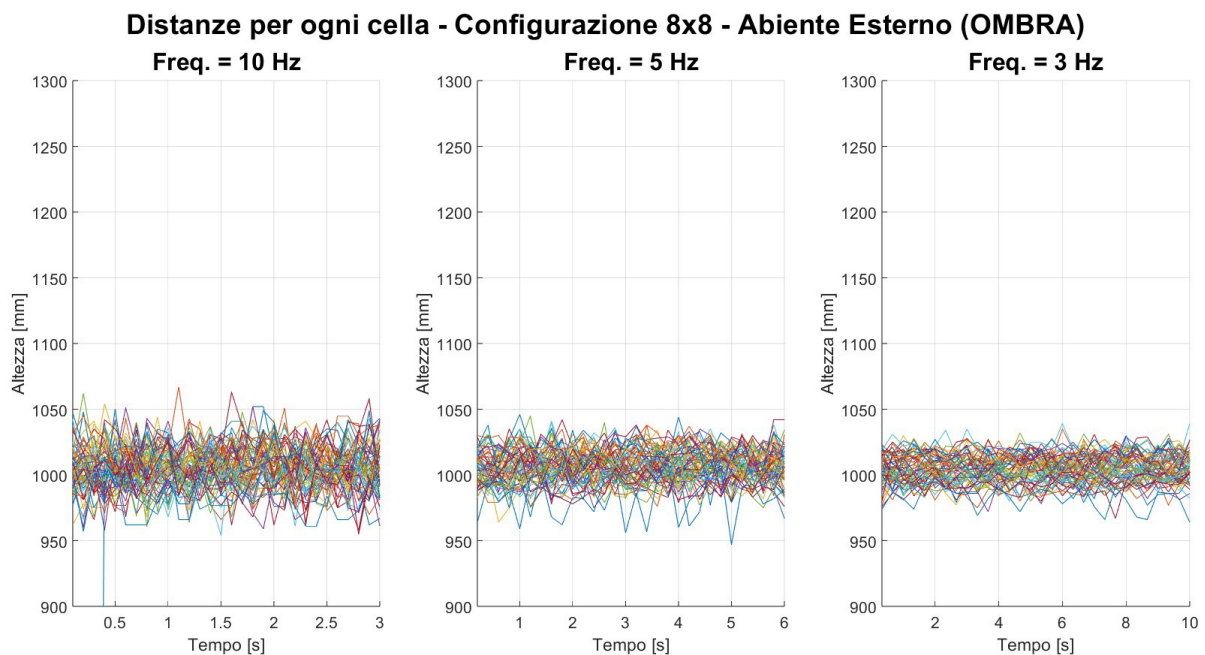


Figura 25. Distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza all'ombra (VL53L8)

Dal primo grafico si osserva che a 10 Hz è presente un livello di rumore superiore rispetto agli altri casi; differenze più contenute si riscontrano anche tra 5 Hz e 3 Hz. I grafici relativi a 2 Hz e 1 Hz non sono stati riportati in quanto indistinguibili dal caso a 3 Hz.

Si riportano di seguito i grafici delle medie e della deviazione standard, al fine di verificare la presenza di variazioni non direttamente apprezzabili nei grafici delle misure.

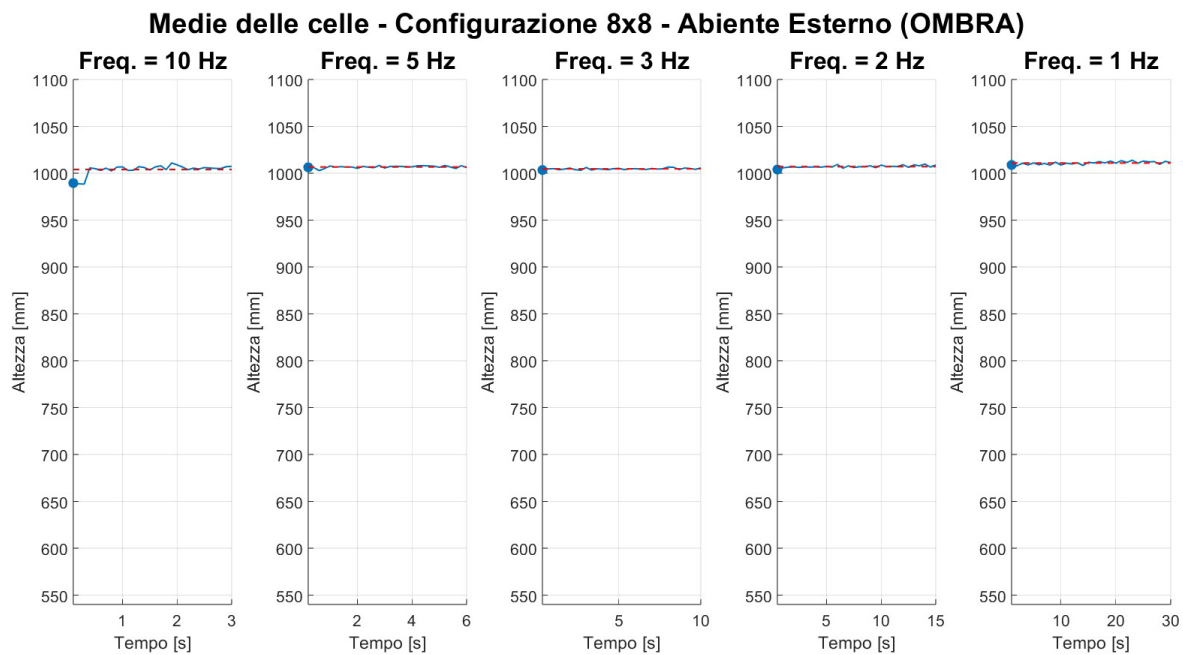


Figura 26. Media delle distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza all'ombra (VL53L8)

Le medie risultano molto stabili e variano nell'intervallo 1004÷1011 mm, a eccezione del tratto iniziale del grafico a 10 Hz, dove i valori si discostano dalla media generale di circa 15 mm a causa del fallimento di una cella. Nonostante ciò, la media complessiva a 10 Hz si attesta intorno a 1004 mm e le differenze rispetto alle altre frequenze non risultano rilevanti.

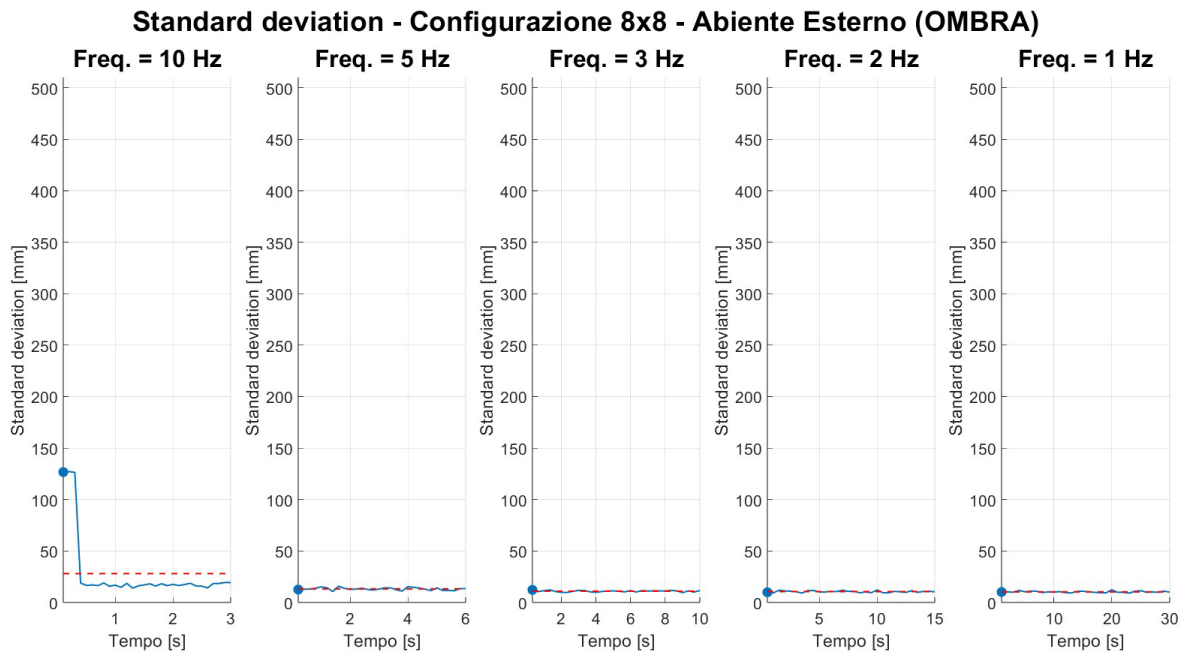


Figura 27. *Deviazione standard - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza all'ombra (VL53L8)*

Le basse fluttuazioni delle medie si riflettono anche sui valori della deviazione standard, che risultano contenuti e stabili: nell'intorno dei 10 mm per le frequenze di 3, 2 e 1 Hz e intorno ai 13 mm a 5 Hz. A 10 Hz il fallimento della cella nel primo secondo produce un picco iniziale di circa 126 mm, che determina un innalzamento della deviazione standard media a 28 mm; escludendo tale intervallo, il valore si attesta intorno ai 16 mm. Al netto di questo episodio, le differenze di deviazione standard tra le frequenze di 10 e 5 Hz rispetto alle frequenze inferiori, sebbene riscontrabili, risultano comprese tra 3 e 6 mm e sono pertanto da considerarsi trascurabili.

Si può quindi concludere che, in condizioni di penombra, la frequenza di campionamento non influenza in modo significativo la qualità delle misure.

Ambiente esterno sotto al sole

In presenza di luce solare diretta la situazione si inverte rispetto a quanto osservato in penombra.

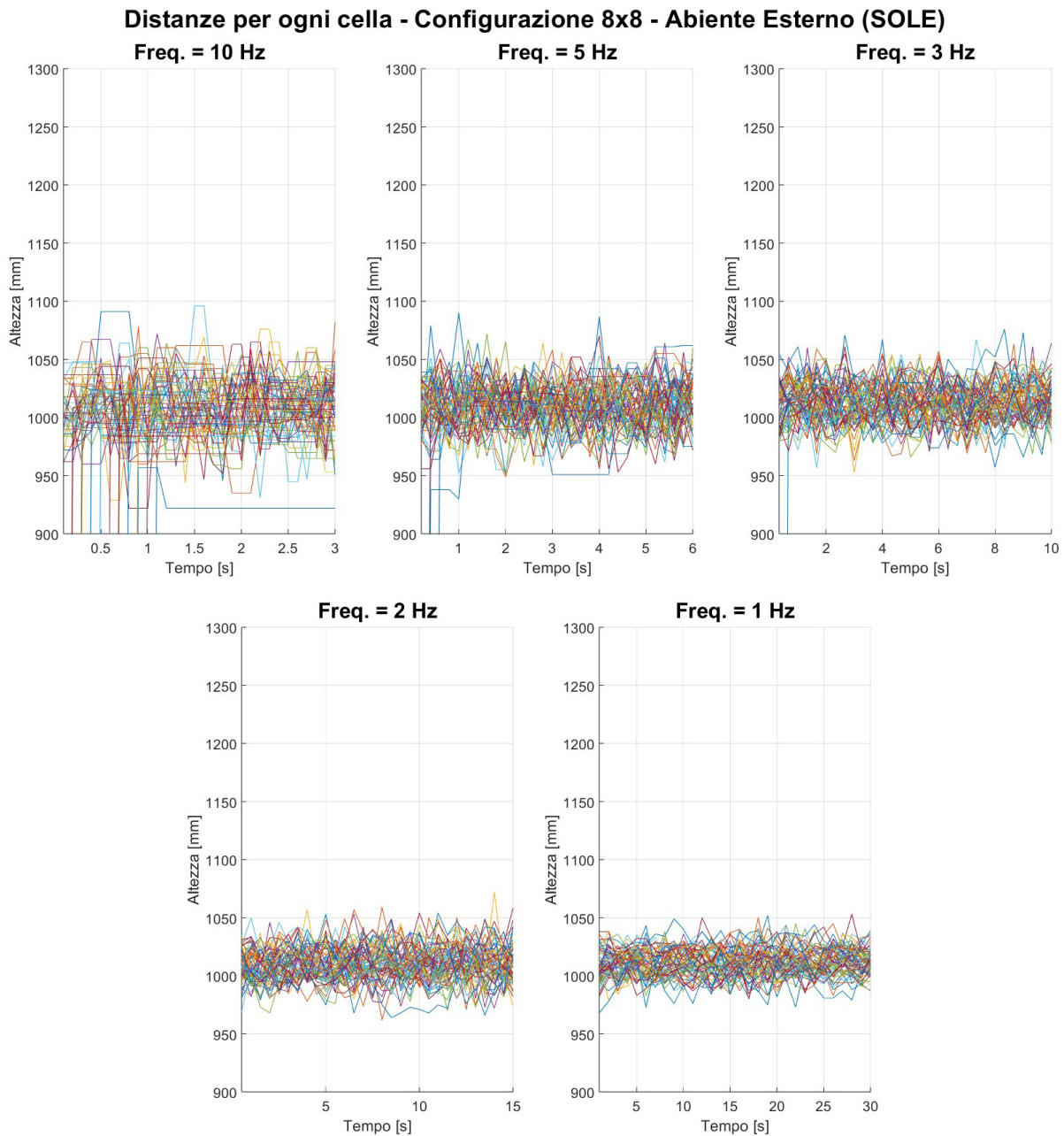


Figura 28. Distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza al sole (VL53L8)

A 10 Hz numerose zone del sensore non funzionano in modo corretto: nella fase iniziale almeno 10 celle non acquisiscono alcun dato e, nell'arco di circa 1 s, riescono a registrare valori solo sporadicamente. Quando una cella restituisce per un intervallo prolungato un valore identico a quello precedente, generando sul grafico un tratto orizzontale, ciò indica che in quel lasso di

tempo non è stato acquisito alcun nuovo campione e il sensore restituisce l'ultimo valore valido salvato in memoria. Sebbene questo comportamento sia preferibile rispetto alla restituzione di un valore nullo o anomalo, costituisce già un sintomo di malfunzionamento; considerando che il dispositivo dovrà operare anche ad altezze superiori, le acquisizioni con questo andamento sono da ritenersi inaffidabili.

A 5 Hz la situazione migliora sensibilmente: si registrano ancora alcuni fallimenti, ma in numero ridotto, e nell'arco di circa 0,5 s tutte le celle o quasi riprendono un andamento regolare. A partire da 3 Hz il problema può considerarsi risolto.

Si osserva inoltre che, rispetto alle condizioni di penombra, la luce solare diretta introduce un livello di rumore più elevato. Se in precedenza i grafici a 3, 2 e 1 Hz risultavano pressoché indistinguibili, in queste condizioni si nota una lieve riduzione della rumorosità al diminuire della frequenza di campionamento.

Questo elevato numero di celle che falliscono nell'acquisizione si ripercuote sia sui valori delle medie sia su quelli della deviazione standard.

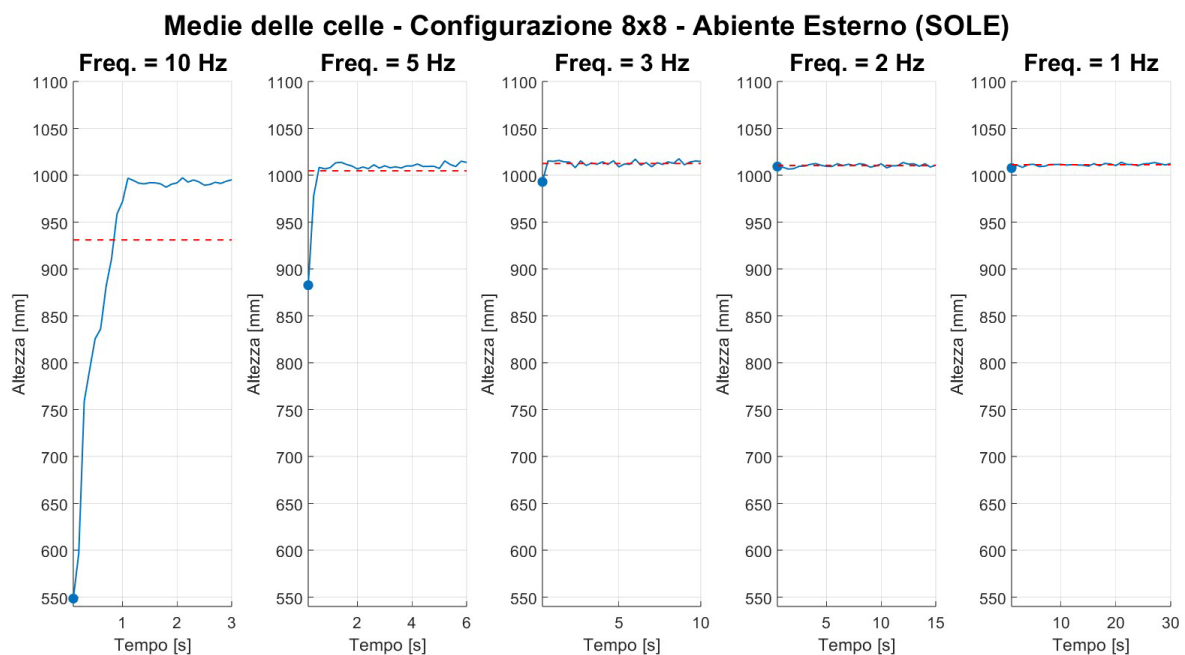


Figura 29. Media delle distanze - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza al sole (VL53L8)

A 10 Hz le medie partono da un valore minimo di 548 mm per poi stabilizzarsi, dopo circa 1 s, nell'intervallo 987÷997 mm; tuttavia, la media complessiva sull'intera durata di 3 s si attesta

intorno a 931 mm. In assenza di filtri, questo comportamento introduce un errore di circa 70 mm, che risulta inaccettabile ai fini dell'applicazione.

A 5 Hz le medie partono da un minimo di 882 mm ma si stabilizzano nell'intervallo 1006÷1013 mm in meno di 0,5 s, e la media complessiva sull'intera durata di 6 s è di circa 1004 mm. A eccezione dei pochi errori iniziali, l'andamento della media nel tempo risulta quindi coerente con il valore medio complessivo.

A 3 Hz le medie partono da un minimo di 993 mm e si assestano progressivamente intorno alla media complessiva, che su una durata di 10 s è pari a 1013 mm. A 2 Hz e 1 Hz non si osservano scostamenti significativi e i valori si mantengono costantemente nell'intervallo 1010÷1011 mm.

Questi andamenti si riflettono anche sui valori della deviazione standard, che a 10 Hz e 5 Hz presentano picchi superiori a 300 mm in corrispondenza degli intervalli di malfunzionamento.

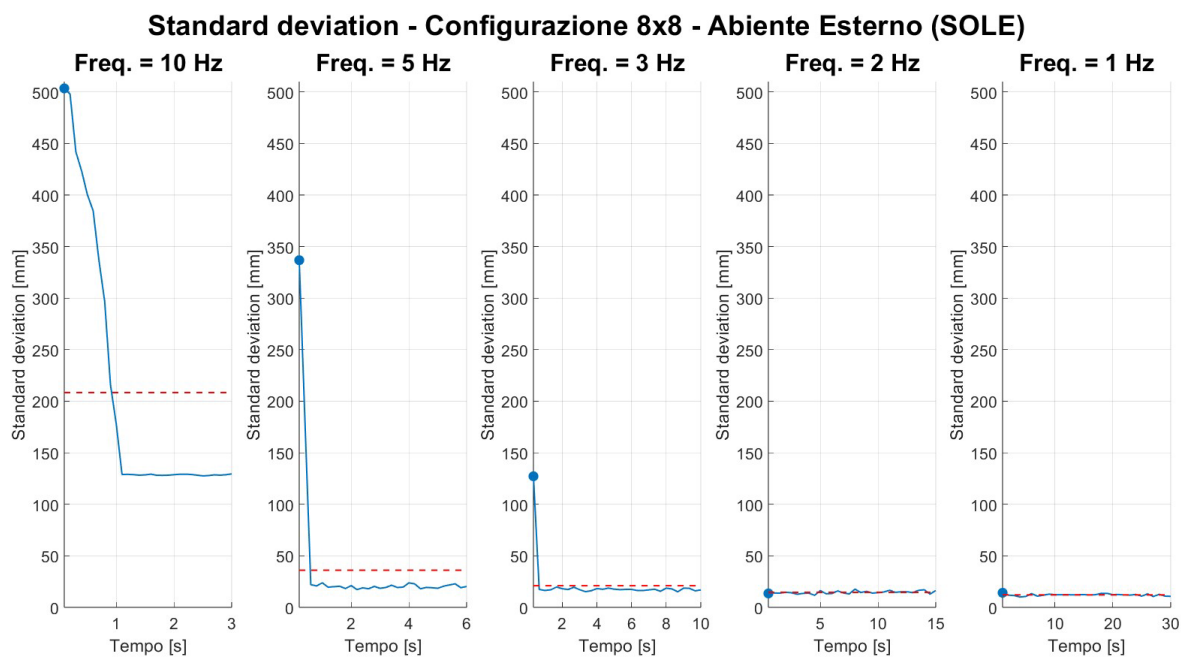


Figura 30. Deviazione standard - Confronto delle frequenze di campionamento a 1000 mm di altezza al sole (VL53L8)

Nei grafici della deviazione standard, a 10 Hz i valori partono da un picco di 503 mm e si stabilizzano intorno ai 128 mm, con una media complessiva sull'intera durata di 3 s di circa 208 mm. Per le frequenze inferiori, dopo circa 1 s i valori si attestano in un intervallo tra 10 e 20 mm, analogamente a quanto osservato in condizioni di penombra: a 5 Hz, dopo un picco iniziale di 337 mm, la deviazione standard si assesta intorno ai 20 mm; a 3 Hz, dopo un picco

di 127 mm, si mantiene tra 15 e 20 mm; a 2 Hz e 1 Hz i valori si stabilizzano rispettivamente intorno a 15 mm e 12 mm.

Sulla base di questi risultati, le frequenze superiori a 5 Hz possono essere scartate: anche escludendo i primi secondi di acquisizione, necessari alla stabilizzazione del sensore, a 10 Hz la deviazione standard rimane nettamente più elevata rispetto a tutte le altre frequenze.

Sebbene le misure a 5 Hz risultino ancora accettabili in queste condizioni, è preferibile escludere anche questa frequenza, in quanto le condizioni ambientali durante le acquisizioni potrebbero non essere state le più gravose. Le prove potrebbero essere state effettuate in una giornata con irraggiamento solare non massimale e, inoltre, sono state condotte a 1000 mm di altezza, quota alla quale il rumore è notevolmente inferiore rispetto a quote più elevate, come ad esempio 2000 mm.

Per questi motivi, si sceglie come frequenza di campionamento ottimale 3 Hz, che consente di acquisire un numero di campioni per secondo maggiore rispetto a 2 Hz e 1 Hz, mantenendo al contempo prestazioni analoghe a quelle delle frequenze inferiori.

4.5.4. Analisi del filtro digitale utilizzato

Come osservato in più occasioni nei paragrafi precedenti, quando una cella fallisce nell'acquisizione restituisce un valore nullo o completamente anomalo, condizionando il risultato finale. Se si calcolasse una semplice media sui valori grezzi generati dal sensore, si potrebbero ottenere errori considerevoli a causa di questi valori errati. È pertanto necessario sviluppare un filtro digitale, da implementare all'interno del firmware, al fine di escludere le misure non valide.

Per questa analisi il sensore viene configurato sia in modalità 4×4 che in modalità 8×8, al fine di valutare le differenze tra le due impostazioni. I dati vengono acquisiti a una frequenza fissa di 3 Hz, con il sensore posizionato a sei altezze distinte (400, 800, 1200, 1400, 1600 e 2000 mm) e con cinque inclinazioni differenti (0°, 5°, 10°, 15° e 20°). Poiché in condizioni di penombra il filtro interviene raramente, nel seguito vengono riportate esclusivamente le analisi effettuate in presenza di luce solare diretta.

Il filtro usa la seguente maschera, che lascia passare solo i valori compresi tra l'intervallo:

$$media\!na - range < distanza_{cella\ i-esima} < media\!na + range$$

con:

$$range = \frac{media\!na}{10} + 100$$

La mediana è calcolata tra le distanze acquisite da tutte le zone del sensore in un dato istante t . Le distanze che non soddisfano la condizione del filtro vengono escluse dal calcolo di parametri quali la media e la deviazione standard.

È stato scelto di creare in questo modo il filtro perché, come verrà mostrato di seguito, consente di rimuovere le distanze eccessivamente distanti dalla mediana, che risultano solitamente associate a stati di acquisizione errati. Si utilizza la mediana come centro del filtro, anziché la media, in quanto essa è meno influenzata dai valori anomali; la media, come evidenziato nel paragrafo precedente, risulta invece fortemente condizionata da pochi valori estremi, originati dal fallimento nell'acquisizione di alcune celle.

Il datasheet del produttore descrive i seguenti stati che il sensore può restituire:

Target status	Description
0	Ranging data are not updated
1	Signal rate too low on SPAD array
2	Target phase
3	Sigma estimator too high
4	Target consistency failed
5	Range valid
6	Wrap around not performed (typically the first range)
7	Rate consistency failed
8	Signal rate too low for the current target
9	Range valid with large pulse (may be due to a merged target)
10	Range valid, but no target detected at previous range
11	Measurement consistency failed
12	Target blurred by another one, due to sharpener
13	Target detected but inconsistent data. Frequently happens for secondary targets.
255	No target detected (only if number of targets detected is enabled)

Figura 31. Stato delle acquisizioni del sensore VL53L8

Il datasheet afferma inoltre che le distanze associate allo stato 5 sono affidabili al 100%, quelle con stato 6 e 9 sono affidabili al 50%, mentre tutte le altre presentano un'affidabilità inferiore al 50%. Il codice di gestione raggruppa gli stati 5 e 9 in un unico stato, denominato stato 0, mentre lo stato 0 originale, associato al fallimento completo dell'acquisizione, viene rinominato stato 255.

Nel seguito vengono riportati gli stati restituiti da ciascuna cella nella condizione più gravosa, ovvero a 2000 mm di altezza con un'inclinazione di 20° in presenza di luce solare diretta, al fine di valutare la qualità delle misure secondo le indicazioni del datasheet. Le mappe degli stati sono riportate per entrambe le configurazioni, 4x4 e 8x8, al fine di consentirne il confronto.

In totale ogni prova contiene 300 misurazioni pertanto ogni cella conterrà al massimo 300 distanze e altrettanti stati.

Gli stati 0 e 6 sono rappresentati congiuntamente, in quanto entrambi associati a misure con affidabilità pari almeno al 50%. Lo stato 6 compare raramente nelle acquisizioni, poiché si manifesta esclusivamente nella fase iniziale di avvio del sensore.

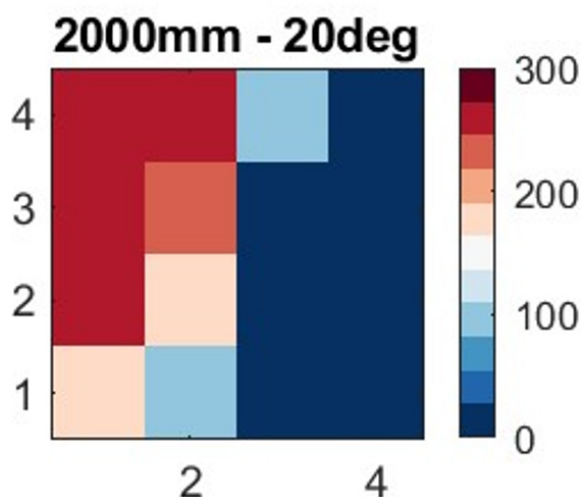


Figura 32. Numero di occorrenze degli stati 0 e 6 in ogni zona del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole

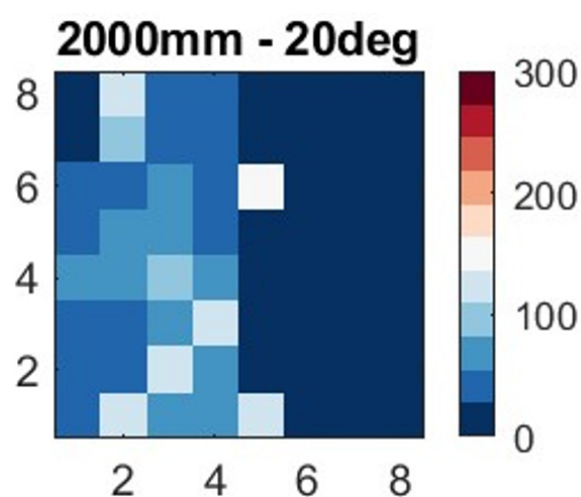


Figura 33. Numero di occorrenze degli stati 0 e 6 in ogni zona del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole

In configurazione 4x4, le celle nell'angolo in alto a sinistra presentano quasi la totalità delle misure con stato 0 o 6, mentre nelle due colonne del lato destro quasi tutte le misure presentano uno stato diverso. Queste due zone sono separate da una fascia di celle con un numero di misure valide compreso tra 100 e 200.

In configurazione 8x8, la porzione destra del sensore presenta nuovamente una quasi totale assenza di misure con stato 0 o 6, mentre nel lato sinistro le celle registrano mediamente non più di 150 misure con tali stati.

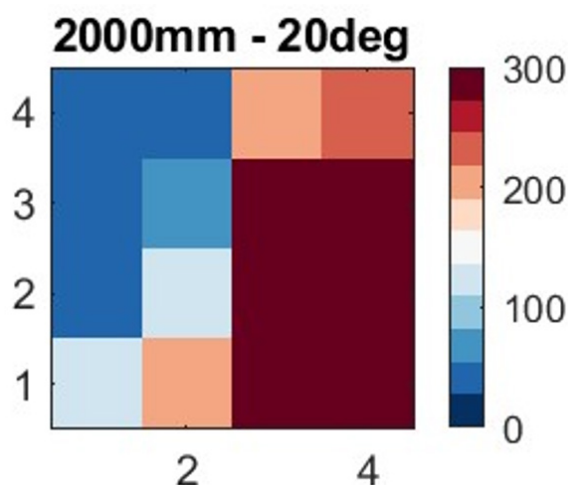


Figura 34. Numero di occorrenze dello stato 10 in ogni zona del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole

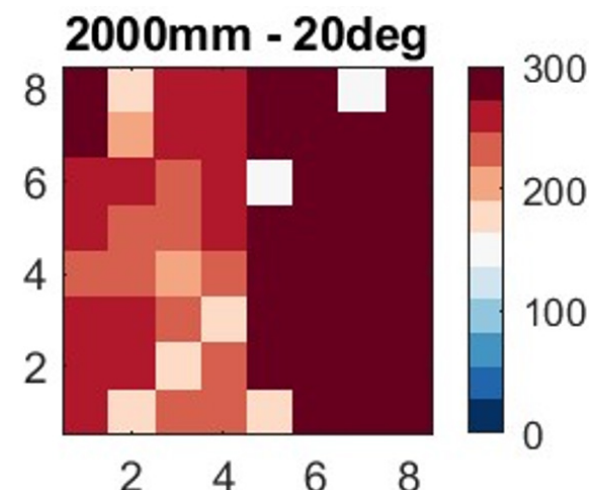


Figura 35. Numero di occorrenze dello stato 10 in ogni zona del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole

Da queste immagini si osserva che lo stato 10 risulta generalmente complementare agli stati 0 e 6: le celle che non restituiscono distanze valide con stato 0 o 6 presentano tipicamente stato 10. In generale, lo stato 10 compare con frequenza elevata nelle misure effettuate in presenza di luce solare diretta e ad altezze elevate; in particolare, a 1600 mm e a 2000 mm, l'80÷90% delle distanze può presentare questo stato.

Nonostante il datasheet indichi per tale stato un'affidabilità inferiore al 50%, si è deciso di considerarlo come stato valido, al pari degli stati 0 e 6. Questa scelta è motivata principalmente dal fatto che le distanze associate allo stato 10 non si discostano significativamente né dai valori delle celle circostanti né dal valore reale, a differenza di quanto accade con gli altri stati non validi. Un'ulteriore ragione è che, ad altezze e inclinazioni elevate, la presenza dello stato 10 è dominante e la sua esclusione comporterebbe una perdita eccessiva di informazioni. Si osserva inoltre che i brevi tratti orizzontali visibili nei grafici delle misure sono tipicamente associati a questo stato.

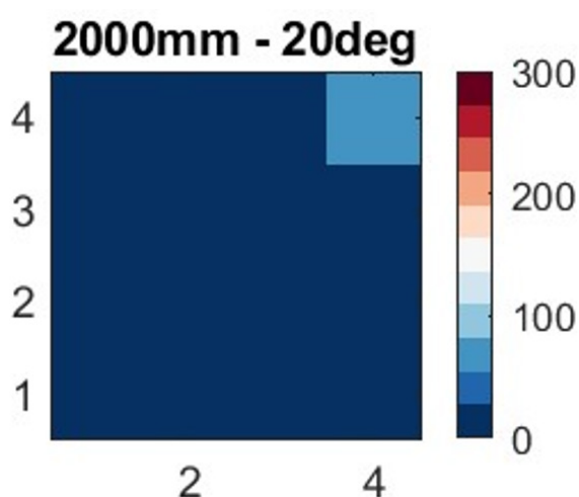


Figura 36. Numero di occorrenze degli stati errati in ogni zona del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole

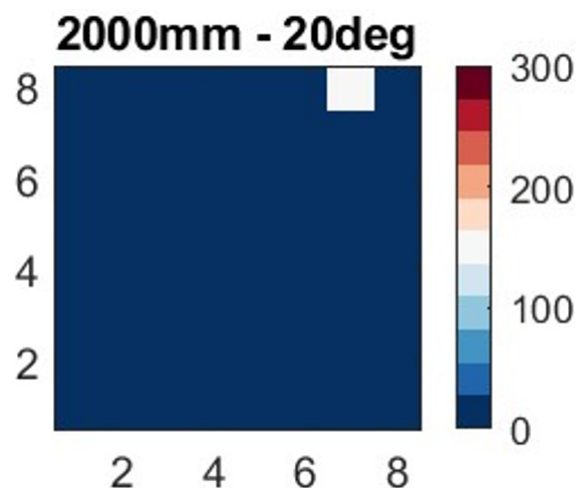


Figura 37. Numero di occorrenze degli stati errati in ogni zona del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole

Per quanto riguarda tutti gli altri stati, diversi da 0, 6 e 10, classificati come non affidabili, essi risultano quasi completamente assenti. Fanno eccezione alcune celle sul bordo del sensore, sia in configurazione 4x4 che in configurazione 8x8, dove si registrano al massimo circa 150 misure con stato non valido. A quote e inclinazioni inferiori, tali stati sono ancora più rari e le mappe risultano quasi interamente uniformi, indicando la quasi totale assenza di misure con stato non affidabile.

Applicazione del filtro ai dati in configurazione 4x4

Di seguito il filtro viene applicato alle distanze acquisite in configurazione 4x4; vengono analizzate tre condizioni rappresentative, selezionate tra le 25 disponibili, al fine di illustrare il comportamento generale del filtro.

Nelle prime tre immagini è indicato su quali celle opera il filtro e con quale intensità; nelle successive tre sono riportate le misure grezze acquisite da ciascuna cella; nelle ultime tre sono riportate le medesime misure dopo l'applicazione del filtro.

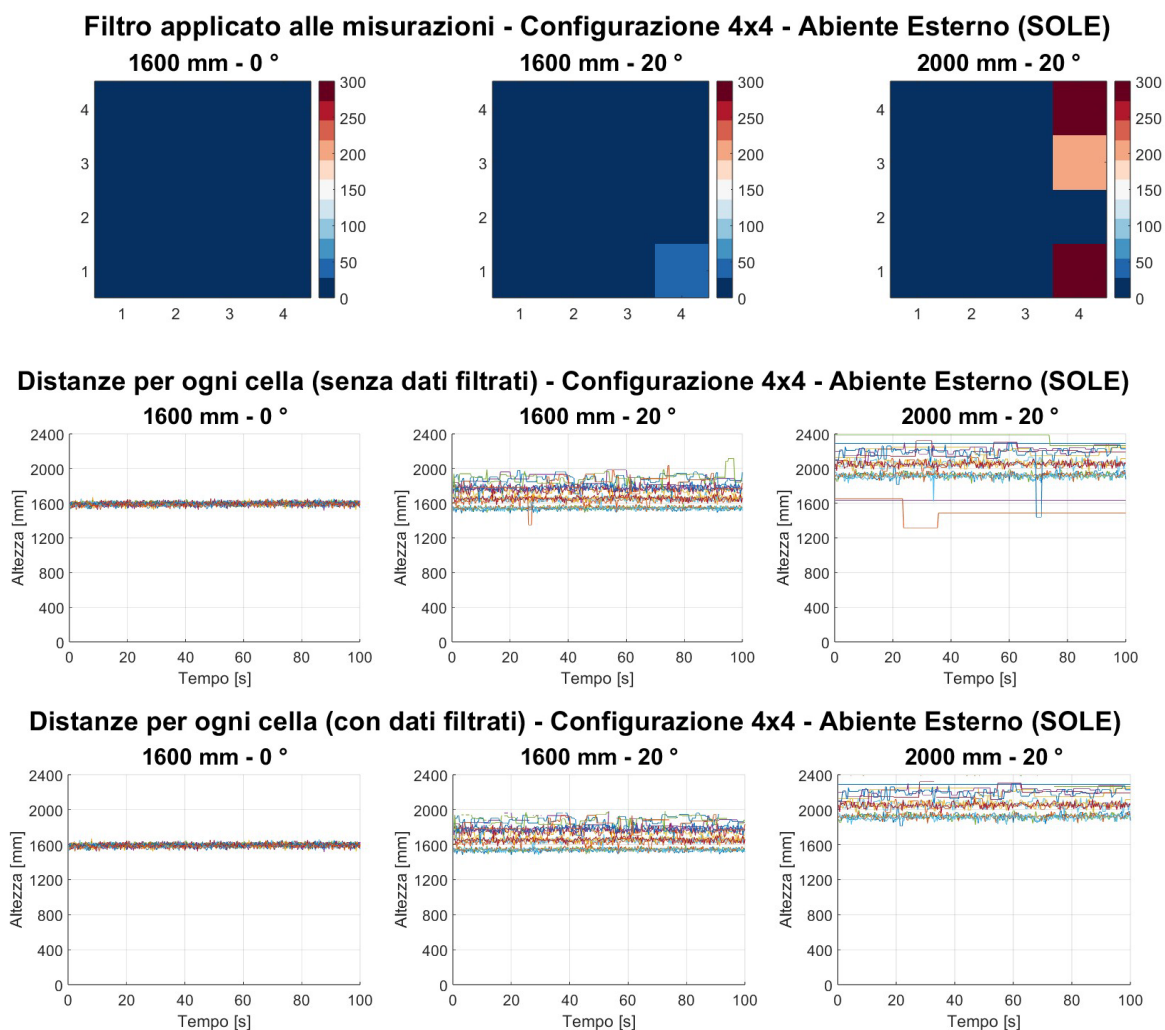


Figura 38. *Applicazione del filtro sulle zone del sensore in configurazione 4x4 sotto al sole*

A 1600 mm di altezza con inclinazione di 0° il filtro non interviene e le immagini corrispondenti risultano identiche. Mantenendo la stessa altezza e inclinando il sensore di 20° , si osserva che sulla cella nell'angolo in basso a destra il filtro rimuove circa 50 misure; nei grafici sottostanti si nota l'eliminazione di alcuni picchi, ad esempio nella fascia temporale tra 20 e 40 s e tra

80 e 100 s. Portando infine l'altezza a 2000 mm e mantenendo l'inclinazione di 20°, il filtro interviene in modo molto più marcato: sulle due celle negli angoli destri vengono rimossi quasi tutti i 300 campioni disponibili e su un'altra cella sul bordo destro ne vengono eliminati ulteriori 200, mentre sulle restanti celle l'intervento è nullo o trascurabile. Nei grafici corrispondenti si osserva chiaramente la scomparsa di due andamenti attestati intorno a 1600 mm e di un ulteriore andamento intorno a 2400 mm nei primi 70 s, oltre all'eliminazione dei picchi anomali residui.

In generale, il filtro interviene esclusivamente ad altezze e inclinazioni elevate. La condizione in cui l'intervento è più marcato è quella a 2000 mm con inclinazione di 20°, dove vengono eliminati tutti i valori delle due celle agli angoli. In questa condizione si evidenzia in modo più chiaro la capacità del filtro di rimuovere le distanze anomale senza alterare quelle coerenti con i valori circostanti.

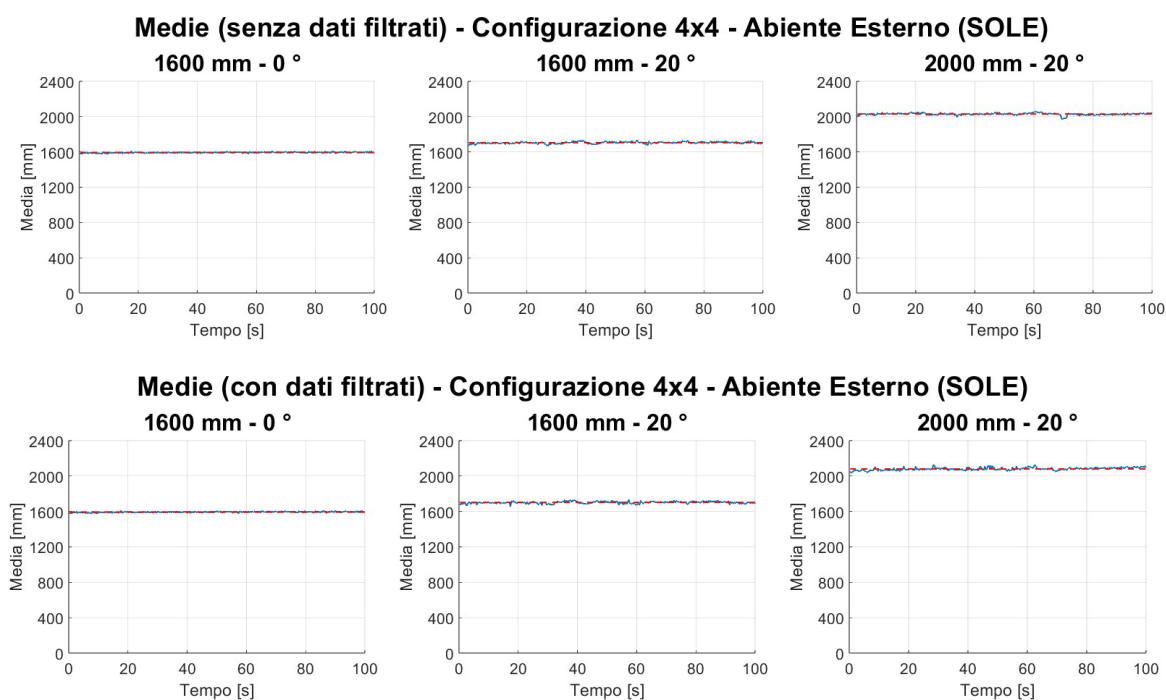
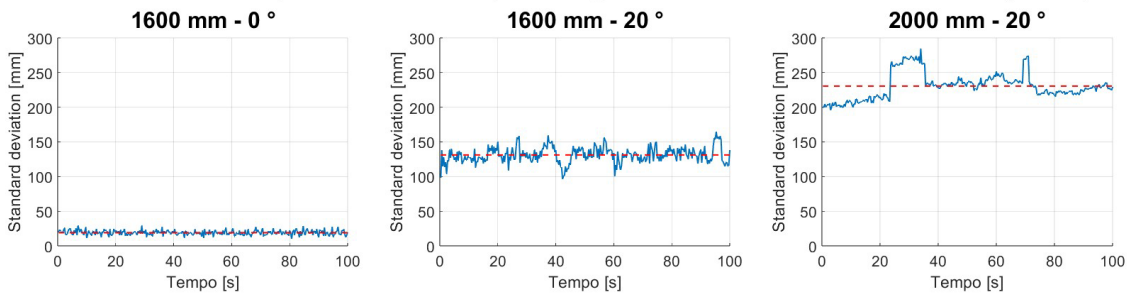


Figura 39. *Confronto delle medie senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 4x4*

In configurazione 4x4 l'effetto del filtro sulle medie è contenuto, ma si osserva una lieve riduzione del rumore e un andamento più stabile nel tempo.

Standard deviation (senza dati filtrati) - Configurazione 4x4 - Ambiente Esterno (SOLE)



Standard deviation (con dati filtrati) - Configurazione 4x4 - Ambiente Esterno (SOLE)

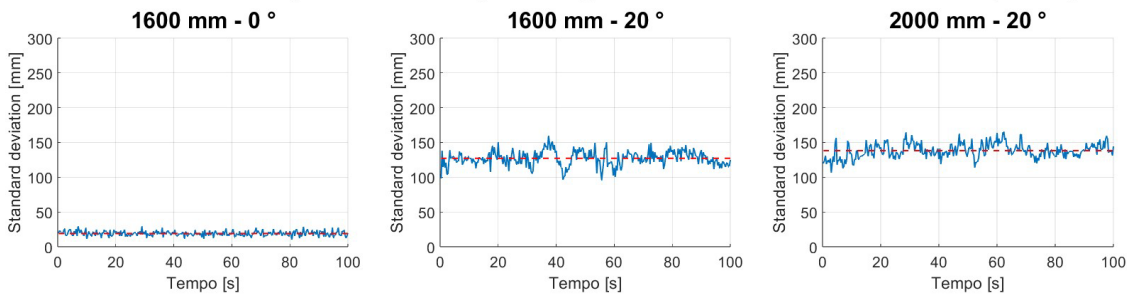


Figura 40. Confronto delle standard deviation senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 4x4

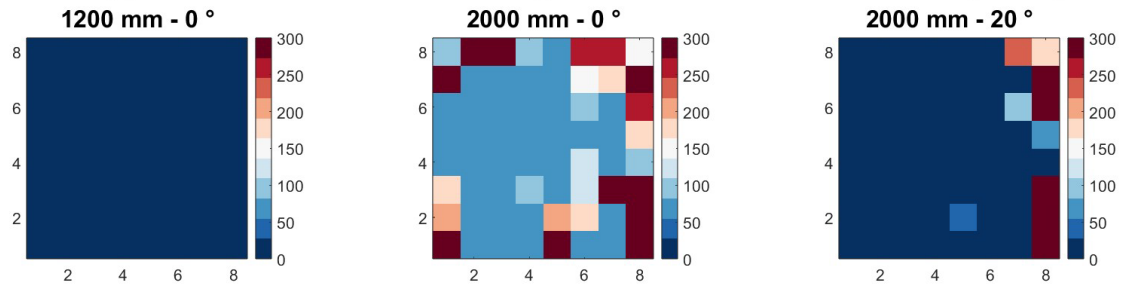
L'effetto del filtro risulta più evidente sui valori della deviazione standard, dove si ottiene una riduzione considerevole. Nelle condizioni in cui il numero di valori anomali è elevato, come nel caso a 2000 mm con inclinazione di 20°, i picchi passano da circa 280 mm a una curva più regolare con valori massimi intorno a 165 mm. Nelle condizioni in cui il filtro interviene in misura minore, l'effetto si limita all'abbassamento di alcuni picchi isolati.

Applicazione del filtro ai dati in configurazione 8 per 8

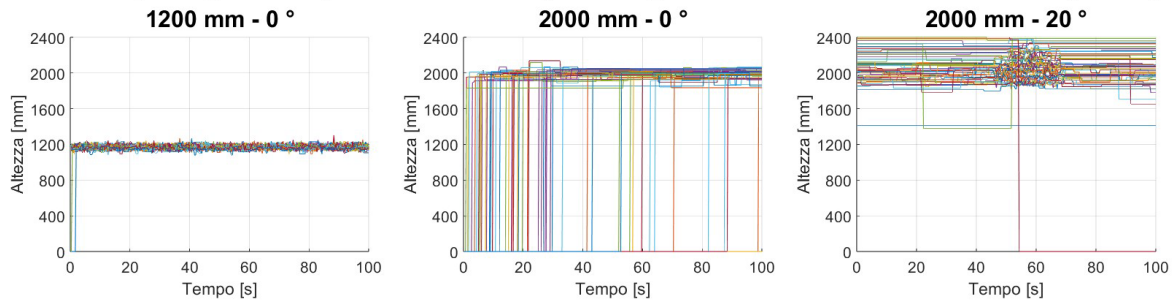
Il filtro viene ora applicato alle distanze acquisite in configurazione 8×8. Come in precedenza, nelle prime tre immagini è indicato su quali celle opera il filtro e con quale intensità; nelle successive tre sono riportate le misure grezze acquisite da ciascuna cella; nelle ultime tre sono riportate le medesime misure dopo l'applicazione del filtro.

Sono state selezionate tre condizioni differenti rispetto a quelle analizzate in configurazione 4x4, al fine di illustrare il caso limite in cui il filtro interviene poco o nulla, una situazione intermedia e il caso estremo in cui l'intervento del filtro è massimo.

Filtro applicato alle misurazioni - Configurazione 8x8 - Ambiente Esterno (SOLE)



Distanze per ogni cella (senza dati filtrati) - Configurazione 8x8 - Ambiente Esterno (SOLE)



Distanze per ogni cella (con dati filtrati) - Configurazione 8x8 - Ambiente Esterno (SOLE)

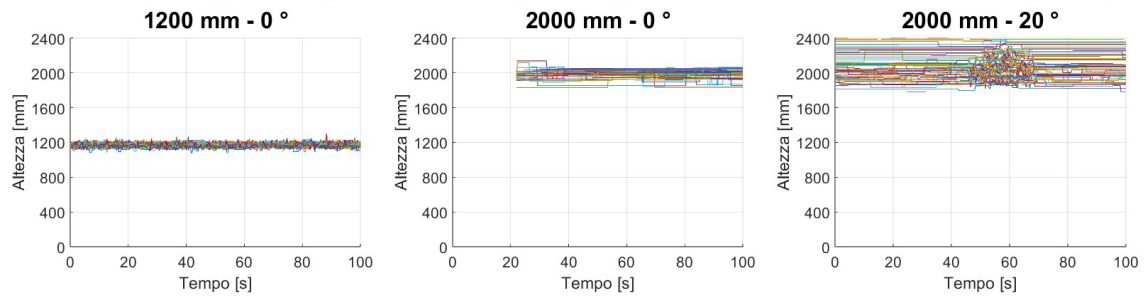


Figura 41. Applicazione del filtro sulle zone del sensore in configurazione 8x8 sotto al sole

In configurazione 8x8 il filtro non interviene fino a 1200 mm con inclinazione di 0°; al di sopra di tale soglia, l'intervento aumenta progressivamente all'aumentare dell'altezza o dell'inclinazione.

Il caso più critico si registra a 2000 mm con inclinazione di 0°, dove il filtro interviene su tutte le celle per almeno circa 100 volte. Per tutta la durata della prova si osservano linee verticali che indicano l'istante in cui ciascuna cella riesce ad acquisire per la prima volta un valore valido. Nei primi 20 s la maggior parte delle celle non funziona correttamente, portando la mediana a zero e inducendo il filtro a eliminare tutti i campioni, compresi quelli prossimi al valore reale. Trascorsi i primi 20 s, quando la maggior parte delle misure si avvicina al valore reale, il filtro rimuove i valori anomali residui lasciando quelli più corretti. Si osserva comunque che a 2000 mm, anche dopo l'applicazione del filtro, i dati presentano tratti orizzontali prolungati, sintomo della presenza dello stato 10 e quindi di una affidabilità ridotta.

A 2000 mm con inclinazione di 20° la situazione risulta paradossalmente migliore: il filtro interviene prevalentemente sulle celle ai bordi, lasciando sostanzialmente inalterate quelle interne, come avviene nella maggior parte degli altri casi. Questo comportamento è probabilmente riconducibile a condizioni di irraggiamento solare più intense durante l'acquisizione a 0°, il che spiegherebbe perché le misure a inclinazione nulla risultino peggiori rispetto a quelle acquisite con un'inclinazione di 20°.

In generale, in configurazione 8x8 si registra un aumento considerevole dei valori anomali, con ripercussioni evidenti sui grafici delle medie e delle deviazioni standard.

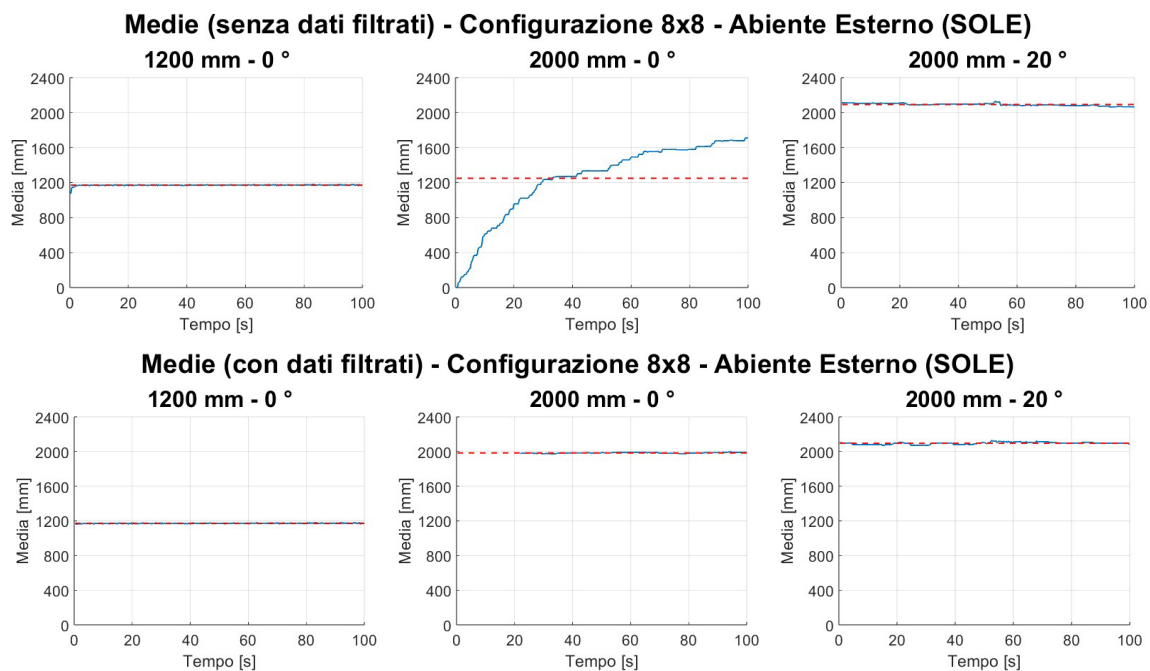


Figura 42. Confronto delle medie senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 8x8

Fino a 1200 mm con inclinazione di 0° non si osservano variazioni apprezzabili; a quote e inclinazioni superiori le medie tendono ad appiattirsi e a presentare un andamento meno rumoroso, analogamente a quanto osservato in configurazione 4x4. A 2000 mm con inclinazione nulla, senza l'applicazione del filtro le medie partono da 0 mm e crescono progressivamente fino a circa 1700 mm, con una media complessiva di circa 1250 mm. Dopo l'applicazione del filtro questo andamento scompare e la media si mantiene pressoché costante nell'intorno di 1984 mm, con una lacuna nei primi 20 s in corrispondenza dell'intervallo privo di misure valide.

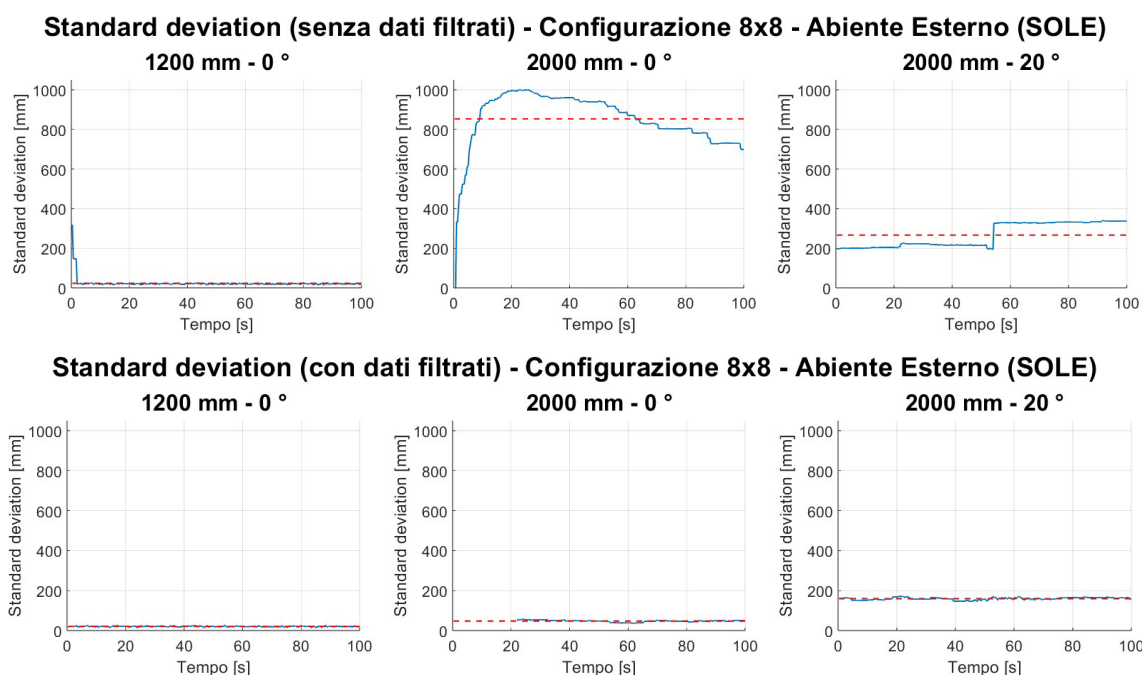


Figura 43. Confronto delle standard deviation senza l'applicazione del filtro e quelle filtrate in configurazione 8x8

A 1200 mm con inclinazione di 0° la deviazione standard parte da valori relativamente elevati per poi decrescere fino a valori comparabili a quelli della configurazione 4×4. Un andamento analogo si osserva a 1200 mm con inclinazioni di 5° e 15° e a 1600 mm con inclinazione di 0°. In assenza di filtro, a 2000 mm per tutte le inclinazioni da 0° a 20° e a 1600 mm con inclinazioni di 15° e 20°, le deviazioni standard si mantengono su valori elevati, compresi tra un minimo di circa 220 mm e un massimo prossimo a 1000 mm. In particolare, a 2000 mm con inclinazione di 0°, la deviazione standard parte da 0 mm, cresce rapidamente fino a circa 1000 mm per poi stabilizzarsi nell'intervallo 700÷800 mm.

Dopo l'applicazione del filtro tutte le curve della deviazione standard risultano più regolari e i valori scendono al di sotto di 165 mm. Anche a 2000 mm con inclinazione di 20° il filtro riduce sensibilmente la deviazione standard, che si attesta nell'intorno dei 100 mm con un andamento sostanzialmente costante. Al netto della consueta assenza di dati nei primi 20 s, questa analisi conferma il miglioramento sostanziale introdotto dal filtro anche nelle condizioni di acquisizione più gravose.

Da questa analisi si conclude che il filtro è indispensabile in condizioni critiche, ovvero in presenza di luce solare diretta e ad altezze e inclinazioni elevate. Si conclude inoltre che la configurazione ottimale per l'applicazione allo stadiometro è la configurazione 4×4: sebbene le

criticità della configurazione 8x8 vengano in larga parte risolte dal filtro, un irraggiamento solare più intenso rispetto a quello presente durante i test potrebbe compromettere il funzionamento dello strumento, a causa della maggiore sensibilità alla luce di tale configurazione, come evidenziato dal caso a 2000 mm con inclinazione di 0°.

4.5.5. Curve di calibrazione

In quest'ultima analisi si sfruttano tutte le informazioni raccolte nelle analisi precedenti al fine di ottenere una curva di calibrazione per il sensore. Si è pertanto deciso di utilizzare una frequenza di campionamento di 3 Hz e di impostare la configurazione in modalità 4x4. Da questo punto in poi i dati verranno sempre filtrati con la logica descritta nel paragrafo precedente.

Prima di illustrare come è stata ottenuta la retta di calibrazione per le altezze, è opportuno chiarire cosa sono le ratio che compariranno nei grafici successivi e il loro rapporto con l'inclinazione reale delle misure. Per ogni misurazione si calcola, per ciascuna riga, la sommatoria delle differenze tra i valori di colonne adiacenti; si mediano poi i quattro valori risultanti, ottenendo la cosiddetta **delta y**. In modo analogo si calcola la **delta x**: si calcolano le differenze tra righe adiacenti per ciascuna colonna, si sommano tali differenze e si mediano i valori risultanti. Entrambi i delta vengono infine divisi per la distanza media misurata dal sensore, ottenendo rispettivamente **ratio y** e **ratio x**.

Poi, si è verificato se esistesse una qualche relazione tra le ratio e le inclinazioni del sensore. Quindi, per ogni set di misurazioni, cioè per ogni prova condotta ad una certa altezza ed inclinazione, si calcolano le ratio medie e si tracciano cinque rette, una per ciascuna altezza, in un grafico con le ratio in ordinata e le inclinazioni reali in ascissa.

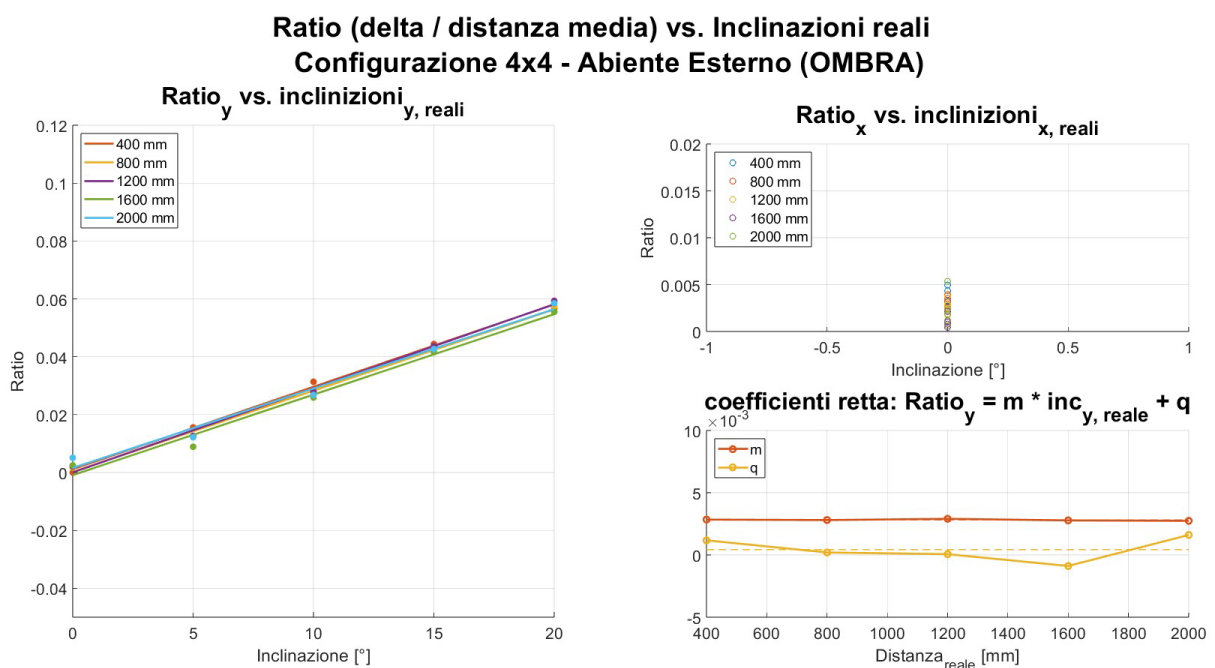


Figura 44. Ratio vs. Inclinazioni reali in configurazione 4x4 all'ombra

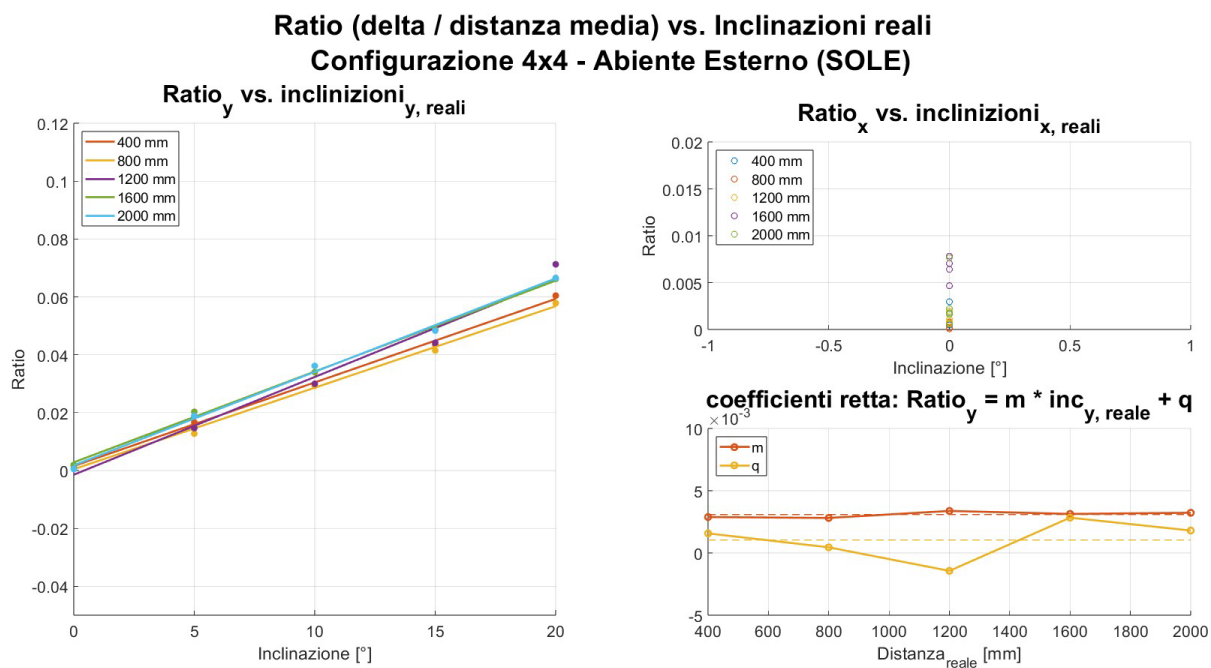


Figura 45. Ratio vs. Inclinazioni reali in configurazione 4x4 al sole

Sia nelle misurazioni eseguite all'ombra sia in quelle eseguite al sole si osserva una relazione lineare tra le ratio y e le inclinazioni del sensore; inoltre, le rette tendono a essere molto vicine le une alle altre. A conferma di ciò, nel terzo grafico sono riportati i parametri delle rette: la *pendenza* m risulta molto simile nelle due condizioni ambientali e costante al variare delle altezze, mentre l'*intercetta* q tende a variare maggiormente a seconda del caso, sebbene le variazioni non siano particolarmente significative.

Da quanto detto si può evincere che le ratio sono abbastanza indipendenti sia dalla luminosità ambientale sia dalla variazione dell'altezza e possono pertanto essere utilizzate per stimare le inclinazioni del sensore.

Nel secondo grafico non sono presenti rette, poiché il sensore è stato inclinato solo attorno all'asse y; si osserva quindi la sola variazione delle ratio x all'inclinazione di 0°. Le ratio raggiungono un massimo di circa 0.008 e, confrontando questo valore con i grafici sulla sinistra (ratio y vs. inclinazione), si può dedurre un errore approssimativo di 3°÷5° nella stima dell'inclinazione: quando il sensore è parallelo al suolo la ratio dovrebbe essere 0, mentre nella realtà, con i parametri attesi per la retta di calibrazione, si stimeranno valori di 3°÷5° a causa di ratio uguali o superiori a 0.008.

Prima di costruire la retta per la stima delle inclinazioni, si sono uniti i dataset delle misure acquisite alla medesima altezza e inclinazione ma in condizioni di illuminazione diverse, poiché nella pratica il dispositivo non distinguerà se le misure vengono eseguite sotto il sole o meno. Si ottiene così un nuovo dataset di dimensioni 25x600x16 (25 prove a quota z con inclinazione i , 600 acquisizioni totali e 16 celle del sensore per ogni rilevazione). Per ottenere valori più stabili, si esegue una media ogni secondo, ovvero ogni 3 campioni, riducendo il dataset a 25x200x16.

Si procede quindi al calcolo delle ratio x e y, ottenendo due matrici 25x200. I dati vengono raggruppati in base all'inclinazione, così da ottenere un dataset 5x1000 in cui ogni riga contiene 1000 ratio calcolate da misure alla medesima inclinazione ma ad altezze differenti. In questo modo le ratio risultano indipendenti sia dall'intensità luminosa ambientale sia dalle altezze; tramite la funzione *fitlm* si costruisce quindi un modello lineare e la relativa retta di calibrazione delle inclinazioni.

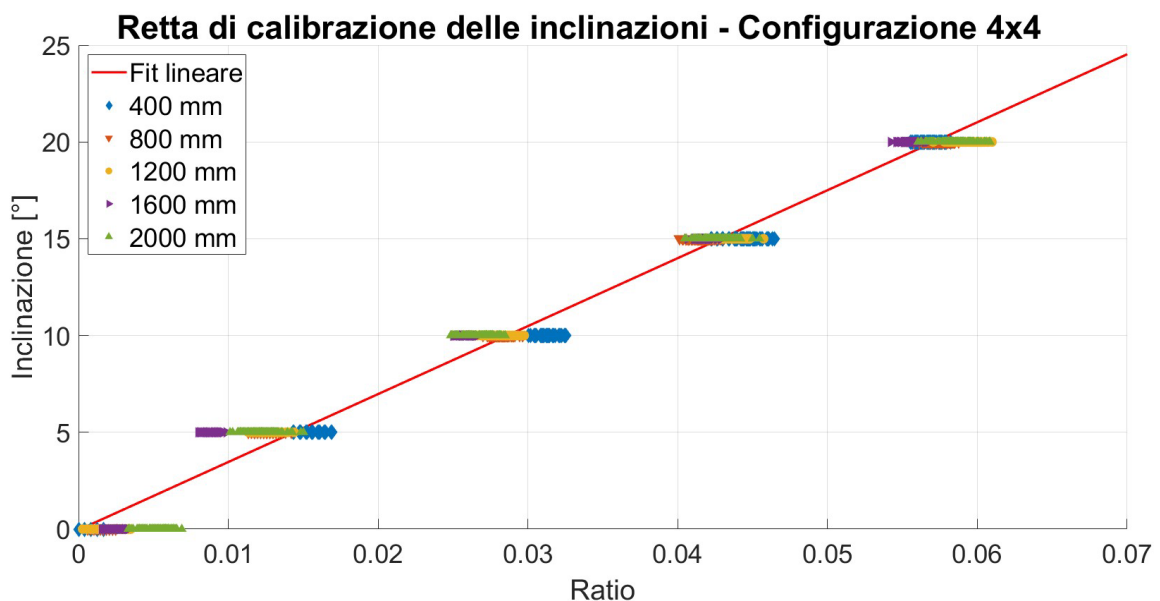


Figura 46. Retta di calibrazione delle inclinazioni

La retta presenta un'intercetta di 351.05 e un coefficiente angolare di -0.0447. Entrambi i parametri hanno un p-value prossimo a 0 e sono quindi statisticamente significativi ($p \ll 0.05$). R^2 e R^2 aggiustato risultano entrambi pari a 0.988; l'uguaglianza dei due valori indica assenza di overfitting. L'RMSE è pari a 0.78° circa.

Tramite la funzione *predict*, si applica il modello lineare alla matrice 5x1000 delle ratio, ottenendo la matrice delle inclinazioni stimate. Si prende quindi la matrice delle distanze medie misurate dal sensore ad ogni secondo e la si ridimensiona allo stesso formato 5x1000. Per ogni elemento (i, j) si calcola l'altezza stimata con la formula:

$$altezza_{media, stimata}(i, j) = distanza_{media misurata}(i, j) * \cos(inclinazione_{predetta}(i, j))$$

Si utilizzano infine *fitlm* e *predict* per ottenere la retta di calibrazione per le altezze.

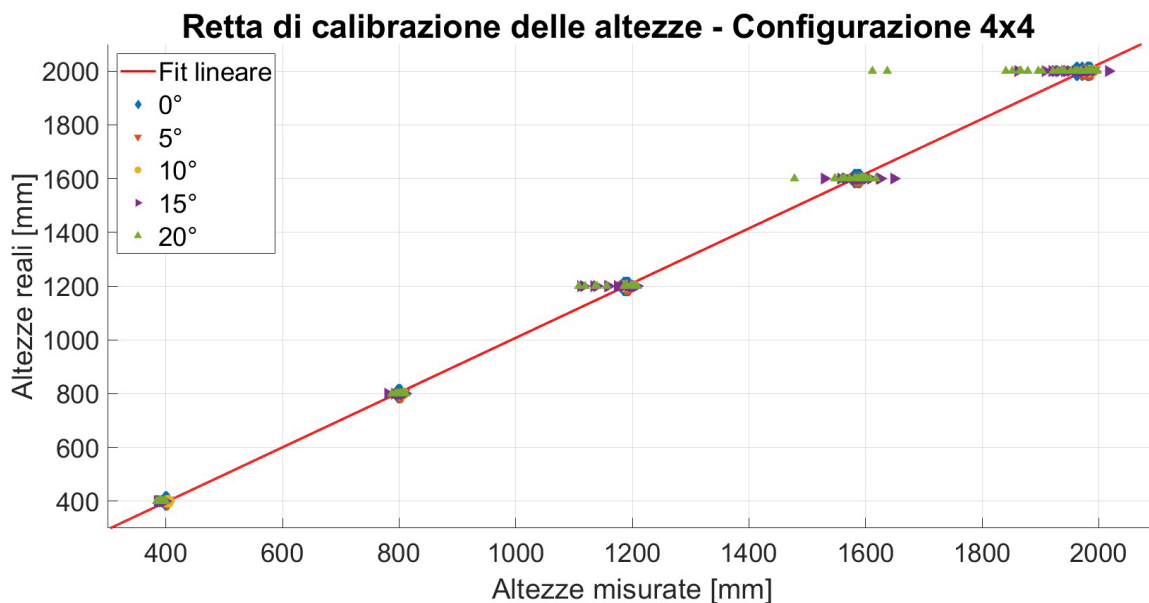


Figura 47. Retta di calibrazione delle altezze

La retta presenta un'intercetta di -10.472 mm e un coefficiente angolare di 1.018. Anche in questo caso entrambi i parametri sono statisticamente significativi dato che p-value è prossimo a 0. R^2 e R^2 aggiustato sono entrambi pari a 0.998, quindi il modello non è in overfitting. Infine, l'RMSE è pari a 23.9 mm.

Il modello si adatta molto bene ai dati dato che R^2 tende a 1, tuttavia l'RMSE è relativamente elevato, imputabile sia all'errore nella stima delle inclinazioni sia all'errore intrinseco del sensore durante l'acquisizione della distanza. Su quest'ultimo non è possibile intervenire; analizzando però la matrice delle inclinazioni stimate si notano valori che superano i 20°, arrivando anche a 30°. Si propone quindi di filtrare i dati con inclinazione α superiore a una certa soglia e di ricostruire la retta di calibrazione. Vengono testate 5 soglie (25°, 20°, 15°, 10° e 5°) ottenendo i parametri riportati di seguito.

	$\alpha < 25^\circ$	$\alpha < 20^\circ$	$\alpha < 15^\circ$	$\alpha < 10^\circ$	$\alpha < 5^\circ$
Intercetta [mm]	-9.10	-9.37	-9.33	-9.63	-9.50
Coefficiente angolare	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
RMSE [mm]	14.0	10.8	9.1	7.7	7.4

Tabella 1. Parametri della curva di calibrazione delle altezze con inclinazioni limitate

Si nota subito che, anche escludendo alcune misure in base all'inclinazione, la retta di calibrazione mantiene il coefficiente angolare pressoché costante attorno a 0.99, mentre l'intercetta varia leggermente; nel complesso, tuttavia, le variazioni si possono considerare trascurabili.

Per quanto riguarda l'RMSE, già considerando valide solo le misure con inclinazione stimata inferiore a 25° si ottiene una riduzione di circa 8.5 mm. Escludendo anche le misure con inclinazione superiore a 20° si ottiene un'ulteriore diminuzione, raggiungendo un RMSE di 10.5 mm; abbassando invece la soglia a 15° non si registrano miglioramenti sostanziali. Riducendo ulteriormente la soglia a 10° o 5° si arriva a un RMSE di $7\div 8$ mm, ma ciò richiederebbe che l'operatore posizioni con molta precisione lo strumento, mantenendo il sensore parallelo al terreno per periodi prolungati.

Poiché l'RMSE non diminuisce in maniera significativa scegliendo soglie di 15° , 10° o 5° , si è deciso di adottare 20° come soglia di filtraggio: in questo modo lo strumento può funzionare correttamente anche in presenza di un posizionamento non ottimale da parte dell'operatore.

4.5.6. Prestazioni medie nel tempo

Prima di passare al capitolo successivo, si è analizzato come variano la media, la deviazione standard e l'errore standard nel tempo; in particolare si vuole verificare se, con l'aumentare delle informazioni disponibili, ovvero con il trascorrere del tempo, si osservi un miglioramento delle prestazioni.

Per costruire i grafici seguenti sono state unite le misure eseguite alla medesima quota e i valori sono stati mescolati casualmente al fine di simulare un operatore che esegue misurazioni a mano. A differenza del supporto rigido, l'operatore non manterrà la mano ferma e le inclinazioni risulteranno quindi più variabili.

Ambiente esterno sotto all'ombra

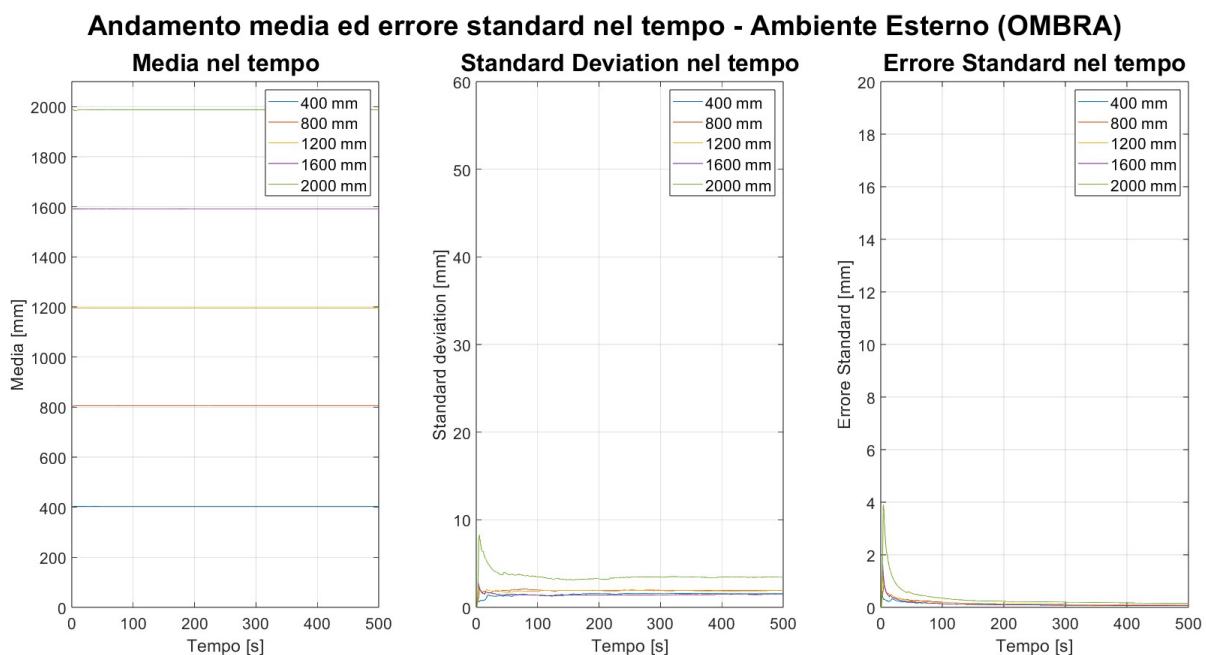


Figura 48. Andamenti delle medie, delle deviazioni standard e degli errori standard nel tempo all'ombra

All'ombra le prestazioni del sensore risultano ottimali già dai primi secondi. È utile notare come, mediando anche solo poche misure, i risultati si stabilizzino rapidamente. Ciò è confermato anche dalla deviazione standard (σ), che si mantiene sempre bassa e costante, rimanendo al di sotto di circa 5 mm.

Nel terzo grafico sono riportati gli andamenti dell'errore standard (SE), calcolato tramite la seguente formula:

$$E_s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

dove n è il numero di campioni.

Si osserva come l'errore standard cresca inizialmente fino a un massimo, per poi decrescere rapidamente: la deviazione standard rimane infatti pressoché costante mentre il numero di dati continua ad aumentare.

Il sensore all'ombra conferma ancora una volta l'assenza di criticità prestazionali: l'errore standard si mantiene inferiore a 2 mm anche per altezze fino a 2000 mm.

Ambiente esterno sotto al sole

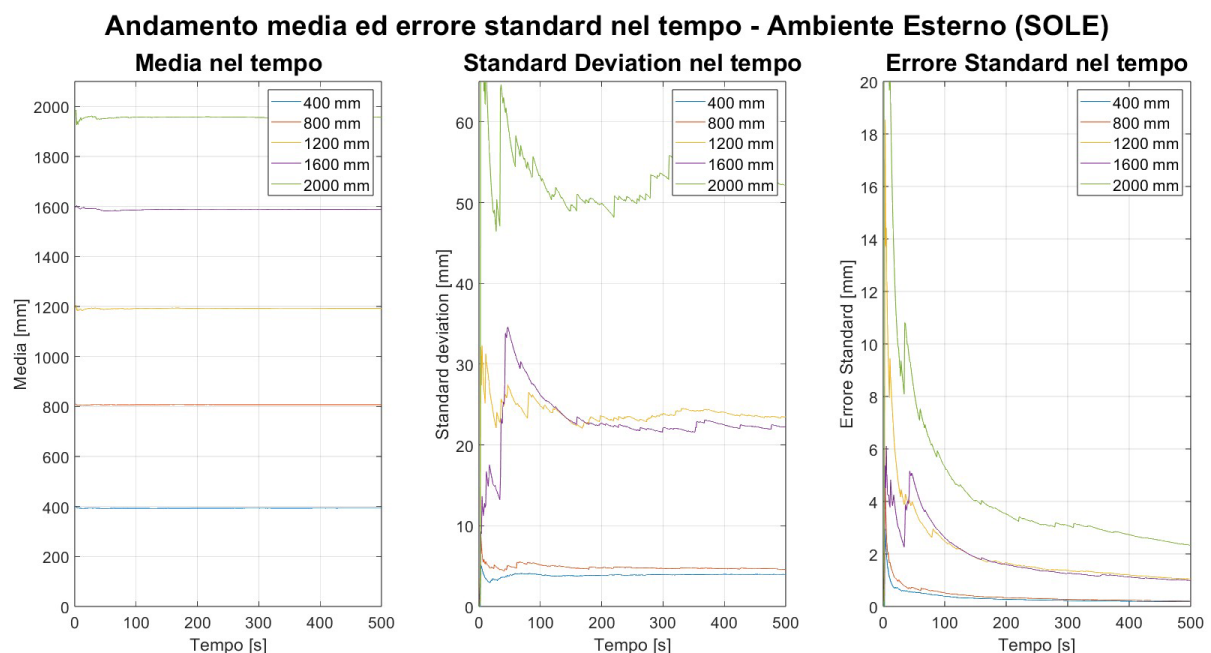


Figura 49. Andamenti delle medie, delle deviazioni standard e degli errori standard nel tempo al sole

Sotto la luce solare la situazione cambia completamente. Nel primo grafico si nota che le medie variano maggiormente nei primi istanti, stabilizzandosi intorno ai 40 s. Le deviazioni standard

risultano meno costanti all'aumentare dell'altezza: fino a quote di circa 800 mm si mantengono al di sotto di 10 mm, mentre fino a 1600 mm si osservano picchi iniziali elevati che si assestano tra 20 mm e 30 mm dopo 20÷70 s. A 2000 mm i valori oscillano invece tra circa 38 mm e 55 mm e si ricorda che all'ombra i valori non superavano i 5 mm.

Nel terzo grafico l'errore standard, a differenza del caso precedente, non decresce rapidamente: per ottenere un risultato altrettanto affidabile rispetto a quello acquisito all'ombra è quindi necessario un tempo di acquisizione molto maggiore. Per altezze fino a 800 mm i valori tendono a 0 mm dopo circa 150 s, mentre per quote superiori non è possibile stabilire un valore asintotico nell'intervallo osservato, poiché la curva mostra un andamento solo debolmente decrescente anche attorno ai 500 s.

Tuttavia, si osserva che già dopo circa 10÷20 s l'errore standard scende al di sotto di 12 mm anche alle quote più elevate, il che rappresenta un valore più che accettabile.

Va inoltre considerato che rimescolando i dati la situazione potrebbe peggiorare: una concentrazione di misure con inclinazioni elevate nelle prime acquisizioni comporterebbe, almeno nei primi 50 s, medie più variabili, deviazioni standard più elevate e meno costanti, ed errori standard elevati con una convergenza più lenta verso valori accettabili.

4.6. Considerazioni finali

Riassumendo, la prima analisi sull'effetto dell'esposizione diretta alla luce solare ha permesso di constatare che il sensore VL53L5CX non sia adatto allo scopo: smette di funzionare già a partire da una quota di 1200 mm con il sensore parallelo al suolo, e con un'inclinazione di soli 3° inizia a presentare anomalie già a 800 mm. Il sensore VL53L8 dimostra invece di funzionare in modo soddisfacente anche in condizioni più avverse, raggiungendo altezze di 2000 mm con inclinazioni fino a 20°.

Una volta selezionato il sensore più idoneo, se ne è eseguita una caratterizzazione approfondita attraverso i seguenti studi:

- **Inclinazione del sensore:** si è compreso perché all'aumentare dell'inclinazione i valori sulle celle si discostino progressivamente gli uni dagli altri, con un effetto che si intensifica all'aumentare della quota. Da questa analisi emerge che una semplice media dei valori sulle celle non fornisce l'altezza, bensì una distanza inclinata di un certo angolo rispetto al suolo. È quindi necessario implementare un metodo per stimare l'inclinazione e correggere di conseguenza il calcolo dell'altezza.
- **Frequenza di campionamento:** si è scelto di operare a 3 Hz, così da acquisire un numero sufficiente di campioni al secondo garantendo al contempo misure affidabili in tutte le condizioni ambientali.
- **Filtro digitale:** si è selezionato il filtro più adatto, si sono identificati gli stati del sensore accettabili e se ne è verificato il funzionamento effettivo. Il filtro riesce a eliminare correttamente tutti i dati anomali mantenendo al contempo le misure valide più coerenti tra loro. Si è inoltre riscontrato che la configurazione 4×4 risulta generalmente più affidabile; si è pertanto scelto di acquisire i dati in questa modalità e di applicare il filtro digitale selezionato.

Con questi parametri definiti, i dati sono stati acquisiti a 3 Hz in configurazione 4x4, filtrati e inseriti in un dataset. Tale dataset è stato utilizzato per costruire dapprima la retta di calibrazione delle inclinazioni e, sfruttando le inclinazioni così stimate, la retta di calibrazione delle altezze. Queste due curve consentono di ottenere la stima finale dell'altezza.

È stato infine condotto uno studio sulle prestazioni medie nel tempo, al fine di determinare quante acquisizioni siano necessarie per ottenere risultati stabili con un errore stimato contenuto. Fino a quote di 1600 mm l'errore standard si assesta al di sotto di 10 mm in circa 10 s, mentre a 2000 mm si stabilizza intorno ai 20 mm. Dimezzare ulteriormente l'errore richiederebbe tempi progressivamente più lunghi; tuttavia, poiché lo stadiometro è destinato alla misurazione di bambini, le altezze in gioco saranno generalmente contenute e in circa 10 s si otterranno quasi sempre risultati stabili e accurati.

5. Sviluppo del prototipo

5.1. Schematico e hardware

Ho utilizzato KiCad per analizzare e apportare le modifiche necessarie alla precedente scheda elettronica. In questa sezione si inizia spiegando lo schematico del dispositivo e il collegamento tra le varie componenti e in seguito si spiegheranno più nel dettaglio le componenti principali, a eccezione del sensore TOF che è già stato spiegato a sufficienza nel capitolo 4.1.

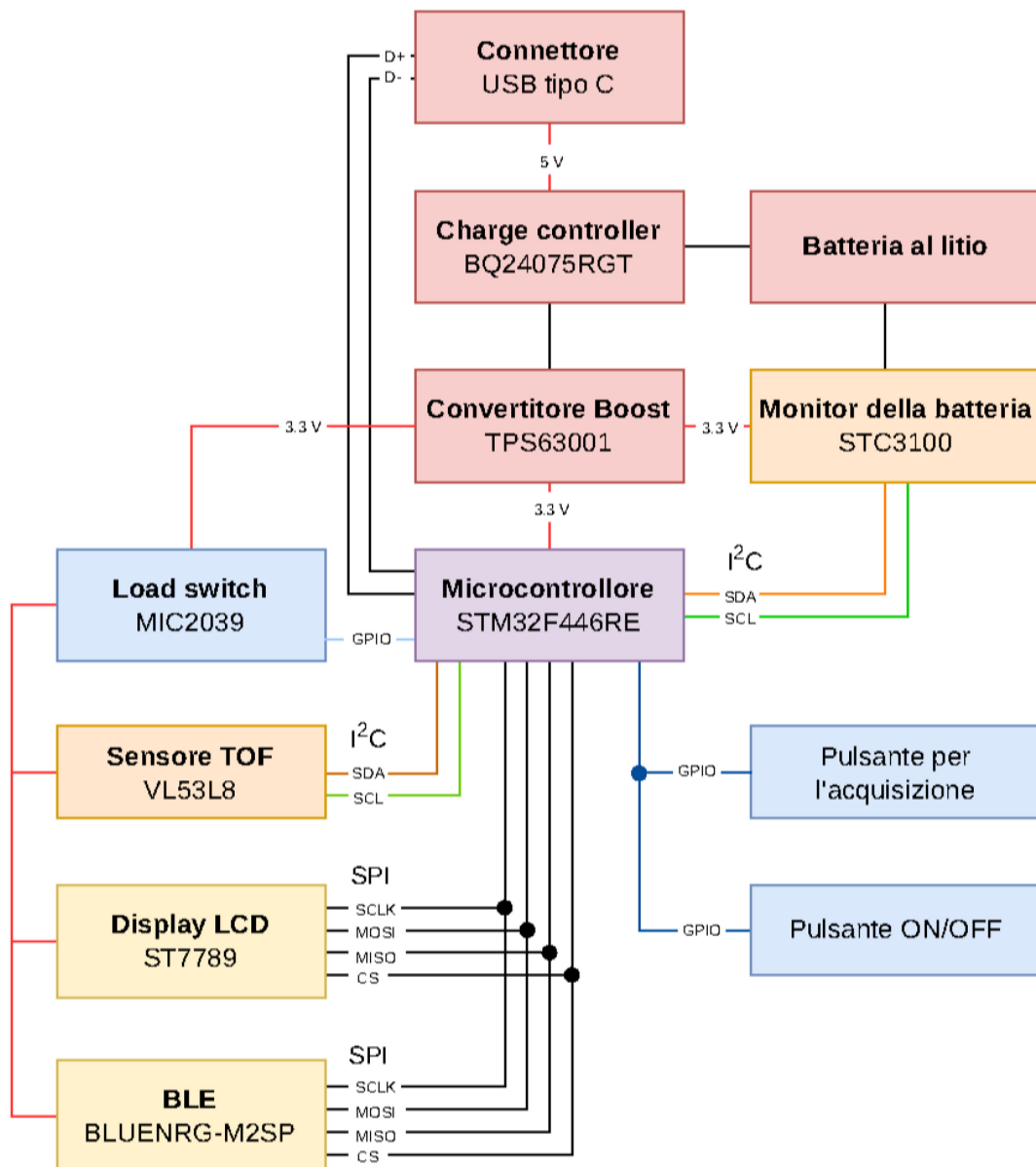


Figura 50. Schema a blocchi del dispositivo

Lo schema a blocchi mostrato nella figura sopra si basa su un microcontrollore STM32. Con il colore rosso sono stati evidenziati i moduli elettronici che gestiscono l'alimentazione. Con i colori arancione e giallo si evidenziano le periferiche che si interfacciano con il microcontrollore mediante le comunicazioni I²C e SPI. Il colore viola è usato per risaltare il microcontrollore mentre il colore blu servono per evidenziare sia i pulsanti meccanici che elettronici.

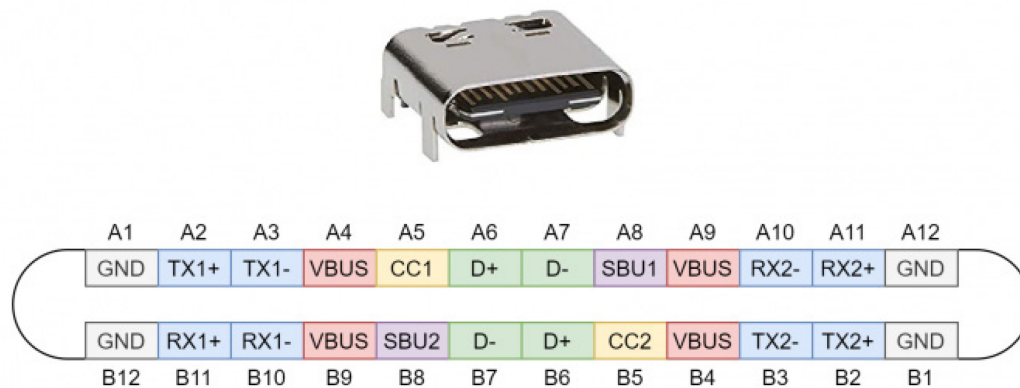


Figura 51. Connettore USB tipo C

La **porta USB di tipo C** si collega al controller di carica e fornisce alla scheda 5V. In questo modo si può sia alimentare un convertitore buck-boost per erogare una tensione di 3.3 V sia per caricare la batteria al litio.

È stato scelto come connettore una porta USB tipo C 3.1 al posto della micro USB in quanto oramai rappresenta lo standard USB per la maggior parte dei dispositivi elettronici. Inoltre, presenta una maggiore robustezza ed è sia simmetrico che reversibile, facilitando così l'inserimento della presa.

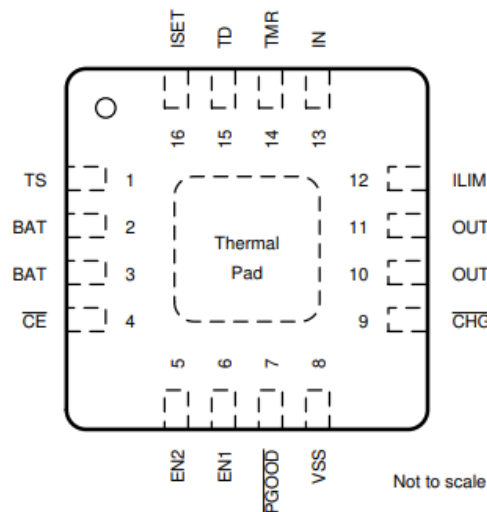


Figura 52. BQ24075

Come controller di carica è stato scelto il **BQ24075**, un circuito integrato che serve per la gestione del percorso di alimentazione e la ricarica delle batterie. In questo modo la scheda può essere alimentata tramite o la porta USB o tramite la batteria.

Inoltre, svolge anche diverse funzioni di sicurezza. Per esempio, presenta una protezione da cortocircuito che limita correnti elevate e scariche improvvise della batteria, prevenendo il surriscaldamento, il rigonfiamento o, nei casi più gravi, anche la combustione della cella.

Integra una protezione da sovratensione sull'ingresso di alimentazione per salvaguardare il dispositivo e la batteria da tensioni superiori ai limiti operativi previsti.

Integra anche una protezione termica riducendo automaticamente la corrente di carica quando la temperatura interna del chip supera un certo limite e nel caso la temperatura continui ad aumentare, il circuito interromperebbe il funzionamento.

Il dispositivo implementa anche una protezione di tipo Undervoltage Lockout (UVLO), che disabilita il funzionamento del circuito quando la tensione di ingresso scende sotto una determinata soglia minima. Questa funzione previene condizioni operative instabili dovute a sorgenti di alimentazione insufficienti, evitando errori nel processo di carica e comportamenti anomali del sistema.

Poi il BQ24075 dispone di una protezione contro le correnti inverse, impedendo alla batteria di scaricarsi verso la porta USB o verso l'alimentazione esterna quando questa viene scollegata o

spenta. Tale meccanismo evita perdite indesiderate di energia e protegge sia la batteria sia i dispositivi collegati da possibili correnti di ritorno.

Inoltre, si può anche collegare al pin TS un termoresistore NTC per monitorare la temperatura della batteria e in caso di temperature eccessive limiterebbe o interromperebbe la corrente di carica, evitando così danni alla batteria e il degrado prematuro della capacità di ritenzione della carica. Tuttavia, dato che questa funzione non è stata implementata, questo pin è stato collegato a massa tramite una resistenza da 10 k Ω , come viene specificato nel datasheet e mantenendo così una tensione valida su TS.

Il circuito integrato può assorbire in ingresso una corrente massima di 500 mA in quanto il pin EN2 è collegato a massa mentre il pin EN1 all'uscita.

I pin PGOOD e CHG sono collegati all'uscita tramite una resistenza e un led in serie. Il led D1, collegato al pin PGOOD, si illumina quando il circuito integrato fornisce correttamente 5V, mentre il LED D2, collegato al pin CHG, si accende durante la ricarica della batteria e si spegne al termine di quest'ultima.

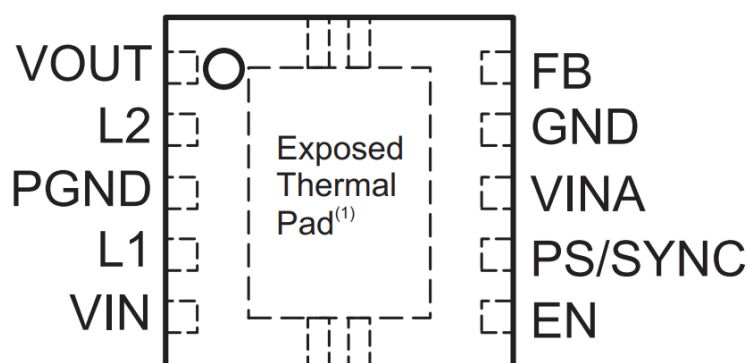


Figura 53. TPS63001

L'uscita del BQ24075 viene successivamente fornita al circuito integrato **TPS63001**, un convertitore buck-boost con un intervallo di ingresso da 1,8 V a 5,5 V e con una tensione di uscita fissa di 3,3 V. Questo regolatore switching è in grado di abbassare (buck) o alzare la tensione (bust) proveniente dalla batteria, garantendo una tensione in uscita stabile. Le correnti di uscita possono raggiungere i 1200 mA con una batteria agli ioni di litio o ai polimeri di litio a cella singola e scaricarla fino a 2,5 V o meno.

Il TPS63001 alimenta il microcontrollore, il monitor della batteria e il load switch. Il **microcontrollore** permette di gestire i sensori, le periferiche e l'elaborazione e il trasferimento dei dati. Per tale scopo si usa STM32F446RE e le sue caratteristiche verranno meglio approfondite in una sezione a parte.

Nell'immagine 50 si nota come il microcontrollore sia collegato direttamente alla porta USB-C tramite le linee D+ (dati positivi) e D- (dati negativi). Tramite queste vie la scheda elettronica, quando viene collegata ad un qualunque computer, può essere riconosciuta come un dispositivo, consentendo così l'installazione di un firmware aggiornato.

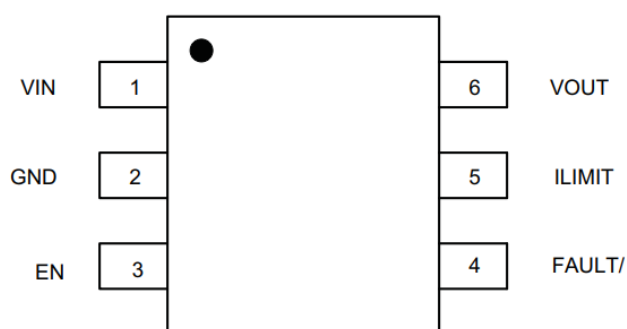


Figura 54. MIC2039 SOT-23-6 (M6)

L'alimentazione delle periferiche (sensore TOF, display e Ble) è regolata dal microcontrollore tramite un'uscita GPIO (General-Purpose Input/Output) che si collega al pin EN del load switch **MIC2039**, un interruttore di distribuzione di potenza MOSFET high-side).

Il microcontrollore STM32 supporta tre modalità a basso consumo (sleep, stop e standby mode) e in particolare in questo progetto si la modalità standby per ottenere il minor consumo energetico possibile per il microcontrollore. Per riattivare le periferiche e il dispositivo dalla modalità di standby si utilizza il pulsante on-off che si collega al pin PA0. Questo è l'unico pin che permette di riaccendere lo strumento in quanto tutti gli altri pin vengono disattivati. Nonostante tutto ciò vanifichi la necessità di un load switch, è stato comunque deciso di inserirlo al fine di assicurarsi l'effettivo spegnimento di tutte le periferiche. In questo modo si riesce a preservare la durata della batteria e a minimizzare le perdite di energia, rendendo così il dispositivo più pratico, soprattutto per l'utilizzo in luoghi dove l'accesso a una fonte di alimentazione elettrica non è facilmente reperibile.

Inizialmente era stato optato per un semplice n-mosfet in configurazione low side, però presentava un problema ovvero una volta spento il dispositivo quest'ultimo a volte si riaccendeva oppure consumava troppo quando era in modalità di stand-by. Ciò accadeva perché in configurazione low side le periferiche vengono scollegate da massa e rimangono ancora alimentate. Pertanto, presentano una massa fluttuante e di conseguenza si hanno correnti parassite, alimentazioni indesiderate, segnali logici o in generale comportamenti anomali. Invece con il MIC2039 posto in configurazione high side si toglie il carico e i dispositivi risultano effettivamente a terra. In questo modo si dovrebbero risolvere tutti i problemi precedenti e non solo. Infatti, a differenza di un semplice mosfet, integra funzionalità di limitazione della corrente, protezione termica e protezione da cortocircuito, migliorando l'affidabilità del sistema e riducendo il numero di componenti esterni necessari. Inoltre, la funzione di soft-start limita le correnti di spunto durante l'accensione del carico, contribuendo alla stabilità dell'alimentazione.

Il microcontrollore comunica tramite SPI con il modulo Bluetooth e il display, e utilizza I²C per comunicare con il monitor della batteria e il sensore TOF.

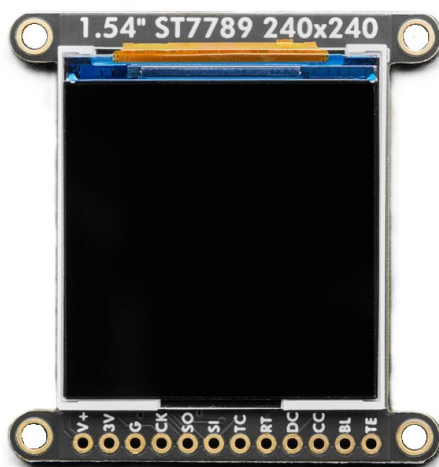


Figura 55. ST7789 display Adafruit

Come display è stato usato il **ST7789**, un display LCD a colori a 16 bit con risoluzione 240x240 pixel. È già fornito con driver e con tutte le componenti necessarie. Pertanto, basta collegarlo alla scheda tramite gli appositi pin per poter essere utilizzato.

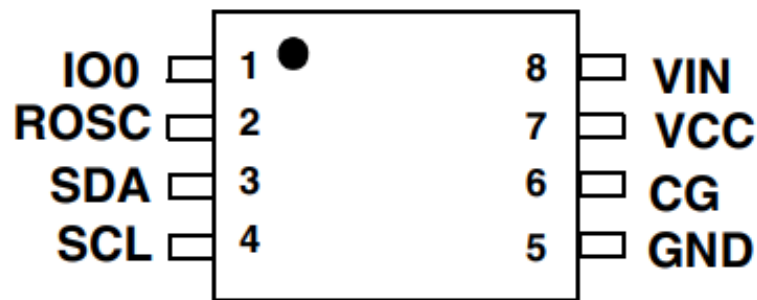


Figura 56. STC3100

Per il monitor della batteria ho l'**STC3100** che oltre a fornire informazioni sullo stato di carica della batteria, funge da ulteriore protezione tra la batteria e il microcontrollore, riducendo così i rischi associati alle fluttuazioni di tensione che potrebbero potenzialmente danneggiare il microcontrollore.

In particolare, l'**STC3100** monitora i parametri critici della batteria (tensione, temperatura e corrente) e include funzioni hardware per implementare un indicatore di carica della batteria, basato su un convertitore A/D programmabile da 12 a 14 bit. Con una tipica resistenza di rilevamento esterna da 30 mΩ, la corrente della batteria può raggiungere i 2,5 A.

Come sensore è stato adoperato il TOF **VL53L8** del produttore ST. Dato che è già stato trattato a sufficienza nel capitolo 2, mentre come modulo BLE è stato integrato il **BlueNRG-M2**.

Prima di passare al capitolo seguente, analizzerò le componenti più complesse, ovvero: il microcontrollore e il BLE. Spiegherò quali sono le loro caratteristiche principali in particolare per il BLE spiegherò anche la teoria alla base del suo funzionamento. Dopo tutto ciò analizzerò anche le caratteristiche della batteria e della sua durata.

5.1.1. Microcontrollore

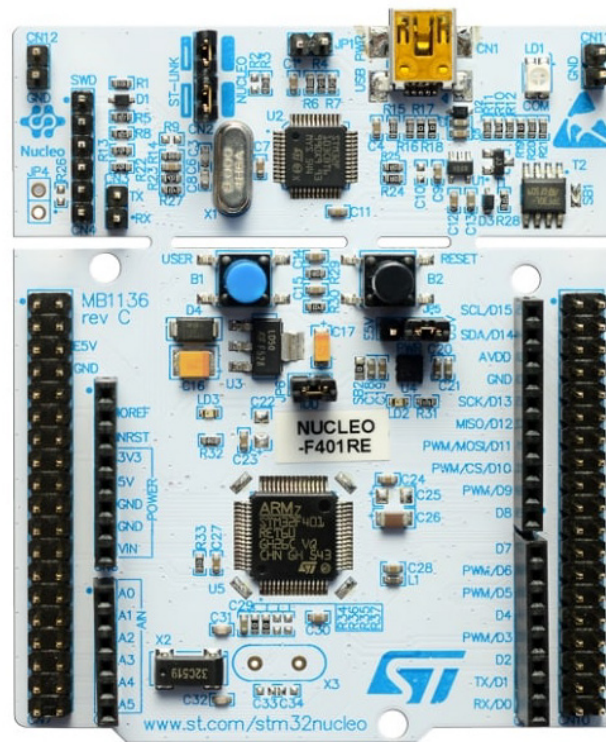


Figura 57. Nucleo STM32F446RE

Il microcontrollore STM32F446RE è stato scelto per il suo package compatto, il basso costo, la facilità di saldatura, l'elevato numero di pin disponibili e i 512 KB di memoria flash. Nonostante la presenza di un oscillatore interno, sulla scheda è stato aggiunto un cristallo da 24 MHz per garantire una maggiore precisione del clock, vantaggiosa per i protocolli I2C e SPI. Per stabilizzare il cristallo sono necessari due condensatori e una resistenza. I valori dei condensatori sono specificati nel datasheet del cristallo, mentre il valore della resistenza è determinato utilizzando i dati forniti da ST.

Il componente che gestisce le funzioni e i dati di elaborazione in questa scheda è un STM32F446RE.

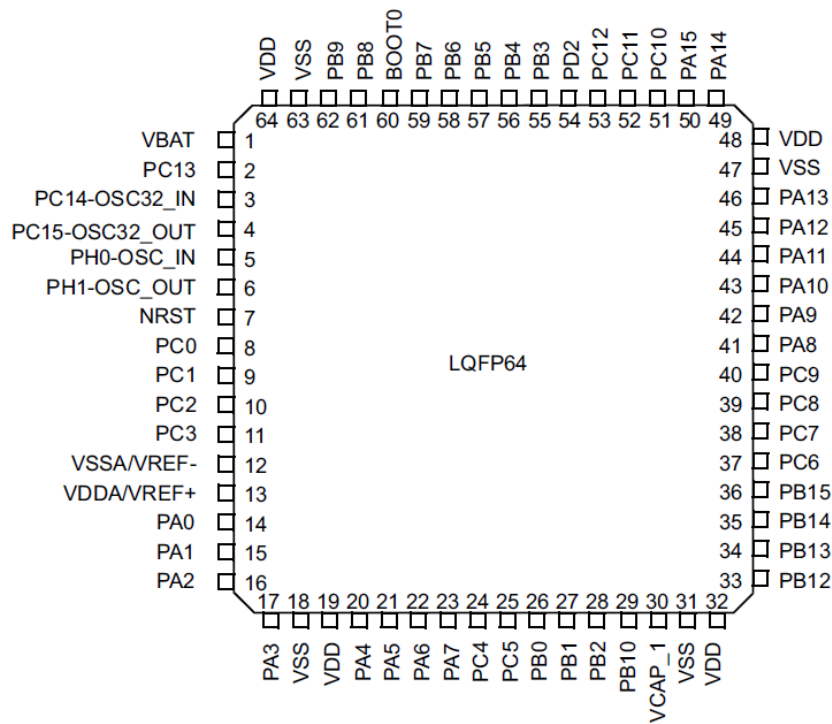


Figura 58. STM32F446RE pinout

I dispositivi STM32F446xC/E si basano sul core RISC Arm Cortex-M4 a 32 bit ad alte prestazioni, con una frequenza operativa fino a 180 MHz. Il core Cortex-M4 è dotato di un'unità a virgola mobile (FPU) a singola precisione che supporta tutte le istruzioni di elaborazione dati a singola precisione e i tipi di dati Arm. Implementa inoltre un set completo di istruzioni DSP e un'unità di protezione della memoria (MPU) che migliora la sicurezza delle applicazioni.

I dispositivi STM32F446xC/E integrano memorie embedded ad alta velocità (memoria Flash fino a 512 Kbyte, fino a 128 Kbyte di SRAM), fino a 4 Kbyte di SRAM di backup e una vasta gamma di I/O e periferiche avanzate collegate a due bus APB, due bus AHB e una matrice di bus multi-AHB a 32 bit.

Questo microcontrollore può essere alimentato con una tensione da 1,7 a 3,6 V; in questa applicazione ho utilizzato la tensione standard di 3,3 V.

Modalità a basso consumo

I dispositivi supportano tre modalità a basso consumo per ottenere il miglior compromesso tra basso consumo energetico, tempi di avvio ridotti e fonti di riattivazione disponibili:

- In **Modalità Sleep**, solo la CPU viene arrestata. Tutte le periferiche continuano a funzionare e possono riattivare la CPU in caso di interrupt/evento.
- **Modalità Stop** è la modalità che consente di ottenere il minor consumo energetico mantenendo il contenuto della SRAM e dei registri. Tutti i clock nel dominio a 1,2 V vengono arrestati e gli oscillatori a cristallo PLL, HSI RC e HSE vengono disabilitati.
- **Modalità Standby** è la modalità che viene utilizzata per ottenere il minor consumo energetico. Il regolatore di tensione interno viene disattivato, in modo che l'intero dominio a 1,2 V venga spento. Anche gli oscillatori a cristallo PLL, HSI RC e HSE vengono disattivati. Dopo essere entrato in modalità Standby, il contenuto della SRAM e dei registri viene perso, ad eccezione dei registri nel dominio di backup e della SRAM di backup, se selezionata. Il dispositivo esce dalla modalità Standby quando si verifica un reset esterno (pin NRST), un reset IWDG, un fronte di salita sul pin WKUP o un evento di allarme/riattivazione/ manomissione/ timestamp RTC.

I dispositivi incorporano una periferica USB OTG full-speed device/host/OTG con transceiver integrati. La periferica USB OTG FS è conforme alle specifiche USB 2.0 e OTG 1.0. Dispone di impostazioni endpoint configurabili via software e supporta la sospensione/ripresa. Il controller USB OTG full-speed richiede un clock dedicato a 48 MHz generato da un PLL collegato all'oscillatore HSE. L'USB dispone di linee di alimentazione dedicate che ne consentono l'utilizzo nell'intero intervallo di potenza.

Protocolli di comunicazione

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) è utilizzato per la comunicazione tra microcontrollori, moduli GPS, moduli Wi-Fi/Bluetooth, convertitori USB-seriale e molti altri dispositivi periferici. Il termine "asincrono" indica la caratteristica fondamentale di questo protocollo: non esiste un segnale di clock condiviso tra trasmettitore e ricevitore. I due dispositivi devono pertanto accordarsi in anticipo su una velocità di trasmissione comune, espressa in baud (bit per secondo). Le velocità standard più comuni includono 9600, 19200, 38400, 57600 e 115200 baud.



Figura 59. Comunicazione UART

UART è un protocollo punto-a-punto: ogni comunicazione avviene tra esattamente due dispositivi. Utilizza tipicamente due linee fisiche denominate TX (Transmit) e RX (Receive), che vengono collegate in maniera incrociata: il pin TX del primo dispositivo si collega all'RX del secondo e viceversa. È quindi una comunicazione full-duplex, il che significa che i due dispositivi possono trasmettere e ricevere simultaneamente e in modo indipendente.

Poiché non esiste un clock condiviso, UART adotta un formato di frame ben preciso per sincronizzare la comunicazione. Ogni byte di dati viene incapsulato in un frame che comprende:

- **Start Bit** (1 bit, sempre a livello logico 0) segnala l'inizio di una trasmissione, abbassando la linea da idle (HIGH) a LOW.
- **Data Bits** (5÷9 bit, di solito 8) sono il dato effettivo, trasmesso dal bit meno significativo (LSB) al più significativo (MSB).
- **Parity Bit** (opzionale, 1 bit) è utilizzato per la rilevazione di errori. Può essere pari, dispari o assente.
- **Stop Bit** (1 o 2 bit, sempre a livello logico 1) segnala la fine del frame e mantiene la linea in stato di idle per la durata specificata.

Nel progetto è usato per inviare e leggere i dati al computer.

I²C (Inter-Integrated Circuit) è un protocollo di comunicazione sincrono, come SPI, ma a differenza di quest'ultimo utilizza solo due fili: SDA (Serial Data Line) per i dati bidirezionali e SCL (Serial Clock Line) per il clock generato dal master. Entrambe le linee richiedono resistori di pull-up collegati all'alimentazione (tipicamente 4.7 kΩ per velocità standard e 2.2 kΩ per modalità ad alta velocità). La logica è open-drain: i dispositivi possono solo abbassare le linee, mentre i resistori le portano a livello alto quando nessuno le forza a massa.

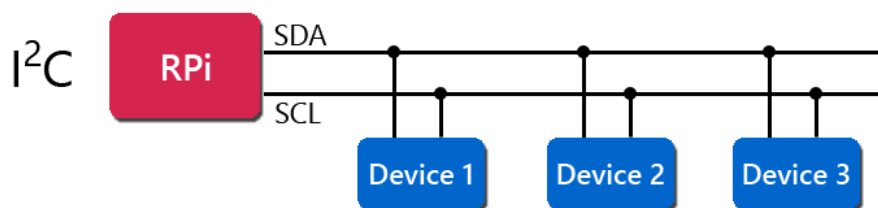


Figura 60. Comunicazione I²C

È diventato famoso grazie alla sua semplicità di cablaggio e alla sua capacità di gestire molti dispositivi su un unico bus fisico tramite un sistema di indirizzamento integrato.

Il bus I²C supporta più master e più slave contemporaneamente. Ogni slave ha un indirizzo univoco a 7 bit (o 10 bit in configurazioni estese), il che permette di collegare fino a 112 dispositivi distinti sullo stesso bus a 7 bit (16 indirizzi sono riservati). Tra i dispositivi più comunemente interfacciati tramite I²C si trovano sensori (IMU, temperatura, pressione, umidità), display OLED, RTC (Real Time Clock), DAC/ADC, EEPROM e molti altri.

In questa applicazione vengono utilizzate due interfacce I²C:

- I²C1 per il monitor della batteria (STC3100)
- I²C2 per il sensore TOF (VL53L8)

SPI (Serial Peripheral Interface) è un protocollo di comunicazione seriale sincrono adottato per la comunicazione ad alta velocità tra microcontrollori e dispositivi periferici come memorie flash, sensori ad alta frequenza, display, convertitori ADC/DAC, moduli RF e molti altri.

La natura sincrona di SPI significa che un segnale di clock (SCK o CLK) viene generato dal master e distribuito a tutti i dispositivi slave collegati al bus. Questo elimina la necessità di concordare preventivamente un baud rate e permette di raggiungere velocità di trasferimento notevolmente superiori rispetto a UART o I²C, tipicamente nell'ordine di decine di MHz, fino a 100 MHz o più in implementazioni ottimizzate con hardware dedicato.

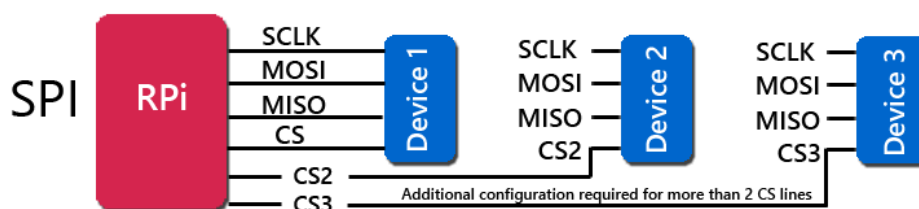


Figura 61. Comunicazione SPI

SPI è un protocollo master-slave: esiste sempre un dispositivo master (solitamente il microcontrollore) che controlla il clock e avvia tutte le transazioni. Possono coesistere più slave sul bus, ma la selezione avviene tramite segnali dedicati di Chip Select (CS, detto anche Slave Select o SS), uno per ogni slave.

Il bus SPI è composto da quattro segnali fondamentali:

- **MOSI** (Master Out Slave In) è linea dati che va dal master verso lo slave.
- **MISO** (Master In Slave Out) è linea dati che va dallo slave verso il master.
- **SCK** (Serial Clock) è segnale di clock generato esclusivamente dal master.
- **CS** (Chip Select) / **SS** (Slave Select) è segnale attivo-basso che abilita uno specifico slave; uno per ogni dispositivo slave.

In una configurazione multi-slave, MOSI, MISO e SCK sono condivisi tra tutti i dispositivi, mentre ogni slave ha una propria linea CS. Il master abbassa il CS del dispositivo target prima

di iniziare la transazione e lo rialza al termine. Esistono anche configurazioni avanzate come Daisy Chain (i dati passano in serie da uno slave all'altro) e Dual/Quad SPI, usati nelle memorie flash ad alta velocità, dove si utilizzano rispettivamente 2 o 4 linee dati per aumentare il throughput.

In questa applicazione vengono utilizzate due interfacce SPI:

- SPI1 per il modulo Bluetooth (BlueNRG-M2SP)
- SPI2 per il display (ST7789)

Ognuna di queste tre interfacce hanno il loro pro e i loro contro. UART eccelle nella semplicità e nella comunicazione punto-a-punto a distanza, mentre SPI è superiore nella velocità bruta e nella capacità full-duplex. I2C, invece, è un'ottima via di mezzo, offrendo il miglior compromesso tra il numero di fili e il numero di dispositivi gestibili e garantendo un'ottima velocità.

In termini di velocità, ho l'SPI che è nettamente superiore arrivando fino a 100 MHz e oltre, seguito poi dall'I²C in modalità High-Speed con una velocità di 3.4 Mbps e dall'UART con velocità massima di 1 Mbps. Invece in termini di risparmio di GPIO, l'I²C è imbattibile in quanto ha sempre solo 2 pin, mentre l'UART ne richiede 2 fissi e l'SPI li moltiplica in base agli slave.

5.1.2. BLE

Il BlueNRG-M2 è un modulo processore applicativo System-on-Chip Bluetooth Low Energy certificato secondo le specifiche BT v5.2 e qualificato BQE. Il modulo BlueNRG-M2 supporta più ruoli simultaneamente e può agire contemporaneamente come dispositivo master e slave Bluetooth. Il BlueNRG-M2 si basa sul System-on-Chip BlueNRG-2 e integra l'intero stack e i protocolli Bluetooth Low Energy.

Il modulo BlueNRG-M2 offre una piattaforma RF completa in un formato compatto. Radio, antenna integrata e oscillatori ad alta frequenza sono integrati per offrire una soluzione

certificata che ottimizza il time-to-market delle applicazioni finali. Il BlueNRG-M2 può essere alimentato direttamente con una coppia di batterie AAA o con qualsiasi fonte di alimentazione da 1,7 a 3,6 V.

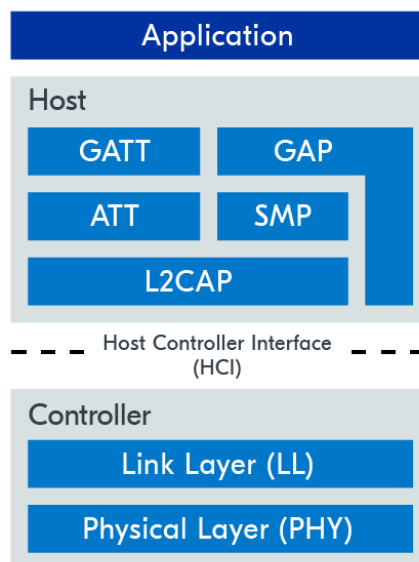


Figura 62. Architettura del protocollo BLE

L'architettura di BLE è definita dalla Bluetooth Core Specification (attualmente alla versione 5.4, pubblicata dal Bluetooth SIG) e si articola in un insieme stratificato di protocolli, suddiviso in due macro-blocchi principali: il Controller e il Host. Tra i due si trova l'interfaccia HCI (Host Controller Interface), che permette di implementarli su chip separati o in modo integrato.

Controller

Il Controller comprende i livelli fisici e di accesso al mezzo:

- **Physical Layer (PHY):** gestisce la trasmissione e ricezione dei segnali radio. BLE opera nella banda ISM a 2.4 GHz su 40 canali da 2 MHz ciascuno. Con BLE 5.0 sono stati introdotti PHY aggiuntivi: 1 Mbit/s (LE 1M, legacy), 2 Mbit/s (LE 2M, alta velocità) e LE Coded PHY (125 kbps o 500 kbps, portata estesa fino a ~1 km).

- Link Layer (LL): gestisce stati del dispositivo (Advertising, Scanning, Initiating, Connection, Synchronization), il formato dei pacchetti, la crittografia di livello link (AES-128 CCM), la gestione dei canali, il controllo del flusso e la ritrasmissione automatica.
- HCI (Host Controller Interface): interfaccia standardizzata che permette di separare Host e Controller, comunicando tramite comandi, eventi e pacchetti dati.

Host

Il Host comprende dei livelli di gestione della comunicazione e dei dati applicativi:

- L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol): si posiziona sopra l'HCI e ha il compito di adattare i dati provenienti dai livelli superiori (GAP, GATT, applicazione) ai PDU del Link Layer. L2CAP supporta la multiplazione di protocolli, la segmentazione e riassettaggio (SAR) di SDU fino a 64 KB, il controllo di flusso per canale e la ritrasmissione. Per BLE, i canali principali sono il canale ATT (CID 0x0004) e il canale segnalazione (CID 0x0005), oltre ai canali CoC (Connection-Oriented Channels) per flussi dati arbitrari con credit-based flow control.
- SMP (Security Manager Protocol): gestisce l'accoppiamento (pairing), l'autenticazione e la distribuzione delle chiavi di sicurezza tra dispositivi BLE. Definisce meccanismi come LE Legacy Pairing, LE Secure Connections, bonding e privacy degli indirizzi.
- ATT (Attribute Protocol): protocollo client-server che espone attributi (unità di dati identificate da handle) sul server, rendendo disponibili le informazioni per il client. ATT è la base su cui è costruito GATT.
- GAP (Generic Access Profile): definisce ruoli, modalità di scoperta, procedure di connessione e formato dei dati pubblicitari. È il profilo obbligatorio per qualsiasi dispositivo BLE.
- GATT (Generic Attribute Profile): costruito sopra ATT, definisce la struttura gerarchica (Profile, Service e Characteristic) con cui i dati vengono organizzati ed esposti.

Advertising

GAP definisce quattro **ruoli fondamentali** che un dispositivo può assumere:

- **Peripheral** è il dispositivo che invia pacchetti di advertising per farsi scoprire e che accetta connessioni in ingresso da un Central. È tipicamente il sensore, il wearable o l'attuatore IoT.
- **Central** è il dispositivo che esegue la scansione dei pacchetti advertising, seleziona un Peripheral e avvia la connessione. È tipicamente lo smartphone, il gateway o il computer.
- **Broadcaster** è il dispositivo che invia pacchetti advertising senza supporto alle connessioni. Usato per i beacon unidirezionali.
- **Observer** è il dispositivo che esegue la scansione passiva dei pacchetti advertising senza mai connettersi. Usato per ricevere dati da beacon.

Nel contesto GATT, i dispositivi assumono il ruolo di GATT Server (chi espone i dati) e GATT Client (chi interroga il server). Il GATT Server, tipicamente il Peripheral GAP, mantiene una tabella di attributi in memoria, dove ogni attributo è identificato da un handle univoco (numero progressivo a 16 bit), un tipo (UUID), un valore e permessi di accesso.

Il pacchetto advertising GAP contiene al massimo 31 byte di payload suddivisi in strutture AD (Advertising Data) composte da: lunghezza (1 byte), tipo AD (1 byte, definito dal Bluetooth SIG) e valore (N byte). Ogni pacchetto può contenere più strutture AD concatenate, terminate da un byte di lunghezza zero. I tipi AD più comuni includono: Flags (tipo 0x01, obbligatorio per la connettibilità), Complete/Shortened Local Name (0x09/0x08), TX Power Level (0x0A), Manufacturer Specific Data (0xFF) per dati custom, Complete List of 16-bit Service UUIDs (0x03) e altri.

Il Peripheral trasmette pacchetti advertising ad intervalli regolari definiti dall'advertising interval, configurabile in passi da 0.625 ms nell'intervallo tra 20 ms e 10.24 s. Un advertising interval breve migliora la reattività e la velocità di scoperta ma aumenta il consumo energetico; un intervallo lungo riduce il consumo ma peggiora la latenza di scoperta. La specifica prevede anche un'aggiunta di jitter casuale (0–10 ms) per evitare collisioni sistematiche tra dispositivi con lo stesso intervallo.

Connessione

Una volta stabilita la connessione, il Peripheral smette di trasmettere advertising e diventa non più visibile ad altri Central. La comunicazione passa dal meccanismo broadcast degli advertising ai data channels.

Durante la connessione, il Central è detto master e il Peripheral è detto slave: il master definisce il ritmo della comunicazione inviando pacchetti in ogni connection event. Il slave risponde nel medesimo evento. Se non ci sono dati da trasmettere, vengono inviati pacchetti vuoti per mantenere viva la connessione.

GATT è il protocollo che regola lo scambio di dati applicativi tra due dispositivi BLE connessi. Si basa sul protocollo ATT e definisce una struttura gerarchica per organizzare i dati.

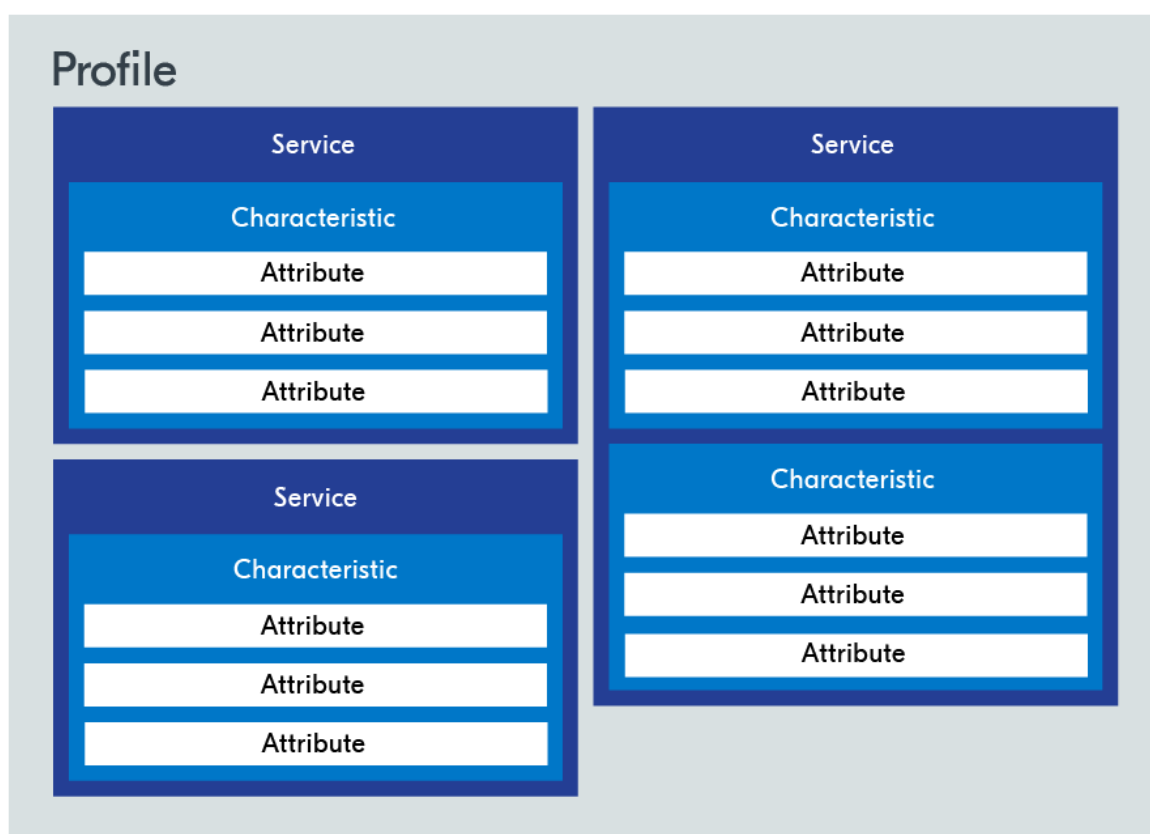


Figura 63. Struttura GATT

La **struttura GATT** è organizzata in tre livelli:

- **Profilo:** un insieme predefinito di servizi, standardizzato dal Bluetooth SIG o definito in modo custom. Un profilo non esiste fisicamente sul dispositivo, è una specifica astratta, per esempio nel progetto ho Result Profile e Battery Profile.
- **Servizio:** un raggruppamento logico di caratteristiche correlate, identificato da un UUID a 16 bit o 128 bit se è custom. Un server GATT può esporre più servizi.
- **Caratteristica:** è l'unità fondamentale di dati in GATT. Ogni caratteristica ha un UUID, un valore (array di byte), proprietà (Read, Write, Notify, Indicate, Write Without Response) e descriptor che però sono opzionali.

Le **operazioni GATT** principali sono:

- **Read:** il Client legge il valore corrente di una caratteristica dal Server.
- **Write:** il Client scrive un valore su una caratteristica del Server, con conferma (Write Request/Response) o senza (Write Command/Write Without Response).
- **Notify:** il Server invia autonomamente aggiornamenti al Client ogniqualvolta il valore cambia, senza che il Client debba interrogarlo (polling). Le notifiche non richiedono conferma.
- **Indicate:** come Notify, ma con conferma dal Client (Confirmation). Garantisce la ricezione ma è più costoso in termini di latenza.
- **Discovery:** il Client può scoprire servizi, caratteristiche e descriptor del Server tramite procedure di discovery senza conoscerli a priori.

5.1.3. Batteria

Per alimentare la scheda viene utilizzata una batteria ai polimeri di litio (Li-Po). La batteria è larga 30,5 mm, lunga 44 mm e spessa 6,8 mm.

Questo tipo di batteria si basa su una reazione redox in cui l'anodo subisce un'ossidazione rilasciando uno ione di litio e un elettrone. Gli ioni di litio migrano verso il catodo attraverso l'elettrolita, formando ossido di litio-cobalto, mentre gli elettroni fluiscono attraverso il circuito esterno, generando corrente. Durante la carica, le reazioni si invertono, ripristinando l'anodo e il catodo. Tuttavia, una scarica eccessiva può portare alla formazione di ossido di litio, danneggiando potenzialmente la cella in modo permanente.

La batteria lavora con tensioni che vanno dai 4,2 V quando è completamente carica arrivando fino ai 2,8 V quando è quasi scarica. La batteria utilizzata in questo progetto include un piccolo circuito di protezione che previene la scarica eccessiva e limita la corrente massima rispettivamente a 3,0 V e 0,8 A.

La capacità nominale della batteria selezionata è di 820 mAh. Tuttavia, la capacità effettiva è solitamente inferiore a causa di diversi fattori, tra cui:

- **Temperatura:** Sebbene l'intervallo di funzionamento sicuro sia in genere compreso tra -20°C e 60°C, temperature più elevate accelerano la reazione, migliorando temporaneamente le prestazioni della batteria.
- **Carico:** Una scarica rapida riduce l'efficienza della batteria, diminuendo la carica utilizzabile.
- **Numero di cicli:** Con il ripetersi di cicli di carica e scarica, all'interno della cella si formano dei dendriti che ne riducono gradualmente la capacità.

Dato che nel progetto precedente c'erano problemi di durata della batteria, sono stati effettuati di calcoli approssimativi della durata della batteria in condizione di lavoro (run mode) e a dispositivo "spento" (standby mode).

In run mode e considerando che il micro lavora con un HCLK (high-speed clock) di 64 Mhz, secondo i datasheet ho:

- Con HCLK = 60 MHz, il microprocessore F446RE consuma tipicamente 21 mA, ma a 25° arriva a consumare 25.5 mA e a temperature estreme di 105° può arrivare anche a 44.8 mA.
- Il load switch MIC2039 quando è acceso può consumare al massimo 300 µA, ma tipicamente consuma un terzo;
- Il display ST7789 assorbe tra 6 mA e 8 mA;
- Il sensore TOF VL53L8 ha 3 alimentazioni e basta che anche solo una di queste non vada per spegnerlo. Viene alimentato con una tensione di 3.3 V sul pin AVDD, il quale assorbe tra i 43 mA e i 50 mA, mentre gli altri due pin sono alimentati con una tensione di 1.8 V. In particolare, il pin CORE_1V8 assorbe una corrente di 50÷80 mA mentre il pin IOVDD assorbe solo 3÷6 µA.
- Il modulo BLE BlueNRG-M2 assorbe 8.3÷15.3 mA se TX è impostato a -2dBm.

Sommando tutte le correnti delle componenti più energivore si ottiene una corrente totale assorbita dalla scheda che parte da un minimo di 128,3 mA e arriva fino ad un massimo di 198.4 mA. Quindi con una batteria da 820 mAh ottengo una durata di:

$$t = \frac{\text{Capacità della batteria}}{\text{Corrente assorbita}} = \frac{820 \text{ mAh}}{128,3 \div 198.4 \text{ mA}} = 6.4 \div 4.1 \text{ h}$$

Invece quando il dispositivo entra in standby mode disattiva oltre a disattivare tutte le periferiche spegne anche lo switch. In questo modo non serve tener conto nemmeno dei consumi delle diverse periferiche nello stato off. Quindi considerando che il microprocessore assorbe 2÷8 µA mentre lo switch 0.75÷8 µA, il dispositivo può durare anche tra le 60.000 e le 300.000 ore.

Con queste stime il problema del dispositivo che presenta una durata di qualche giorno quando è spento si dovrebbe risolvere mentre si può notare che la durata dello stadiometro quando è acceso non è molto elevata. Non dura nemmeno tutta la giornata. Pertanto, una prima soluzione sarebbe quella di usare una batteria con una capacità maggiore, per esempio si può usare una batteria di 2600 mAh come quella usata nello stadiometro precedente e ciò garantirebbe una

durata 3 volte superiore. Una seconda soluzione si può effettuare via software e agendo in primis sul sensore TOF che da solo consuma circa 215 mW ovvero circa il 70% della potenza assorbita dall'intero circuito è utilizzata per alimentare il sensore. Quindi effettuando opportuni accorgimenti si possono abbattere ulteriormente i consumi.

In un secondo momento sono stati misurati i consumi effettivi dello strumento, collegando un multimetro in serie alla batteria di alimentazione. È stato riscontrato che, durante la fase di accensione, corrispondente all'inizializzazione delle comunicazioni e delle periferiche, la scheda consuma tra 65 mA e 80 mA; una volta completata tale fase ed entrato nel ciclo principale, il consumo si attesta a 145 mA durante l'acquisizione delle misure e a 80 mA negli intervalli restanti. Di conseguenza, se il sensore non acquisisce dati in modo continuativo, il dispositivo può raggiungere un'autonomia di 10 ore, a differenza delle 5.6 ore previste nel caso di acquisizione continua.

Se i consumi in modalità run risultano quindi entro i limiti previsti, o anche inferiori, i consumi in modalità standby si attestano invece intorno ai 4 mA, valore significativamente superiore a quello preventivato. Non è stato possibile verificare con certezza l'origine di tale consumo anomalo, ma si può ipotizzare che sia riconducibile al circuito di gestione dell'alimentazione o al microcontrollore stesso, dal momento che le periferiche risultano disalimentate fisicamente tramite il load switch. Pur non essendo ottimali, tali consumi permettono comunque di raggiungere un'autonomia complessiva di 205 ore, equivalenti a oltre 8 giorni.

Questi risultati, ottenuti in condizioni di laboratorio, necessitano in ogni caso di una validazione sul campo, poiché fattori quali temperatura, carico e usura, citati in precedenza, potrebbero comportare una riduzione dell'autonomia effettiva.

5.2. PCB

Durante lo sviluppo del layout del circuito stampato, ho modificato completamente la scheda precedente. La scheda precedente era disegnata per essere posizionata sulla base dello stadiometro quindi era di forma quadrata mentre io ho pensato di posizionare la scheda lungo il manico. Pertanto, ho completamente cancellato il progetto PCB precedente e ho allungato la forma cercando di mantenere le dimensioni originali e ho riorganizzato le componenti e le connessioni.

Poiché avevo intenzione di mantenere le dimensioni contenute ho deciso di posizionare le componenti su entrambi i lati della scheda, identificando così un lato superiore e un lato inferiore. Per tale motivo ho optato per una scheda a quattro strati, leggermente più spessa, che consente di posizionare i componenti su entrambi i lati e di gestire l'alimentazione e i riferimenti di massa utilizzando i piani interni. Ho deciso di posizionare tutti i connettori e le componenti più grandi sul lato che si affaccerà verso l'interno della scocca in modo che sul l'altro lato le componenti fossero tutte piccole e far sì che la scheda fosse il più vicino possibile alla scocca. In questo modo posso premere il pulsante dedicato al reset senza smontare il dispositivo e così creando un apposito foro sulla scocca è possibile premerlo tramite uno spillo o con qualche altro oggetto simile. Inoltre, sempre grazie a questo design, il lato interno del circuito stampato è il primo ad essere esposto durante lo smontaggio, facilitando le operazioni di debug e le ispezioni durante la fase di sviluppo.

Il PCB è composto da 4 strati di rame separati da uno strato isolante non conduttivo, FR4, un materiale isolante standard a base di fibra di vetro. Non ho utilizzato impostazioni standard per percorsi e vie, ma ho regolato le dimensioni delle vie e delle piste entro i limiti consentiti dal produttore.

Per le piste adibite all'alimentazione a 5 V ho utilizzato uno spessore di 0,3 mm mentre per tutte le altre lo spessore era di soli 0,2 mm. Per risparmiare spazio, ho utilizzato vie più piccole, con fori da 0,2 mm e circonferenza anulare di 0,45 mm.

Ho utilizzato due piani di alimentazione per ridurre al minimo i percorsi di connessione dell'alimentazione, cercando di posizionare le vie il più vicino possibile ai pin di alimentazione delle rispettive componenti.

5.2.1. Power layer

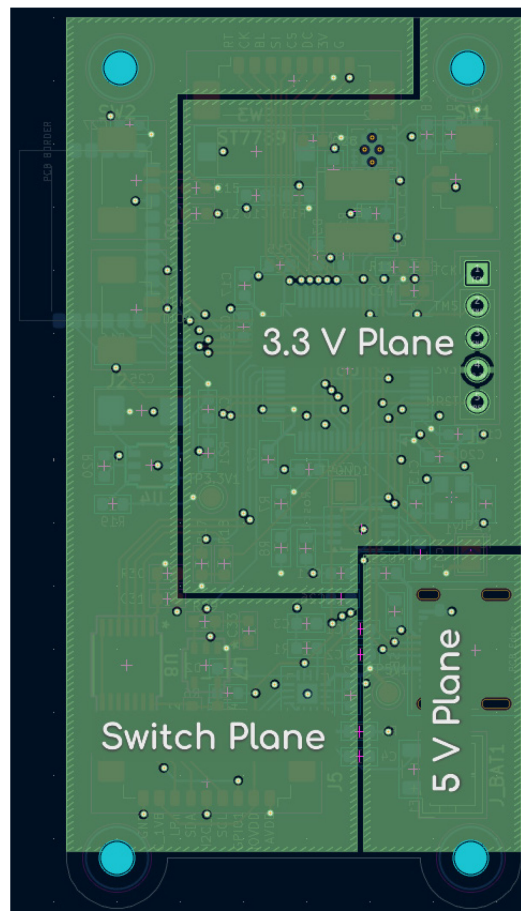


Figura 64. Power layer del PCB

L'area attorno al connettore USB opera a 5 V, alimentata dai pin di alimentazione USB, e costituisce l'ingresso di alimentazione per il BQ24075. Questa zona è elettricamente isolata dal resto del PCB, che opera invece a 3,3 V ed è alimentato dal TPS63000. L'uscita del MIC2039 è collegata a un terzo piano anch'esso isolato, dedicato all'alimentazione controllata delle periferiche, che può essere abilitata o disabilitata tramite il dispositivo stesso.

Questa suddivisione in piani di alimentazione separati permette di distribuire le tensioni sui layer esterni del PCB in modo ordinato ed efficiente. I via collegano i layer tra loro attraversando l'intero spessore del PCB, ma sono connessi elettricamente solo al piano di alimentazione corrispondente; sul layer esterno, delle piste corte li collegano ai pin dei componenti. In questo modo si ottiene una disposizione delle piste pulita e una gestione efficiente delle alimentazioni.

5.2.2. Ground layer

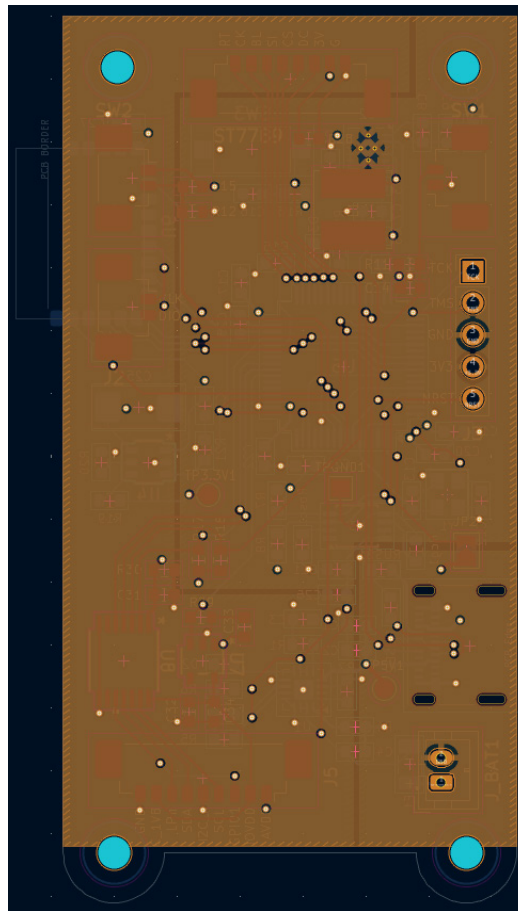


Figura 65. Ground layer del PCB

Si è scelto di realizzare il layer inferiore come piano di massa continuo in rame, una pratica consolidata nel design moderno di PCB. Questa scelta consente di minimizzare l'impedenza del percorso di ritorno delle correnti: ogni segnale presente sui layer superiori trova infatti un percorso di ritorno diretto e a bassa impedenza direttamente al di sotto della propria traccia, riducendo significativamente le emissioni elettromagnetiche e il rischio di interferenze. Il piano di rame continuo contribuisce inoltre alla dissipazione termica del circuito, distribuendo il calore prodotto dai componenti attivi in maniera più uniforme rispetto a un instradamento tradizionale delle tracce di massa.

Una soluzione alternativa inizialmente considerata prevedeva la suddivisione del layer di massa in due zone distinte, separate fisicamente da una discontinuità nel piano di rame. Tale approccio è stato tuttavia scartato poiché le discontinuità nel piano di massa interrompono il percorso naturale di ritorno delle correnti, costringendole a percorsi più lunghi e ad alta impedenza. Questo fenomeno genera loop di corrente indesiderati che si comportano da antenne,

peggiorando le prestazioni elettromagnetiche del dispositivo (EMI) e introducendo potenziali differenze di potenziale tra le diverse zone di massa, con conseguente rischio di ground bounce e instabilità nei segnali digitali.

Per il collegamento dei componenti al piano di massa si è fatto uso di via corte e di dimensioni adeguate, posizionate il più vicino possibile ai pad di massa dei singoli componenti, al fine di minimizzare l'induttanza parassita del collegamento.

5.2.3. Layer superiore

Nel layer superiore sono presenti pochissimi componenti rispetto al layer inferiore; questo lato della scheda verrà inserito nel manico dello stadiometro e viene rivolto verso la batteria e quindi verso la parte interna della scocca. Qui si trovano tutti i connettori dato che sono i componenti più voluminosi e sono anche quelli necessarie per collegarsi alle periferiche esterne al PCB.

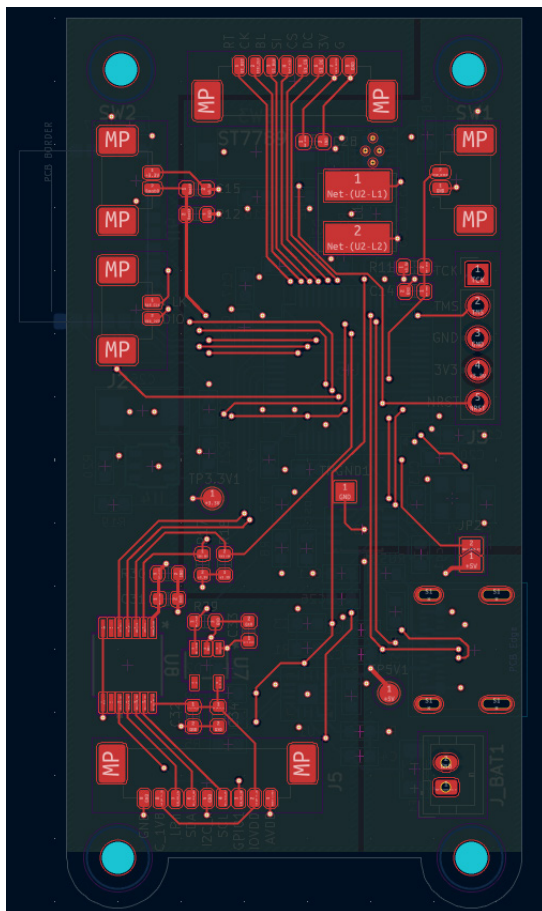


Figura 66. Vie e piste del layer superiore del PCB

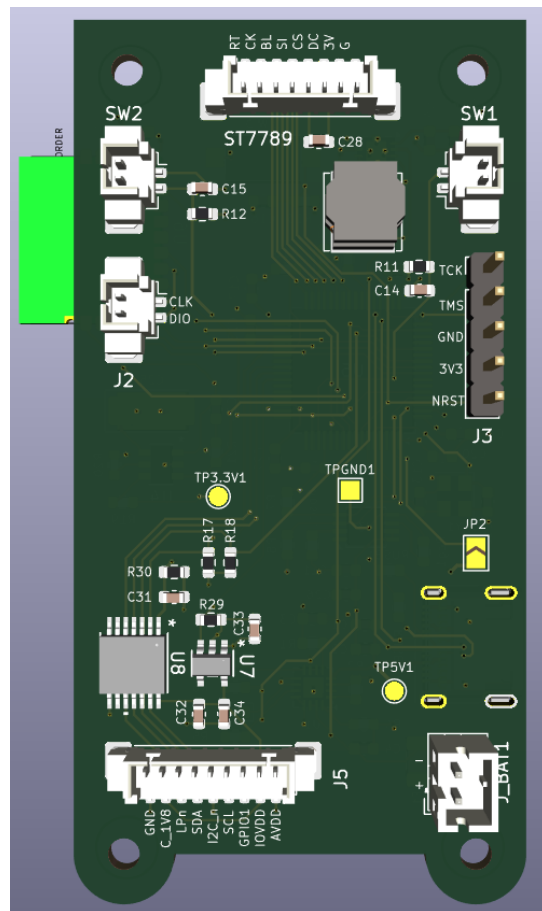


Figura 67. Render 3D del layer superiore

In generale i connettori sono posizionati in modo tale da minimizzare la distanza dalla relativa periferica. Infatti, nella scocca il display è posizionato nella parte superiore; i due pulsanti sono posizionati sulla parte alta del manico, il pulsante per le acquisizioni davanti mentre quello per l'accensione e lo spegnimento dietro e sotto al display; il sensore TOF sta sotto sulla base della scocca. Invece, gli altri connettori (J2, J3 e J_BAT) sono in quella posizione al fine di minimizzare la lunghezza delle piste.

Vicino al connettore del sensore sono posizionati i componenti necessari per la gestione dell'alimentazione del TOF e per la comunicazione con esso.

Ci sono anche tre test point, uno per la massa, uno per i 5 V e un altro per i 3 V e sono necessari per testare la scheda.

5.2.4. Layer inferiore

Il layer superiore è stato disegnato partendo dal connettore USB e dal microcontrollore, collegando i rispettivi pin dati con la coppia differenziale e posizionando il resto dei componenti attorno ad essi. La sfida più complessa è stata collegare i pin dei vari moduli al microprocessore perché anche se si provava a ruotare il microprocessore, i pin da collegare stavano molto spesso sul lato opposto. In particolare, per il modulo BLE ho avuto una complessità aggiuntiva, ovvero questa periferica è alimentata dal piano alimentato dal MIC2039 e quindi doveva stare sul bordo destro. Pertanto, ho dovuto riconfigurare alcuni pin e alla fine utilizzando una serie di transizioni tra lo strato superiore e quello inferiore tramite vie sono riuscito a collegarli.

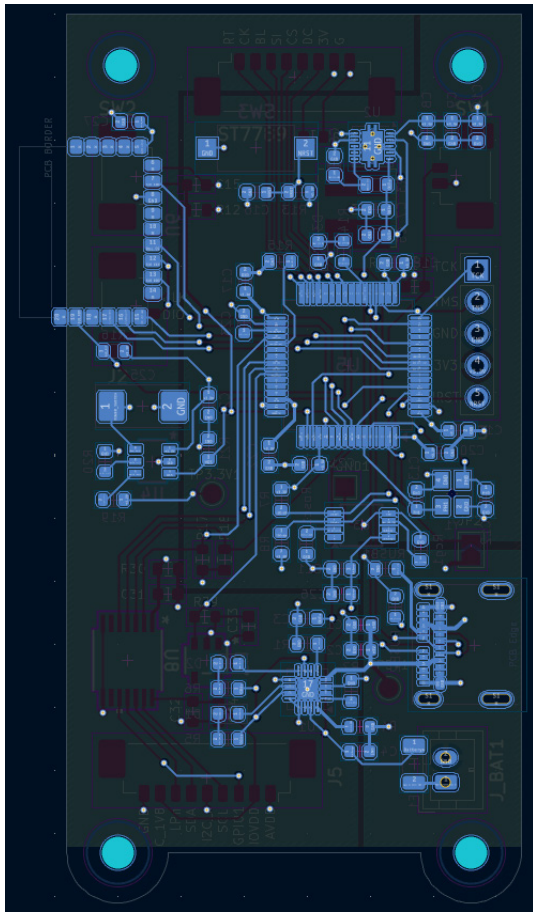


Figura 68. Vie e piste del layer inferiore del PCB

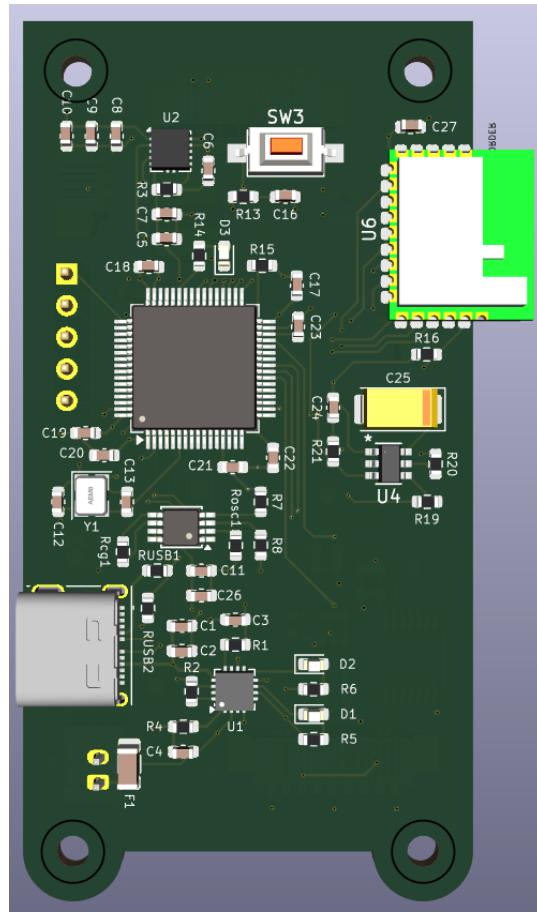


Figura 69. Render 3D del layer inferiore

Ho strutturato il circuito stampato cercando di ridurre al minimo la lunghezza dei percorsi e di tracciare linee rette con il minor numero possibile di curve. Ogni componente è collegato a un riferimento di massa o a una fonte di alimentazione. Ho posizionato i fori delle via il più vicino possibile ai pin per ottenere un design pulito del circuito stampato. Ho posizionato i fori delle via di massa sul pad centrale del TPS63001 e del BQ24075 creando una connessione di massa termica che consente un raffreddamento migliore.

Il BLE è stato posizionato in questo modo con un pin non collegato alla scheda perché, nel caso il pin non fosse utilizzato, il datasheet raccomanda questo design al fine di evitare che il diagramma di radiazione dell'antenna del modulo con antenna a chip sia influenzato dal piano di massa del PCB.

5.3. Firmware

5.3.1. Interfacce software

Per lo sviluppo del prototipo sono stati usati vari programmi.

STMcubeIDE

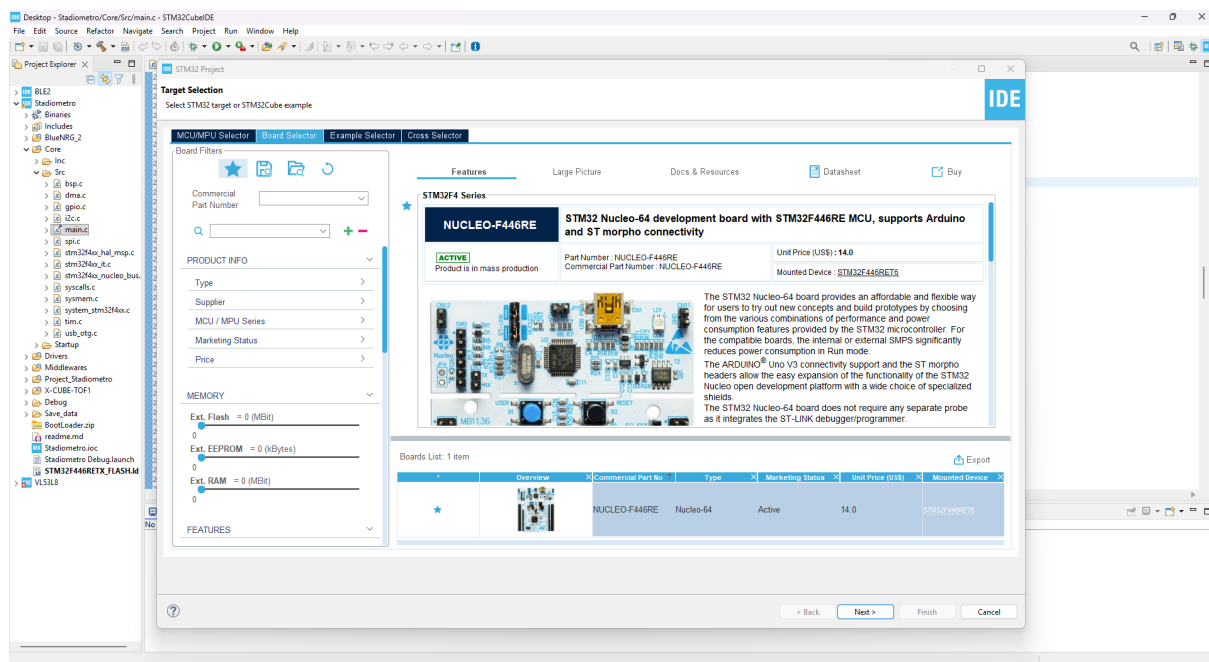


Figura 70. Interfaccia di STM32CubeIDE

STM32CubeIDE è l'ambiente di sviluppo integrato ufficiale di STMicroelectronics, basato su Eclipse e distribuito gratuitamente. Integra al suo interno STM32CubeMX, uno strumento di configurazione grafica che consente di selezionare il microcontrollore, assegnare le funzioni ai pin e configurare le periferiche (UART, SPI, I²C, timer, clock) tramite un'interfaccia visuale. Una volta configurate tutti i pin e le periferiche, l'IDE genera automaticamente il codice di inizializzazione in linguaggio C, utilizzando le librerie HAL di ST.

STM32CubeIDE è lo strumento centrale dello sviluppo firmware di questa tesi: è stato utilizzato per la generazione del codice base, per il debug tramite ST-LINK e per il caricamento del firmware sulla scheda STM32F446RE.

Tuttavia, per la programmazione del firmware, ho deciso di utilizzare un altro editor ovvero Visual Studio.

Virtual Studio Code

Visual Studio Code è un editor di codice sorgente leggero e altamente personalizzabile, sviluppato da Microsoft. Rispetto all'editor integrato di STM32CubeIDE, offre una migliore leggibilità del codice grazie a un'indentazione più pulita, syntax highlighting avanzato e una gestione più comoda dei file di progetto.

Nel contesto di questa tesi è stato utilizzato come editor ausiliario per la scrittura del firmware in C, mentre STM32CubeIDE rimane lo strumento principale per la generazione del codice, il debug e il caricamento del firmware sulla scheda.

puTTY

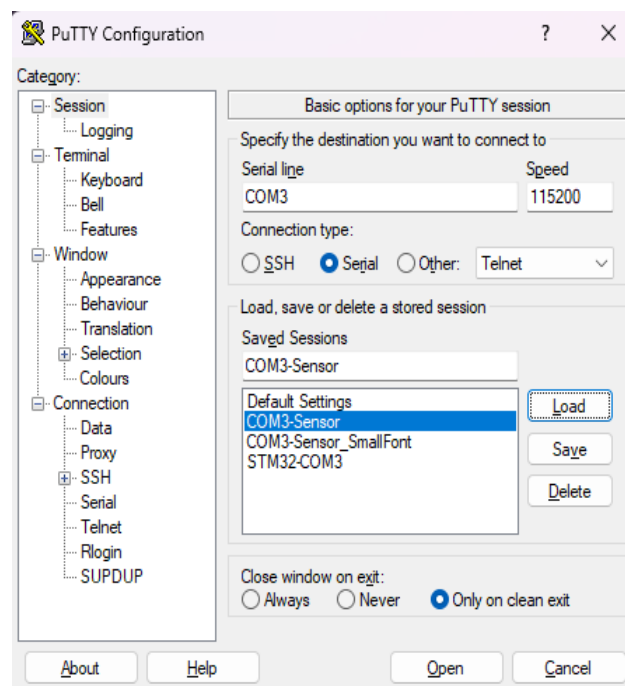


Figura 71. *Interfaccia di puTTY*

PuTTY è un client terminale open source per Windows che supporta connessioni seriali, SSH e Telnet.

Nel contesto di questo progetto è stato utilizzato per monitorare in tempo reale i dati trasmessi dalla scheda STM32F446RE tramite comunicazione UART. La scheda viene collegata al PC via USB-UART e si configura la porta COM con i seguenti parametri:

- Speed, ovvero il band rate, è impostato a 115200 bit/s;
- Data bits (ovvero la lunghezza della parola) è di 8 bits;
- Stop bits è invece impostato a 1.

In particolare, ho utilizzato PuTTY per leggere in tempo reale i valori, come le misure rilevate del sensore, e gli eventuali flag di errore, risultando così utile nelle fasi di verifica e collaudo rapido.

Python

Python è un linguaggio di programmazione interpretato ad alto livello, noto per la semplicità della sintassi e la ricchezza delle librerie disponibili.

In questo progetto è stato impiegato per realizzare uno script di acquisizione dati: il programma riceve dalla scheda STM32F446RE tramite porta seriale una serie di stringhe che contengono le informazioni riguardanti le misure acquisite dal sensore e salva i dati in una cartella sul sistema Windows in modo che possano essere letti da matlab come se fossero delle matrici.

Matlab

MATLAB è un ambiente di calcolo numerico e linguaggio di programmazione sviluppato da MathWorks, ampiamente utilizzato in ambito ingegneristico per l'elaborazione e la visualizzazione di dati.

Nel progetto è stato utilizzato nella fase di post-processing: i dati acquisiti e salvati dallo script Python vengono importati in MATLAB per essere analizzati, rappresentati graficamente e validati.

KiCad

KiCad è una suite EDA (Electronic Design Automation) open source per la progettazione di circuiti elettronici e PCB.

Il flusso di lavoro prevede due fasi principali: la realizzazione dello schematico elettrico, in cui si definiscono i componenti e le connessioni logiche tra di essi, e il layout del circuito stampato, in cui i componenti vengono posizionati fisicamente e collegati tramite piste di rame. KiCad include un visualizzatore 3D della scheda e un controllo automatico delle regole di progetto (DRC). Al termine della progettazione è possibile esportare i file in formato Gerber, standard per la produzione industriale di PCB.

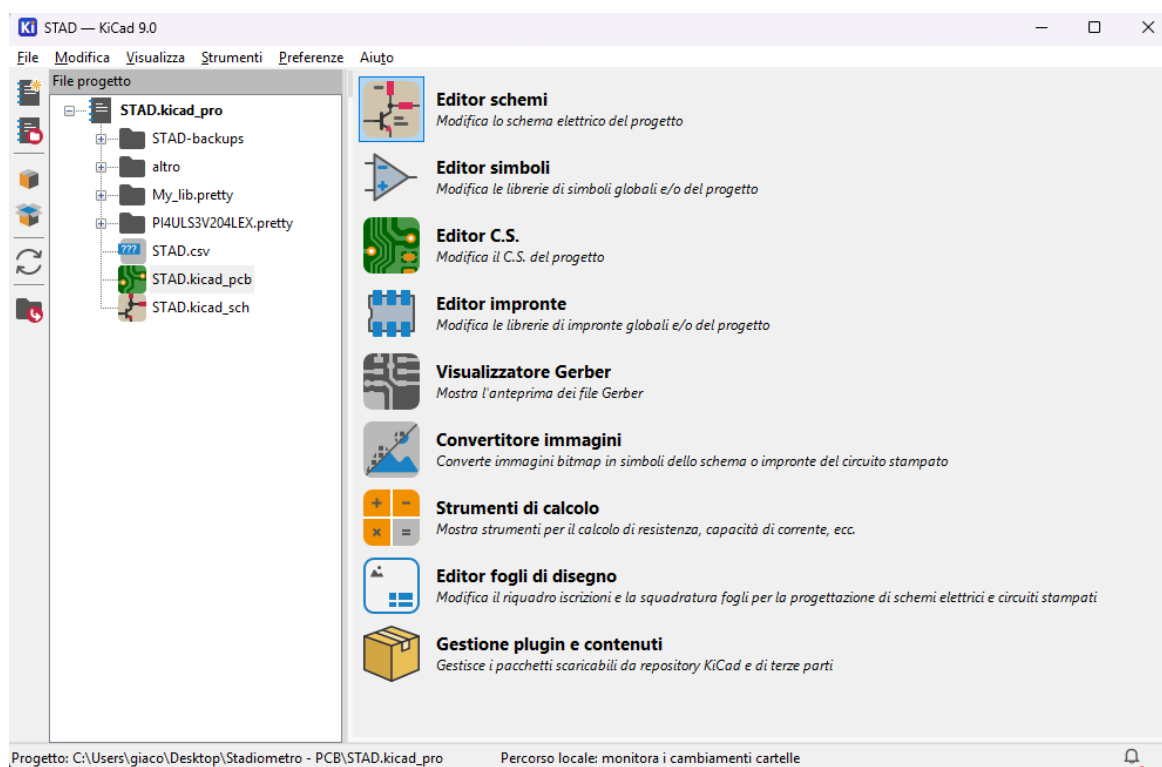


Figura 72. *Interfaccia di KiCad*

In questa tesi KiCad è stato utilizzato per la progettazione del circuito e del PCB dello strumento sviluppato.

FreeCAD

FreeCAD è un modellatore 3D parametrico open source orientato alla progettazione meccanica. Basato su un approccio feature-based, consente di costruire geometrie solide a partire da sketch 2D a cui vengono applicate operazioni come estrusioni, rivoluzioni e tasche, mantenendo la cronologia delle operazioni editabile in ogni momento. Supporta l'esportazione nei principali formati standard, tra cui STEP e STL.

Nel progetto FreeCAD è stato impiegato per progettare la scocca esterna dello strumento, ovvero l'involucro meccanico che alloggia il PCB e i componenti elettronici.

5.3.2. Logica principale

STM32CubeIDE genera automaticamente alcune sezioni di codice, con varie sezioni di utilità e la configurazione del dispositivo create autonomamente in base alle impostazioni definite nel file ".ioc". Questo file è un'interfaccia dedicata che facilita la gestione e l'assegnazione delle funzioni ai pin del microcontrollore, la configurazione del sistema di clock e la configurazione di tutte le periferiche integrate. Attraverso questa interfaccia, è possibile definire le configurazioni hardware senza scrivere manualmente il codice di inizializzazione, poiché il sistema genera automaticamente il codice di basso livello necessario per inizializzare e gestire correttamente le funzionalità del microcontrollore. Questo approccio migliora l'efficienza, riduce i tempi di sviluppo e minimizza il rischio di errori di configurazione, garantendo la coerenza in tutto il progetto.

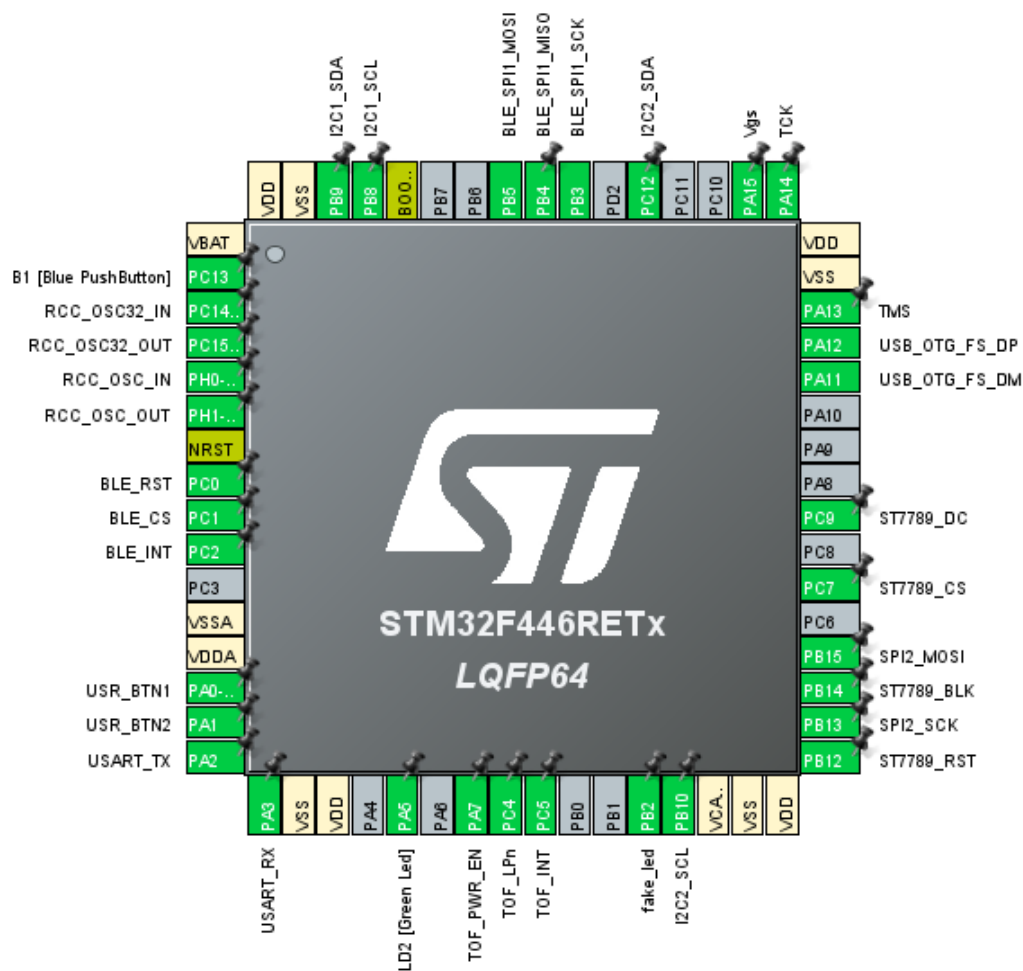


Figura 73. Configurazione dei pin del microcontrollore

Sono presenti sezioni dedicate in cui gli utenti possono scrivere il codice; qualsiasi riga di codice non scritta nello spazio dedicato verrà cancellata poiché il codice verrà generato dall'interfaccia.

È possibile impostare i parametri di configurazione e assegnare le funzioni dei pin impostando manualmente i registri del microcontrollore.

Il file di progetto è composto da sottocartelle e file contenenti librerie per la gestione di funzioni specifiche dell'interfaccia di programmazione, nonché istruzioni per la gestione di periferiche e funzioni esterne. Per ottenere il file main.c il più pulito possibile nella sezione “Project manager” è stata spunta la prima voce in “generate files” che sposta tutte le righe di codice per inizializzare le porte, le comunicazioni e i timer in altri file (.h e .c).

La logica del firmware può essere riassunta e schematizzata tramite il seguente diagramma a blocchi:

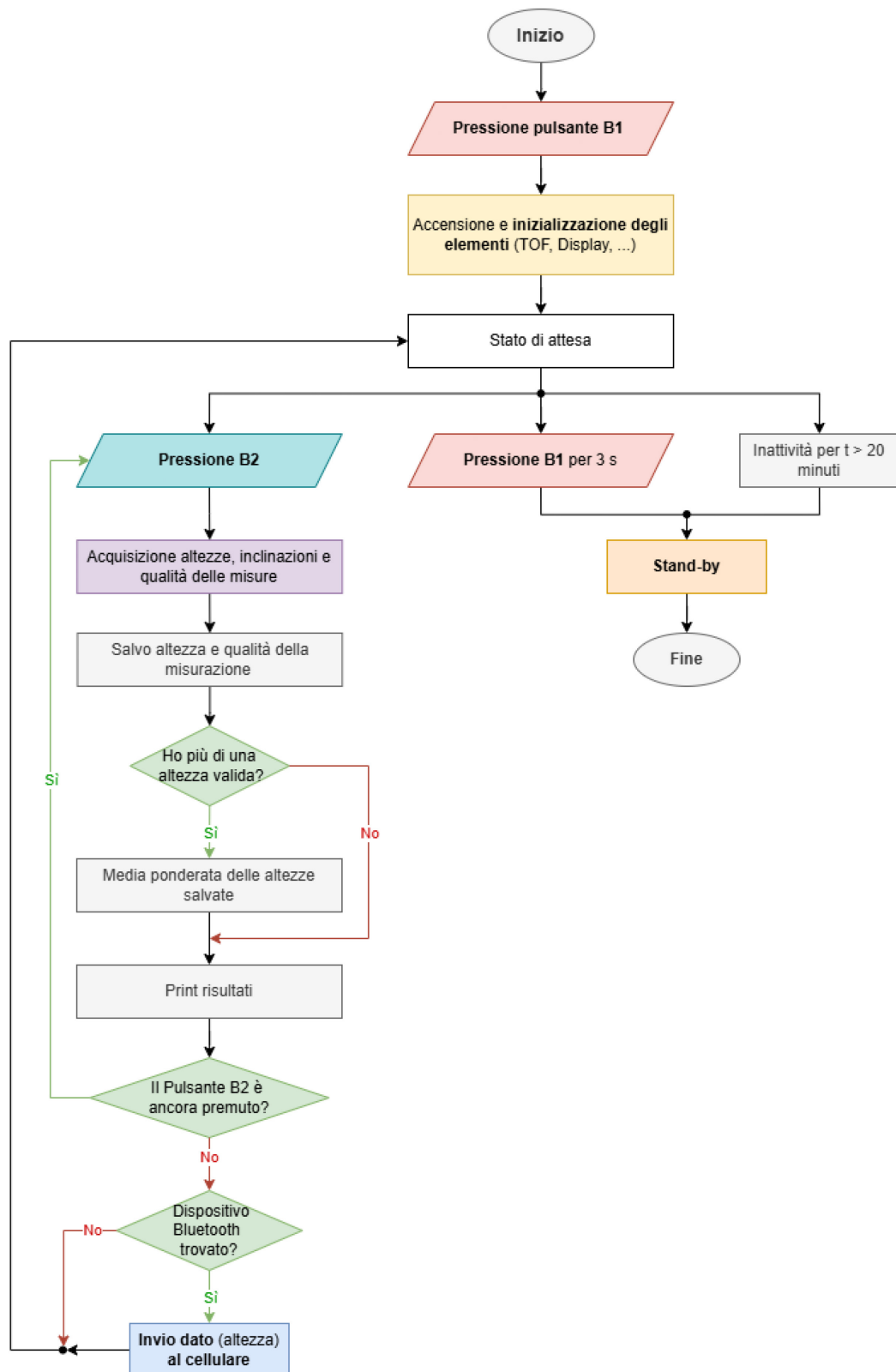


Figura 74. Diagramma di flusso del firmware

Una volta premuto il pulsante B1 (il pulsante che è posizionato nella parte frontale del dispositivo), **il dispositivo si accende** e inizia importando tutte le librerie (quindi i file .h), necessarie per usare le variabili globali e le funzioni presenti nel file di codice principale. Vi sono anche le librerie custom, come `fun_stadiometro.h` e `st7789.h`. Per esempio, la libreria `fun_stadiometro.h` contiene tutte le funzioni per la gestione del sensore TOF e per l'elaborazione e la visualizzazione del risultato.

Successivamente vengono **inizializzate tutte le macro e le variabili globali**, quindi tutte le variabili e flag che possono essere utilizzati al di fuori del `main.c`, se necessario; poi vengono **inizializzate le funzioni** che servono per gestire la durata della pressione dei pulsanti, per contare il tempo di inattività o in generale per la gestione del tempo di alcune azioni (*Scheduler*); infine, prima del loop principale vengono **inizializzate tutte le comunicazioni** (UART, SPI, I²C e le GPIO), **le periferiche** (VL53L8, BlueNRG-M2, STC3100 e ST7789) e **i timer**.

Nel mentre viene fatto tutto questo viene mostrato a schermo prima una schermata con i loghi del CUAMM e di UNIPD e poi una scritta con la versione del firmware.

Una volta fatto ciò si entra in un loop infinito che contiene tutto il codice necessario per il funzionamento dello stadiometro. Finché non viene premuto un tasto il dispositivo rimane in **stato di attesa** dove vengono svolte le seguenti attività:

- **Gestione delle connessioni bluetooth:** tramite la funzione `MX_BlueNRG_2_Process` si gestisce sia la fase di advertising che quella di connessione con lo smartphone.
- **Gestione della batteria:** ogni minuto viene aggiornato lo stato della batteria sul display.

Se viene premuto il pulsante B2, quello posto sul retro sotto al display, si entra nella sezione dedicata all'acquisizione della misura. Viene chiamata la funzione ***getResultMeasures*** che inizia acquisendo e filtrando tre misurazioni. Una volta verificato la loro validità vengono salvate in una struct per poi eseguire una media delle distanze contenute in ogni cella del sensore.

Una volta fatto questo viene calcolata anche la media generale tra i valori nelle celle al fine di poter usare le funzioni:

- ***getInclination*** che estrae le inclinazioni attorno agli assi x e y calcolando prima il rapporto tra lo scostamento dei valori tra celle adiacenti e la distanza media e poi sfruttando la curva di calibrazione delle inclinazioni vista nel paragrafo 4.5.5.
- ***getHeight*** che, tramite le inclinazioni e la distanza media, calcola l'altezza e la relativa qualità della misura.



Figura 75. Diagramma di flusso della funzione `getResultMeasures`

La funzione restituisce poi in uscita l'altezza, le inclinazioni e la relativa qualità e poi queste informazioni vengono subito accuratamente salvate in una struct.

La **qualità dell'altezza** è un indice che dipende solo dall'inclinazione perché si è visto che tanto più lo strumento è inclinato e meno è preciso. Quindi usando questo indice si può dare un peso maggiore a un risultato rispetto ad un altro.

Infatti, subito dopo si verifica se sono ci sono delle altre misure nella struct e nel caso positivo si effettua una **media ponderata di tutte le altezze** presenti in base alla loro qualità. Se la somma delle inclinazioni è minore di 10° il peso è pari a 2, se la somma è maggiore o uguale a 10° ma minore di 20° il peso sarà uguale a 1 e se, invece, la somma è maggiore di 20° allora il peso è 0 e l'altezza calcolata non è considerata valida.

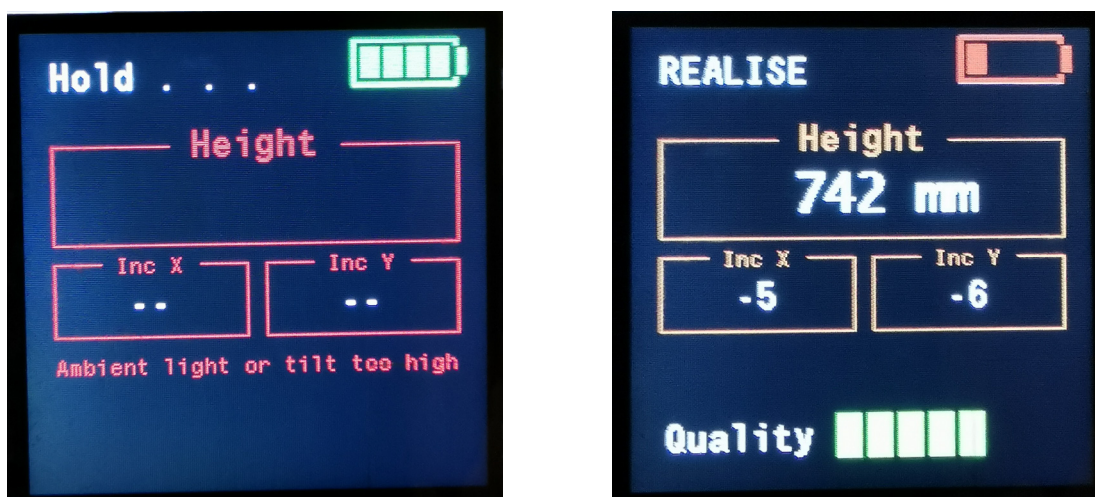


Figura 76. Visualizzazione delle misure in tempo reale sul display

Infine, viene **visualizzato a schermo l'altezza media nel tempo e l'inclinazione attuale** dello strumento. Oltre alla media viene calcolata anche la standard deviation che viene utilizzata per mostrare in alto quando il risultato sia abbastanza affidabile. Finché la standard deviation è minore di 5 mm o se no sono ancora trascorsi 15 s circa, in alto sul display comparirà "HOLD" e quindi si chiede all'operatore di tenere premuto il pulsante B2. In caso contrario compare "REALISE" e quindi l'utente può rilasciare il pulsante.

Una volta che viene mostrato sul display tutte queste informazioni si verifica se il tasto B2 è ancora premuto. Se il tasto B2 è ancora premuto il ciclo ricomincia e lo strumento esegue altre misure e calcola un'ulteriore altezza che verrà mediata con tutte le altezze precedenti al fine di ottenere un risultato preciso e accurato.

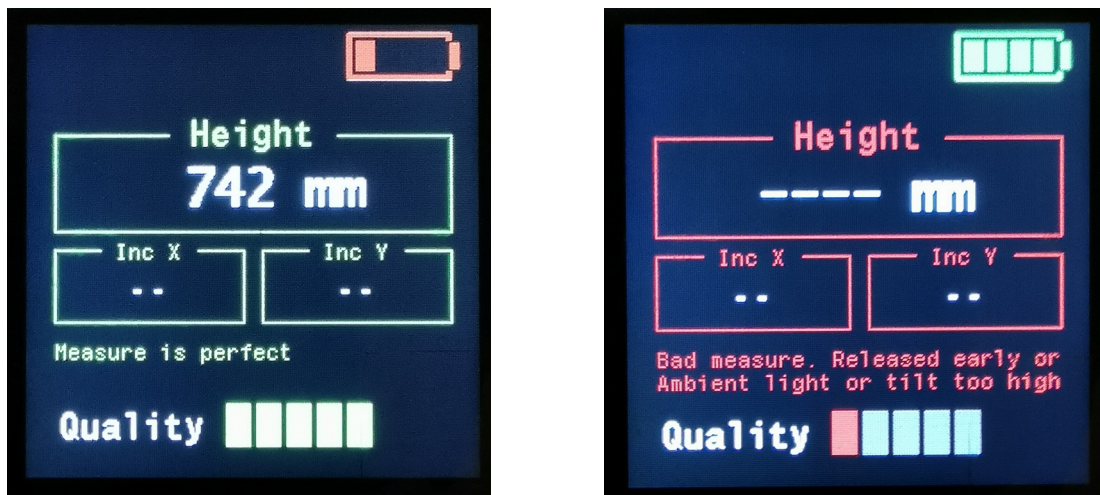


Figura 77. Visualizzazione del risultato sul display

Se il **pulsante B2** invece **risulta rilasciato**, a schermo viene mostrato il risultato finale e una barra della qualità del risultato che dipende dalla standard deviation finale calcolata. Se la standard deviation è:

- Minore di 5 mm ho cinque tacche di colore verde brillante;
- Minore di 10 mm ho quattro tacche di colore verde chiaro;
- Minore di 15 mm ho tre tacche di colore giallo;
- Minore di 20 mm ho due tacche di colore arancione;
- Maggiore di 20 mm ho 1 tacca di colore rosso e compare una spiegazione del fallimento della misurazione;

Dopo ciò si verifica se il dispositivo è accoppiato via bluetooth ad un cellulare e se sì gli invia l'altezza finale e infine torna allo stato di attesa.

Se invece viene premuto il pulsante B1 o per più di 20 minuti non viene premuto nulla il dispositivo chiamerà la funzione **ShutDown**, spegnerà tutte le periferiche e i timer, disattiverà lo switch e manderà il microprocessore in standby. Solo il pulsante B1 potrà riaccendere il dispositivo.

5.4. Test finale della scheda

Una volta saldati tutte le componenti sulla scheda si devono caricare i firmware del BLE e dello stadiometro.

Per caricare il firmware del BLE si deve:

- 1) Collegare il connettore UART (il connettore J2 posto sulla scheda sotto il modulo BLE) e il pin GND di J3 al connettore SWD (o CN4) della NUCLEO, come mostrato nell'immagine 78;

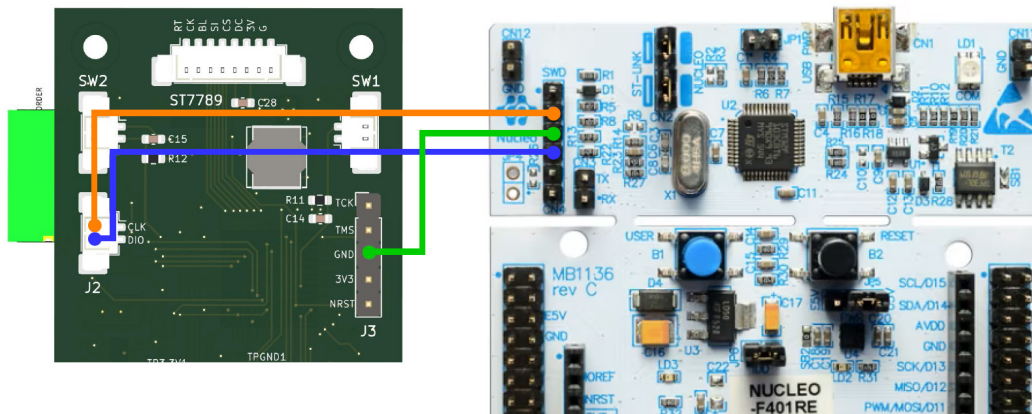


Figura 78. Collegamenti per il caricamento del firmware del BLE sulla scheda

- 2) Aprire il programma *BlueNRG-1 ST-Link Utility*;
- 3) Nel programma, aprire file *BLUENRG-M2SP_DTM_SPI.hex* che si trova all'interno della cartella *BlueNRG-M2SA_M2SP_DTM_Stack_v2.1e* / *BLUENRG-M2SP_32MHz_RO_SMPS_off* / *SPI*;
- 4) Premere "Connect to the target"
- 5) In alto premere Target e poi Program. Così facendo, in pochi si carica il firmware del BLE.

Invece per caricare il firmware per il funzionamento dello stadiometro basta:

- 1) Connettere i pin TCK, TMS, GND, 3V3 e NRST del connettore J3 della scheda con i corrispondenti pin del connettore CN4 posto sul nucleo, come mostrato nell'immagine 79;

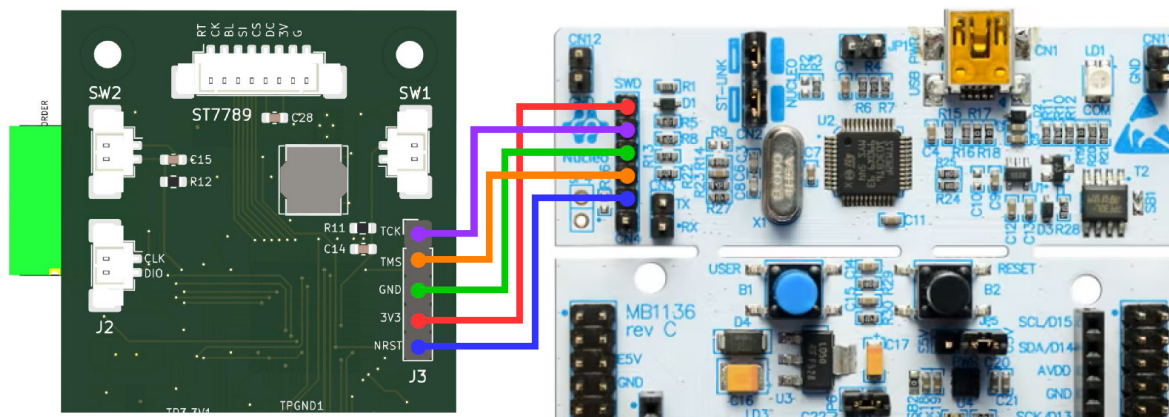


Figura 79. Collegamenti per il caricamento del firmware dello strumento sulla scheda

- 2) Aprire il programma *STM32 CubeIDE* con la versione più recente del codice dello stadiometro;
- 3) Iniziare il debug premendo il pulsante “Run Stadiometro Debug” e caricando così il firmware aggiornato sulla scheda.

Una volta caricato entrambi i firmware la scheda dovrebbe essere stata pronta all'uso, ma sono sorti alcuni problemi, tra cui:

- **L'oscillatore esterno non funzionava.** Guardando il firmware è stato notato che nel file IOC, nella sezione “Clock configuration”, il parametro HSE era pari a 8 Mhz. Questo valore andava bene quando si usava il microprocesso della Nucleo, però nella scheda custom è stato montato un oscillatore da 24 Mhz e quindi bisogna aggiornare HSE con questo valore. Poi, dopo aver sistemato anche la saldatura, il problema è stato risolto.
- **Il sensore TOF non si inizializzava.** Per prima cosa è stato verificato che le tre alimentazioni fossero a posto. Dato che era tutto alimentato correttamente, ho ricontrollato che tutti i collegamenti fossero giusti e ho scoperto di aver collegato la porta EN (pin 8) del componente U8 (il level shifter PI4ULS3V204LEX) a terra. Era questo motivo che le

comunicazioni erano interrotte. Pertanto, è stato modificato il PCB e temporaneamente il pin è stato scollegato dalla scheda, collegandolo direttamente alla linea alimentata dal load switch e risolvendo anche questo errore.

- Il **BLE non si inizializzava** e dopo avere controllato le saldature e il firmware dello stadiometro, è stato scoperto che il firmware del BLE all'interno della cartella BLUENRG-M2SP_32MHz_RO_SMPS_on / SPI non funzionava. Provando il firmware nell'altra cartella (BLUENRG-M2SP_32MHz_RO_SMPS_off / SPI), il BLE è riuscito a inicializzarsi e permettendo così di effettuare una connessione con il cellulare.
- Lo **spegnimento del dispositivo presentava un malfunzionamento**. Alla prima alimentazione, ovvero al collegamento della batteria al connettore o a un caricabatterie, la scheda si accendeva correttamente, ma dopo la pressione del tasto di spegnimento lo strumento si spegneva e si riaccendeva immediatamente. Provando a spegnerlo nuovamente, il dispositivo rimaneva invece correttamente in standby, funzionando come previsto. Il problema si verificava quindi una sola volta, alla prima accensione, e non si ripresentava successivamente. L'aggiunta del comando di pulizia dei flag ha risolto il problema, sebbene il riavvio dello strumento non risulti più istantaneo come in precedenza.
- L'**inizializzazione dei dispositivi risultava molto lenta**. Il dispositivo impiegava 10÷15 s per inizializzare il sensore TOF e il modulo BLE. Aumentando la velocità di comunicazione del bus I2C2, dedicato al sensore TOF, il tempo di inizializzazione è stato ridotto a 5 s.

Una volta risolti tutti questi problemi è stato proceduto con lo stampaggio della scocca dello stadiometro.

5.5. Chassis

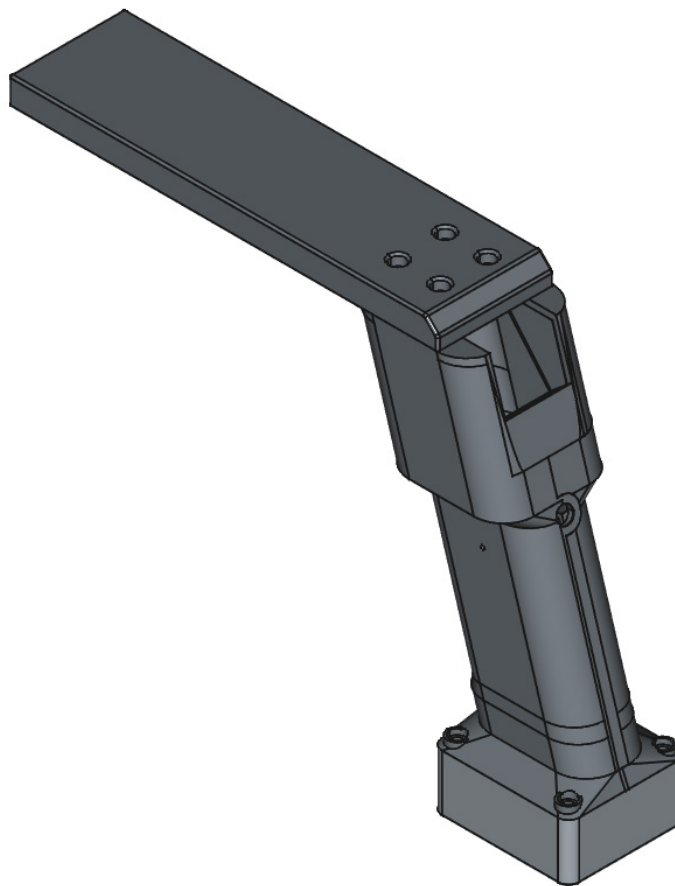


Figura 80. Scocca dello stadiometro

Lo chassis (o scocca) è stato concepito con un duplice obiettivo: garantire un'impugnatura ergonomica e facilitare le operazioni di assemblaggio e manutenzione. A tale scopo, il manico è suddiviso in due semi gusci collegati tramite quattro viti, consentendo l'accesso all'interno senza attrezzature speciali.

La parte destra del manico ospita la maggior parte delle componenti elettroniche e meccaniche, disposte secondo criteri di accessibilità e usabilità:

- **Scheda elettronica:** posizionata nella sezione centrale, corrispondente alla zona di minor spessore del manico, è fissata alla scocca mediante quattro viti;
- **Display:** collocato nella parte superiore, immediatamente al di sotto dell'asta;
- **Pulsante di misura:** alloggiato nella parte anteriore superiore, sotto l'asta, a un'altezza tale da consentirne la pressione del pulsante con il dito indice in modo naturale;

- **Pulsante di accensione/spegnimento:** posizionato nella parte posteriore superiore, sotto il display, in modo da poter essere raggiunto comodamente con il pollice.

La parte sinistra del manico è riservata esclusivamente al vano batteria. Questa scelta progettuale permette, una volta rimosse le quattro viti di fissaggio, di scollegare semplicemente la batteria dalla scheda e accedere all'elettronica senza dover smontare ulteriori componenti.

Le dimensioni dell'impugnatura sono 34 mm di larghezza, 50 mm di lunghezza e 85 mm di altezza. Tutti gli spigoli sono stati raccordati per migliorare il comfort durante l'utilizzo prolungato.

Alla base del manico si aggancia il corpo inferiore dello strumento, nel quale è ricavata la sede di alloggiamento del sensore TOF. Il sensore è stato posizionato in una cavità rientrata rispetto alla superficie esterna, così da schermare parzialmente la luce ambientale e ridurre l'interferenza con le misure. Al di sotto di tale sede è stata prevista un'ulteriore cavità per l'installazione di un filtro ottico, utile sia alla reiezione della luce ambientale residua sia alla protezione del sensore da polvere e agenti esterni.

L'asta di misura, infine, si avvita nella parte superiore del manico tramite 4 viti, che ne consente la rimozione con un semplice cacciavite al fine di facilitare il trasporto e il ripiegio dello strumento.

6. Validazione e test

Per calibrare lo strumento sono state utilizzate le rette di calibrazione stimate nel capitolo 4.5.5. Successivamente, fissato a una parete un metro a nastro e appoggiando l'asta dello stadiometro all'altezza desiderata, sono state acquisite misure a quote comprese tra 400 mm e 1800 mm, con passo di 200 mm, e con inclinazioni di circa 0°, 10° e 20° intorno agli assi x e y. Il training set presenta pertanto un massimo di 48 distanze grezze.

I risultati vengono analizzati in tre condizioni ambientali: in ambiente interno, all'esterno all'ombra e all'esterno in presenza di luce solare diretta.

Ambiente interno e ambiente esterno all'ombra

Si è iniziato acquisendo 48 misure in ambiente interno, osservando a 0° di inclinazione uno scostamento medio di -168 mm, dovuto alla differenza tra il punto di acquisizione del sensore e il punto di misurazione della statura del soggetto. Sono stati inoltre individuati due andamenti distinti:

- un andamento parabolico all'aumentare dell'altezza;
- un andamento lineare all'aumentare dell'inclinazione lungo l'asse y.

Per le inclinazioni attorno all'asse x, gli scostamenti risultavano invece contenuti, nell'intorno di -167 mm, con variazioni di natura casuale.

Si è quindi proceduto sommando 168 mm alle distanze grezze e applicando un modello lineare, inizialmente per adattare le distanze alle diverse inclinazioni e successivamente per esprimere i parametri delle rette stimate in funzione dell'inclinazione lungo l'asse y.

Il firmware è stato quindi aggiornato di conseguenza e sono stati acquisiti nuovi set di dati, dai quali si è notato che a quote basse (400÷500 mm) e medie (800÷1300 mm) erano presenti errori nell'intorno dei 10 mm. L'accuratezza media risultava di 2.3 mm e la precisione di 6.3 mm. Sebbene si tratti di prestazioni complessivamente ottime, esse risultavano inferiori a quelle del prototipo precedente, che presentava un'accuratezza media di 0.2 mm e una precisione di 4.3 mm.

Si è quindi deciso di adattare le distanze (d_{corretto}) mediante un modello parabolico, i cui parametri vengono interpolati linearmente in funzione dell'inclinazione lungo l'asse y (α), al fine di minimizzare gli errori alle quote basse e medie, ottenendo le seguenti curve:

$$a(\alpha) = 2.06 \times 10^{-7} \times \alpha + 1.50 \times 10^{-5}$$

$$b(\alpha) = 4.94 \times 10^{-4} \times \alpha + 0.96$$

$$c(\alpha) = 2.84 \times \alpha + 18.46$$

$$d_{\text{corretto}} = d_{\text{grezzo}} + 168$$

$$Altezza_{\text{finale}} = a(\alpha) \times d_{\text{corretto}}^2 + b(\alpha) \times d_{\text{corretto}} + c(\alpha)$$

Una volta ottenuta questa curva, è stata integrata nel firmware; sono stati quindi acquisiti i seguenti risultati:

Altezza reale [mm]	Altezza misurata dallo stadiometro [mm]	Errore misura (Accuratezza) [mm]	Accuratezza %
300	306	6	2,00
350	350	0	0,00
400	399	-1	-0,25
400	399	-1	-0,25
420	417	-3	-0,71
440	444	4	0,91
450	447	-3	-0,67
460	455	-5	-1,09
480	476	-4	-0,83
500	495	-5	-1,00
500	496	-4	-0,80
520	519	-1	-0,19
540	537	-3	-0,56
550	546	-4	-0,73
560	558	-2	-0,36
580	587	7	1,21
600	599	-1	-0,17
600	598	-2	-0,33
620	616	-4	-0,65
640	638	-2	-0,31
650	649	-1	-0,15
660	662	2	0,30
680	681	1	0,15
700	697	-3	-0,43

700	697	-3	-0,43
720	719	-1	-0,14
740	739	-1	-0,14
750	749	-1	-0,13
760	761	1	0,13
760	762	2	0,26
780	782	2	0,26
800	802	2	0,25
800	801	1	0,13
820	820	0	0,00
840	840	0	0,00
850	850	0	0,00
860	860	0	0,00
880	880	0	0,00
900	899	-1	-0,11
900	900	0	0,00
920	921	1	0,11
940	943	3	0,32
950	950	0	0,00
960	964	4	0,42
980	983	3	0,31
1000	1000	0	0,00
1000	1002	2	0,20
1020	1020	0	0,00
1040	1042	2	0,19
1050	1049	-1	-0,10
1060	1061	1	0,09
1080	1081	1	0,09
1100	1100	0	0,00
1100	1097	-3	-0,27
1120	1121	1	0,09
1140	1143	3	0,26
1150	1151	1	0,09
1160	1163	3	0,26
1170	1172	2	0,17
1180	1182	2	0,17
1200	1201	1	0,08
1220	1220	0	0,00
1230	1230	0	0,00
1240	1239	-1	-0,08
1250	1251	1	0,08
1260	1260	0	0,00
1280	1281	1	0,08
1300	1299	-1	-0,08
1300	1300	0	0,00
1320	1319	-1	-0,08
1340	1335	-5	-0,37
1350	1352	2	0,15
1360	1359	-1	-0,07
1370	1369	-1	-0,07

1380	1381	1	0,07
1400	1394	-6	-0,43
1400	1401	1	0,07
1450	1448	-2	-0,14
1500	1499	-1	-0,07
1500	1493	-7	-0,47
1550	1544	-6	-0,39
1600	1598	-2	-0,13
1600	1602	2	0,13
1600	1600	0	0,00
1650	1641	-9	-0,55
1700	1691	-9	-0,53
1700	1696	-4	-0,24
1700	1695	-5	-0,29
1750	1744	-6	-0,34
1800	1785	-15	-0,83
1800	1797	-3	-0,17
1800	1795	-5	-0,28
1800	1789	-11	-0,61
1850	1844	-6	-0,32
1900	1896	-4	-0,21
1900	1895	-5	-0,26
1950	1955	5	0,26
2000	1995	-5	-0,25
2000	1997	-3	-0,15

Tabella 2. *Dati raccolti con lo stadiometro digitale all'interno di un edificio*

Ora la maggior parte dei risultati presenta un errore inferiore a 5 mm. Solo in 9 casi su 99 l'errore è compreso tra 6 e 9 mm (evidenziati in arancione) e solo in 2 casi supera i 10 mm (evidenziati in rosso).

In generale, l'accuratezza media e la precisione sono rispettivamente di -1.1 mm e 3.6 mm, però se si considerano solo le altezze inferiori a 1400 mm, i valori si abbassano a -0.2 mm e 2.5 mm. Questo modello consente quindi di ottenere, in generale, prestazioni migliori rispetto al prototipo precedente, senza la necessità di allineare perfettamente lo strumento al terreno.

Con la medesima curva sono state eseguite 33 misure all'esterno all'ombra, al fine di verificare se i risultati ottenuti fossero comparabili a quelli precedenti.

Altezza reale [mm]	Altezza misurata dallo stadiometro [mm]	Errore misura (Accuratezza) [mm]	Accuratezza %
350	348	-2	-0,57
400	402	2	0,50
450	449	-1	-0,22
500	497	-3	-0,60
550	546	-4	-0,73
600	594	-6	-1,00
650	645	-5	-0,77
700	697	-3	-0,43
750	745	-5	-0,67
800	796	-4	-0,50
850	846	-4	-0,47
900	898	-2	-0,22
950	951	1	0,11
1000	998	-2	-0,20
1050	1049	-1	-0,10
1100	1100	0	0,00
1150	1153	3	0,26
1200	1201	1	0,08
1200	1201	1	0,08
1250	1251	1	0,08
1300	1302	2	0,15
1300	1299	-1	-0,08
1350	1351	1	0,07
1400	1400	0	0,00
1450	1457	7	0,48
1500	1502	2	0,13
1500	1503	3	0,20
1550	1553	3	0,19
1600	1604	4	0,25
1650	1654	4	0,24
1700	1702	2	0,12
1700	1704	4	0,24
1750	1753	3	0,17

Tabella 3. *Dati raccolti con lo stadiometro digitale all'esterno all'ombra*

Solo in 2 casi l'errore supera leggermente i 5 mm, garantendo prestazioni simili al caso precedente, con un'accuratezza media di 0.03 mm e una precisione di 3.1 mm.

Le prestazioni del modello scelto si apprezzano meglio nel grafico successivo, dove non solo i risultati risultano molto vicini alla curva di calibrazione, ma si osserva anche l'assenza di

differenze significative tra le altezze acquisite in ambiente interno e quelle acquisite all'esterno all'ombra.

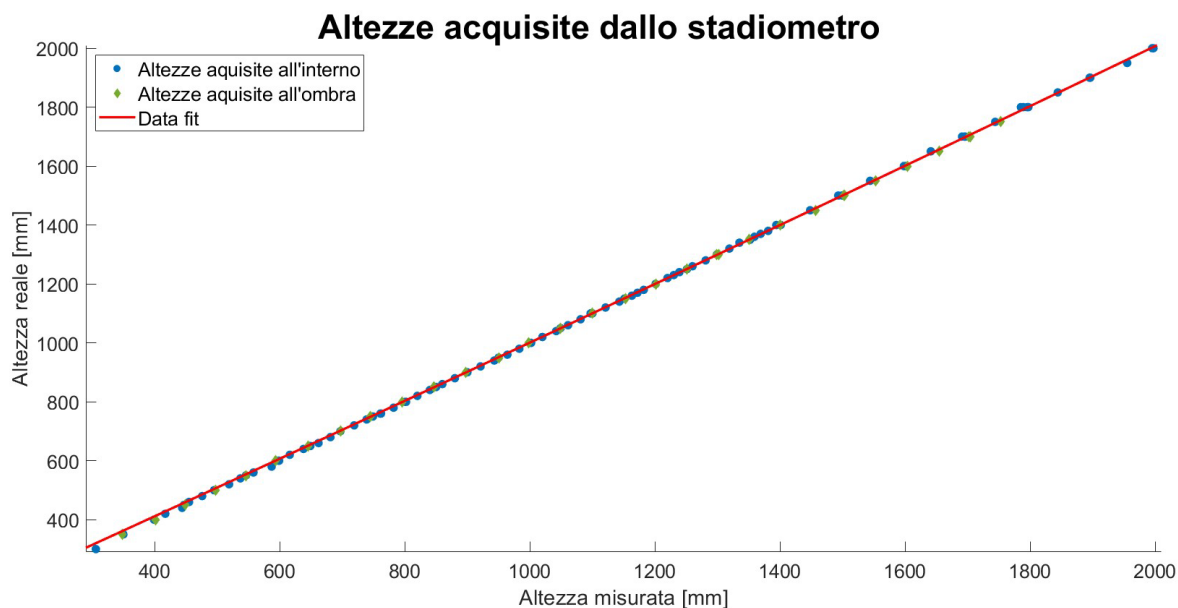


Figura 81. *Altezze acquisite all'interno e all'esterno all'ombra dallo stadiometro*

Si ottiene così un'accuratezza complessiva di -0.8 mm e una precisione di 3.5 mm fino a 2000 mm, e un'accuratezza di -0.2 mm e una precisione di 2.5 mm fino a 1400 mm.

Ambiente esterno sotto al sole

In presenza di luce solare diretta la situazione risulta ancora più critica rispetto a quanto riscontrato nelle analisi del capitolo 4.5.5. A causa della geometria dello strumento, l'inclinazione influisce maggiormente sul risultato. Inoltre, poiché le distanze acquisite dal sensore sono particolarmente rumorose in queste condizioni e l'inclinazione viene stimata a partire da esse, si osservano variazioni dell'inclinazione stimata fino a 10° anche con lo strumento mantenuto fermo. Ciò rende più difficile l'acquisizione dei dati di addestramento del modello rispetto a quanto avviene in ambienti meno illuminati.

A differenza di prima, l'utilizzo dello strumento in presenza di luce solare diretta richiede un modello differente. Sono state quindi acquisite nuove misure grezze in tali condizioni, ma non essendo emersi andamenti particolari e disponendo di soli 24 dati (8 altezze differenti combinate con 3 inclinazioni lungo l'asse y), si è scelto di evitare un modello polinomiale di

grado elevato (maggiore di 2) e di mantenere la stessa struttura del modello precedente ma con parametri differenti.

I parametri della curva sono stati stimati utilizzando solo i dati relativi ad altezze inferiori a 1400 mm e inclinazioni inferiori a 10°, condizioni in cui il rumore risultava meno marcato, al fine di privilegiare la precisione dello strumento alle quote più basse. Il modello scelto è il seguente:

$$a(\alpha) = 3.29 \times 10^{-6} \times \alpha - 4.67 \times 10^{-5}$$

$$b(\alpha) = 4.55 \times 10^{-3} \times \alpha + 1.05$$

$$c(\alpha) = 5.44 \times \alpha - 7.00$$

$$d_{\text{corretto}} = d_{\text{grezzo}} + 168$$

$$\text{Altezza}_{\text{finale}} = a(\alpha) \times d_{\text{corretto}}^2 + b(\alpha) \times d_{\text{corretto}} + c(\alpha)$$

Usando questo modello sono state acquisite i seguenti risultati:

Altezza reale [mm]	Altezza misurata dallo stadiometro [mm]	Errore misura (Accuratezza) [mm]	Accuratezza %
400	402	2	0,50
400	391	-9	-2,25
420	414	-6	-1,43
440	434	-6	-1,36
460	453	-7	-1,52
480	473	-7	-1,46
500	495	-5	-1,00
500	492	-8	-1,60
500	493	-7	-1,40
520	519	-1	-0,19
540	538	-2	-0,37
560	561	1	0,18
580	576	-4	-0,69
600	598	-2	-0,33
600	601	1	0,17
600	601	1	0,17
620	618	-2	-0,32
640	642	2	0,31
660	658	-2	-0,30

680	681	1	0,15
700	698	-2	-0,29
700	699	-1	-0,14
700	701	1	0,14
720	719	-1	-0,14
740	736	-4	-0,54
760	762	2	0,26
780	779	-1	-0,13
800	801	1	0,13
800	802	2	0,25
800	799	-1	-0,13
820	820	0	0,00
840	841	1	0,12
860	859	-1	-0,12
880	880	0	0,00
900	901	1	0,11
900	904	4	0,44
900	902	2	0,22
920	922	2	0,22
940	941	1	0,11
960	962	2	0,21
980	980	0	0,00
1000	1001	1	0,10
1000	1007	7	0,70
1000	1003	3	0,30
1020	1017	-3	-0,29
1040	1038	-2	-0,19
1060	1062	2	0,19
1060	1057	-3	-0,28
1070	1076	6	0,56
1080	1083	3	0,28
1080	1078	-2	-0,19
1090	1083	-7	-0,64
1100	1103	3	0,27
1100	1108	8	0,73
1100	1097	-3	-0,27
1100	1094	-6	-0,55
1110	1103	-7	-0,63
1120	1118	-2	-0,18
1120	1112	-8	-0,71
1130	1118	-12	-1,06
1140	1134	-6	-0,53
1140	1134	-6	-0,53
1150	1141	-9	-0,78
1160	1152	-8	-0,69
1170	1162	-8	-0,68
1180	1169	-11	-0,93
1190	1178	-12	-1,01

1200	1203	3	0,25
1200	1206	6	0,50
1200	1185	-15	-1,25
1220	1208	-12	-0,98
1240	1229	-11	-0,89
1260	1245	-15	-1,19
1280	1263	-17	-1,33
1300	1291	-9	-0,69
1300	1298	-2	-0,15
1300	1281	-19	-1,46
1320	1302	-18	-1,36
1340	1320	-20	-1,49
1360	1336	-24	-1,76
1380	1358	-22	-1,59
1400	1391	-9	-0,64
1400	1384	-16	-1,14
1420	1397	-23	-1,62
1440	1414	-26	-1,81
1460	1434	-26	-1,78
1460	1427	-33	-2,26
1480	1443	-37	-2,50
1500	1475	-25	-1,67
1500	1477	-23	-1,53
1500	1460	-40	-2,67
1530	1490	-40	-2,61
1550	1509	-41	-2,65
1600	1550	-50	-3,13
1650	1597	-53	-3,21
1700	1638	-62	-3,65
1800	1729	-71	-3,94

Tabella 4. *Dati raccolti con lo stadiometro digitale all'esterno sotto al sole*

Dalla tabella precedente si osserva che, fino a 1200 mm, l'errore è quasi sempre inferiore a 10 mm, a eccezione di tre casi; tra 1200 mm e 1300 mm l'errore si attesta generalmente tra 10 e 20 mm, mentre a partire da 1300 mm l'errore si aggira inizialmente intorno ai 20 mm per poi aumentare progressivamente, raggiungendo i 71 mm a 1800 mm.

Risultano particolarmente significativi i tre risultati ottenuti a 1300 mm: il primo presenta uno scostamento di 9 mm, il secondo di 2 mm e il terzo di 19 mm. Da questi valori si può dedurre che la precisione dello strumento risulti già non elevata a tale quota.

L'andamento dello scostamento tra le altezze reali e i risultati del modello proposto si osserva con maggiore chiarezza nel grafico seguente.

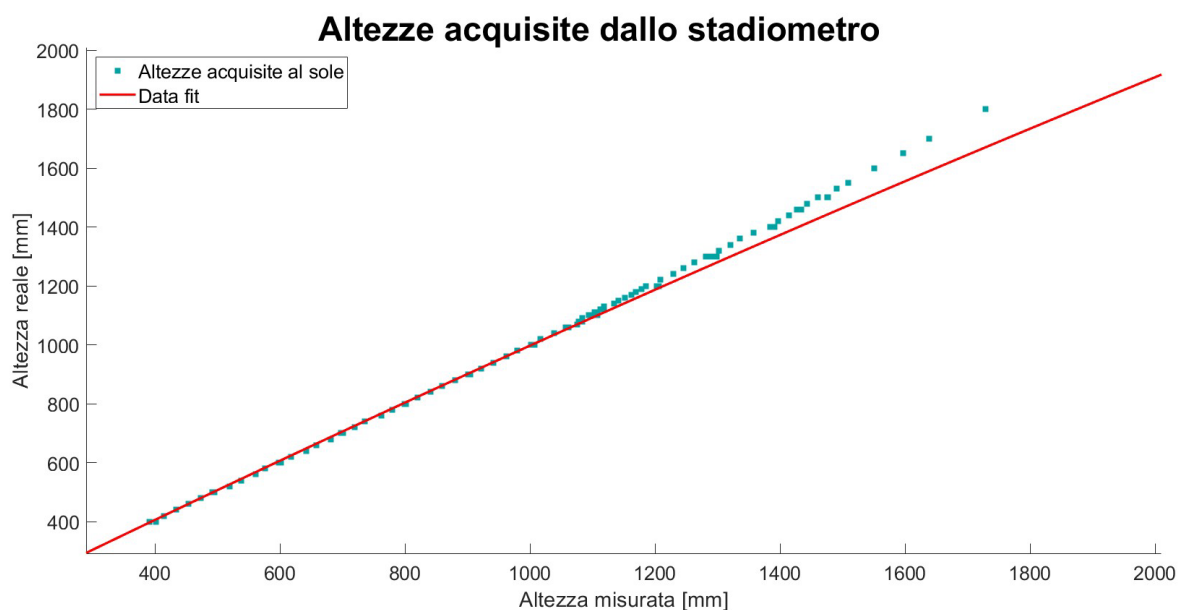


Figura 82. *Altezze acquisite all'esterno sotto al sole dallo stadiometro*

Si osserva che, fino a circa 1100 mm, i dati risultano vicini alla curva di calibrazione, mentre lo scostamento cresce progressivamente al crescere dell'altezza.

Osservando il grafico si potrebbe ipotizzare di adottare un modello polinomiale di grado superiore oppure di adattare ulteriormente i dati per le sole altezze superiori a 1200 mm. Tuttavia, entrambe le soluzioni richiederebbero un training set più ampio, sia per caratterizzare meglio il comportamento delle misurazioni in presenza di luce solare diretta, sia per evitare un overfitting del modello.

Permane inoltre un problema di fondo, legato alla marcata imprecisione nella stima dell'inclinazione da parte del sensore TOF: anche quando la distanza effettiva rimane pressoché costante, il modello applica correzioni di entità variabile in funzione dell'inclinazione calcolata, generando risultati instabili. Di conseguenza, anche individuando il modello più adatto possibile, molto probabilmente la precisione ad altezze elevate, seppur superiore rispetto alla situazione precedente, rimarrebbe insoddisfacente.

Per questo motivo non si è proceduto nella ricerca di un modello migliore, rinunciando a garantire, in presenza di luce solare diretta, la stessa precisione e accuratezza ottenute fino a 2000 mm in ambienti meno illuminati. Fino a 1200 mm lo strumento garantisce comunque una precisione di 4.9 mm e un'accuratezza media di -2 mm, mentre per altezze superiori non può attualmente essere considerato affidabile, presentando un'accuratezza media di -25 mm e una precisione di 30.6 mm.

7. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di sviluppare una nuova versione dello stadiometro digitale portatile per il monitoraggio della malnutrizione infantile, superando le criticità riscontrate nel prototipo precedentemente realizzato e impiegato sul campo dal CUAMM in Uganda. Il percorso seguito ha previsto, in primo luogo, un'analisi approfondita delle alternative disponibili per il sensore di misura, che ha condotto alla scelta dei sensori TOF multi-zona VL53L5CX e VL53L8 in sostituzione del precedente sensore a singolo punto, e successivamente la progettazione e realizzazione completa del nuovo prototipo, comprendente schematico, PCB, firmware e scocca meccanica.

L'analisi sperimentale condotta sui due sensori ha permesso di selezionare il VL53L8 come componente più adatto al progetto, grazie a prestazioni nettamente superiori in presenza di luce solare diretta rispetto al VL53L5CX, e di caratterizzarne il comportamento in funzione di parametri quali la frequenza di campionamento, la configurazione spaziale e l'inclinazione. Sono stati inoltre sviluppati un filtro digitale per la rimozione delle misure anomale e un modello di correzione geometrica per la stima dell'altezza in funzione dell'inclinazione dello strumento, entrambi validati sperimentalmente. I risultati ottenuti in ambiente interno e all'esterno all'ombra mostrano un'accuratezza e una precisione comparabili o superiori a quelle del prototipo precedente, a fronte di una maggiore semplicità d'uso, non essendo più necessario un posizionamento rigorosamente perpendicolare al suolo.

Il nuovo prototipo presenta inoltre vantaggi significativi anche sul piano dell'architettura hardware e firmware. L'adozione di un microcontrollore STM32F446RE al posto dei due microcontrollori Arduino impiegati in precedenza ha permesso di integrare e gestire tutte le periferiche con un solo dispositivo, consentendo una riduzione delle dimensioni della scheda e una maggiore facilità di aggiornamento dello strumento. È stato implementato un nuovo modulo BLE in grado di connettersi facilmente a uno smartphone, sebbene sia ancora necessario verificare l'assenza di problemi di compatibilità con l'applicazione Android già sviluppata in precedenza. Grazie al sensore VL53L8 è stato inoltre possibile eliminare il sensore accelerometrico, precedentemente impiegato per la stima dell'inclinazione. Sono stati infine risolti alcuni problemi critici emersi nel corso dello sviluppo, tra cui il malfunzionamento nella sequenza di spegnimento e i tempi eccessivi di inizializzazione delle periferiche.

È stato inoltre ottenuto un miglioramento della durata della batteria, sia in modalità standby, con un consumo massimo di 4 mA, sia a dispositivo acceso, dove al di fuori della fase di misurazione il consumo medio è di 80 mA. Questi bassi consumi hanno consentito di impiegare una batteria di dimensioni inferiori, riducendo conseguentemente le dimensioni del manico e migliorando la maneggevolezza dello strumento senza comprometterne l'autonomia. Il dispositivo è infatti in grado di funzionare per 205 ore in modalità standby e per 10 ore con il dispositivo acceso, garantendo l'autonomia energetica necessaria per un utilizzo prolungato sul campo senza necessità di ricarica.

Permangono, tuttavia, alcune limitazioni non completamente risolte. La più rilevante riguarda il comportamento del dispositivo in presenza di luce solare diretta e ad altezze elevate, condizione in cui la stima dell'inclinazione tramite il sensore TOF risulta poco affidabile e, di conseguenza, la precisione complessiva della misura si riduce in modo significativo al di sopra di circa 1200 mm. Tale limite risulta tuttavia accettabile considerando il contesto specifico della misurazione di bambini di età inferiore ai 5 anni. Nel complesso, rispetto al prototipo precedente, sono stati raggiunti risultati nettamente migliorativi.

Tra i possibili sviluppi futuri, sarebbe opportuno approfondire le cause dell'imprecisione nella stima dell'inclinazione in condizioni di forte irraggiamento solare, valutando eventualmente l'introduzione di un filtro ottico per schermare la luce ambientale o la ricerca di un modello di adattamento delle misure più efficace. Qualora le soluzioni basate sul solo sensore TOF non risultassero sufficienti, si dovrà considerare l'implementazione di un sensore inerziale dedicato, al fine di stimare correttamente l'inclinazione e ridurre l'errore di correzione della traiettoria del fascio laser. Infine, è necessaria una validazione più estesa del dispositivo sul campo, in condizioni operative reali e con un numero di operatori e di soggetti misurati superiore a quello impiegato nelle prove di laboratorio descritte in questa tesi.

Nel complesso, il lavoro svolto ha permesso di realizzare un prototipo che supera in più aspetti le prestazioni e l'usabilità della versione precedente, pur lasciando alcuni margini di miglioramento ben definiti, che costituiscono una solida base di partenza per il prosieguo dello sviluppo dello strumento.

Bibliografia

1. **Medici con l’Africa CUAMM** – sito web: <https://www.mediciconlafrica.org/>
2. **World Health Organization**, “Malnutrition” – sito web: https://www.who.int/health-topics/malnutrition#tab=tab_1
3. **PubMed Central**, “Comparison of Different Nutritional Screening Approaches and the Determinants of Malnutrition in Under-Five Children in a Marginalized District of Punjab Province, Pakistan” – sito web: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9316579/>
4. **World Health Organization**, “WHO guideline on the prevention and management of wasting and nutritional oedema (acute malnutrition) in infants and children under 5 years” – sito web: <https://iris.who.int/items/736fc360-87ca-444d-a2b5-a78487786067>
5. **World Health Organization**, “WHO child growth standards and the identification of severe acute malnutrition in infants and children” - sito web: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/2097b7fa-8a95-4f2f-9954-926f01d002e8/content>
6. **World Health Organization**, “Length/height-for-age” – sito web: <https://www.who.int/tools/child-growth-standards/standards/length-height-for-age>
7. **World Health Organization**, “Weight-for-length/height” – sito web: <https://www.who.int/tools/child-growth-standards/standards/weight-for-length-height>
8. **HaB Direct**, How to Measure Height Accurately Using a Stadiometer: What It Is, Accuracy and How to Read It – sito web: <https://www.habdirect.com/how-to-measure-height-accurately-using-a-stadiometer/>
9. **Electronic clinic**, TOF10120 – sito web: <https://www.electronicclinic.com/wp-content/uploads/2020/11/TOF10120-Datasheet.pdf>
10. **ST**, VL53L5CX – sito web: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l5cx.html>

11. **ST**, VL53L8CX – sito web: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l8cx.html#overview>
12. **Beyondlogic**, Primer: The USB-C Connector – sito web: <https://www.beyondlogic.org/primer-usb-c-connector/>
13. **Texas Instruments**, “BQ24075” – sito web: <https://www.ti.com/product/BQ24075>
14. **Texas Instruments**, “TPS63001” – sito web: <https://www.ti.com/product/TPS63001>
15. **Texas Instruments**, “Integrated Load Switches Versus Discrete MOSFETs” – sito web: <https://www.ti.com/lit/an/slva716a/slva716a.pdf?ts=1778888185248>
16. **Analog Dialogue**, “Driving a High-Side MOSFET Input Switch Using Active Low Output for System Power Cycling” – sito web: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/driving-a-high-side-mosfet.html>
17. **ST**, “STC3100” – sito web: <https://www.st.com/en/power-management/stc3100.html#documentation>
18. **ST**, “BlueNRG-M2” – sito web: <https://www.st.com/en/wireless-connectivity/bluenrg-m2.html>
19. **ST**, “SATEL-VL53L8” – sito web: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/satel-vl53l8.html#overview>
20. **Sitronix**, “ST7789VW” – sito web: <https://www.buydisplay.com/download/ic/ST7789.pdf>
21. **Microchip**, “MIC2039” – sito web: <https://docs.rs-online.com/6e60/0900766b8166f7fe.pdf>
22. **Total phase**, “I2C vs SPI vs UART – Introduction and Comparison of their Similarities and Differences” – sito web: <https://www.totalphase.com/blog/2021/12/i2c-vs-spi-vs-uart-introduction-and-comparison-similarities-differences/>

23. **DevAcademy**, “Bluetooth Low Energy Fundamentals” – sito web:
<https://academy.nordicsemi.com/courses/bluetooth-low-energy-fundamentals/lessons/lesson-1-bluetooth-low-energy-introduction/>
24. **Bluetooth® Specification**, “Supplement to the Bluetooth Core Specification” – sito web: https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/CSS_v11/out/en/supplement-to-the-bluetooth-core-specification/data-types-specification.html
25. **Padua Research Archive**, “GOING FROM ITOF TO DTOF: METHODS FOR MPI CORRECTION AND TRANSIENT RECONSTRUCTION” – sito web:
<https://www.research.unipd.it/handle/11577/3471252?mode=simple>
26. **Federico Dal Lago**, “Stadiometro digitale portatile per la valutazione del grado di malnutrizione nell’infanzia in paesi a basso reddito”
27. **Renke**, “Ultrasonic Sensor Work, Used, Limitations and FAQs” – sito web:
<https://www.renkeer.com/what-is-ultrasonic-sensor/>
28. **ST**, “STM32CubeIDE” – sito web: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
29. **ST**, “STM32CubeProg” – sito web: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeprog.html#documentation>
30. **ST**, “ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32” – sito web: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1075-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stmicroelectronics.pdf

