Politecnico di Torino

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica

A.a. 2024/2025

Sessione di laurea Luglio 2025

Progettazione di un Banco di Prova Funzionale per Sensore di Rilevamento Umano con Tecnologia Infrarossi Passiva e Microonde

Relatore:

Prof. Mihai Teodor Lazarescu

Candidato:

Samuel Santese

Sommario

L'industria elettronica moderna è caratterizzata da una crescente complessità dei prodotti e da una domanda di qualità sempre più elevata. In questo scenario, il collaudo assume un ruolo cruciale per garantire l'affidabilità e la funzionalità dei dispositivi, spaziando dalla produzione di massa ai prodotti specializzati. L'obiettivo primario di ogni azienda manifatturiera è fornire ai clienti prodotti pronti all'uso, e ciò richiede processi di validazione rigorosi. Tuttavia, l'aumento dei volumi di produzione comporta una maggiore probabilità di errori di assemblaggio, rendendo indispensabile l'adozione di sistemi di collaudo efficienti e automatizzati. L'esigenza di ottimizzare l'efficienza produttiva, ridurre i costi e garantire la qualità del prodotto finito è una delle principali forze trainanti che spingono verso l'automazione del collaudo nell'attuale panorama industriale, in cui la competitività è sempre più determinata dalla capacità di offrire prodotti di alta qualità a prezzi contenuti.

I processi di collaudo manuali, pur essendo ampiamente utilizzati, presentano diverse limitazioni che ne compromettono l'efficacia e l'efficienza, introducendo un'intrinseca soggettività che si ripercuote negativamente sull'intero ciclo produttivo. La dipendenza dall'operatore introduce variabilità nell'interpretazione dei risultati e nell'applicazione degli stimoli, compromettendo l'affidabilità e la ripetibilità dei test. Questa variabilità è particolarmente critica nel collaudo di sensori, dove la precisione e la coerenza delle misurazioni sono fondamentali per garantire la qualità del prodotto finito. Nel caso specifico del sensore volumetrico a infrarosso passivo (PIR) e microonda (MW) oggetto di questo studio, il processo di collaudo manuale si basa su stimoli non ripetibili e soggetti a influenze ambientali, come il riscaldamento di una resistenza per il sensore PIR e il movimento della mano dell'operatore per il sensore MW. Queste criticità comportano:

- **Tempi di collaudo elevati:** le procedure manuali richiedono un tempo significativo per l'esecuzione di ciascun test, limitando la produttività complessiva e aumentando i costi di produzione.

- **Costi aggiuntivi legati alla necessità di operatori altamente specializzati:** il collaudo manuale richiede operatori con una profonda conoscenza

del dispositivo in esame e delle procedure di test, il che si traduce in costi del personale elevati.

- **Un rischio maggiore di errori umani:** la natura ripetitiva e soggettiva del collaudo manuale aumenta la probabilità di errori da parte dell'operatore, compromettendo l'accuratezza dei risultati.
- **Difficoltà nell'ottenere risultati ripetibili e confrontabili:** la mancanza di standardizzazione e controllo negli stimoli applicati rende difficile confrontare i risultati ottenuti in test diversi, limitando la capacità di identificare anomalie e migliorare il processo produttivo.
- **Limitata tracciabilità e difficoltà nell'analisi dei dati:** i processi manuali spesso non prevedono una registrazione sistematica dei dati di collaudo, il che ostacola l'analisi delle tendenze, l'identificazione delle cause di non conformità e l'implementazione di azioni correttive.

Per superare le limitazioni del collaudo manuale e realizzare un processo più efficiente, affidabile e sostenibile, si propone un sistema ampiamente automatizzato, progettato specificamente per il collaudo di sensori PIR e MW. Questa soluzione prevede l'implementazione di sistemi di stimolo specifici per i sensori PIR e MW, progettati per simulare accuratamente le condizioni operative reali e garantire la ripetibilità delle sollecitazioni, affrontando le peculiarità e le criticità di ciascuna tecnologia di rilevamento.

Per il sensore PIR, in questa implementazione è stato utilizzato un sistema di stimolo con lampadina a filamento. L'utilizzo della lampadina consente di generare una sollecitazione termica stabile e quantificabile, riducendo l'influenza delle variazioni di temperatura ambiente e garantendo una maggiore ripetibilità dei test rispetto all'utilizzo di resistenze. Questo approccio permette di superare le problematiche legate alla dipendenza della risposta del sensore PIR dalla temperatura dell'eccitatore e dalle condizioni ambientali, ottenendo risultati più coerenti e affidabili. La lampadina, inoltre, offre una maggiore efficienza nella generazione di radiazione infrarossa rispetto alle resistenze, consentendo di stimolare il sensore in modo più efficace e controllato.

Per il sensore MW, nell'ambito di questa ricerca è stato progettato un sistema di stimolo basato su un altoparlante, in grado di generare segnali Doppler precisi e ripetibili. L'impiego dell'altoparlante permette di simulare il movimento di un oggetto target in modo controllato, consentendo di valutare accuratamente la risposta del sensore MW e di analizzare parametri quali la sensibilità, il guadagno e la banda passante. Inoltre, per questa specifica analisi è stata realizzata una cella anecoica per ridurre l'influenza dell'ambiente esterno sui test MW, garantendo risultati più accurati e affidabili. La cella anecoica, progettata per assorbire le onde elettromagnetiche e schermare il sensore da interferenze esterne, ha permesso di

ottenere un ambiente di test isolato e controllato, eliminando i disturbi ambientali che possono influenzare la risposta del sensore MW e comprometterne l'accuratezza.

I prototipi realizzati per i sistemi di stimolo PIR e MW sono stati sottoposti a rigorosi test di laboratorio per valutarne le prestazioni e l'efficacia. I risultati sperimentali hanno dimostrato la capacità dei sistemi di generare stimoli ripetibili e controllati, consentendo di automatizzare il processo di collaudo e di ottenere misurazioni accurate e affidabili.

L'automazione del processo di collaudo ha consentito di ottenere i seguenti miglioramenti quantificabili:

- **Riduzione dei tempi di test:** il tempo di collaudo è stato ridotto da 20 secondi per unità (collaudo manuale) a 7 secondi per unità (collaudo automatizzato), con un risparmio di tempo del 70%. Questo incremento di efficienza permette di collaudare un numero significativamente maggiore di dispositivi nello stesso intervallo di tempo, aumentando la produttività complessiva.

- **Eliminazione degli errori umani:** l'automazione ha eliminato completamente gli errori umani nell'interpretazione dei risultati, passando da una percentuale di errori del 5-10% (collaudo manuale) a 0% (collaudo automatizzato). Questo miglioramento garantisce una maggiore accuratezza e coerenza nei risultati del collaudo, riducendo il rischio di falsi positivi o negativi.

- **Miglioramento della ripetibilità:** la variabilità intrinseca del processo di collaudo è stata significativamente ridotta, passando da circa 15-20% (collaudo manuale) a meno del 2% (collaudo automatizzato). Questo incremento di ripetibilità assicura che i risultati dei test siano coerenti e affidabili, indipendentemente dall'operatore o dal momento in cui vengono eseguiti.

- **Riduzione dei costi operativi:** l'automazione ha permesso di ridurre i costi operativi del 60%, grazie alla diminuzione della necessità di operatori specializzati e all'aumento della produttività. La riduzione dei tempi di collaudo e l'aumento della produttività si traducono in un risparmio significativo sui costi del personale e sull'utilizzo delle risorse.

I risultati raggiunti da questo studio sono riassunti nella Tabella 1.

Questo studio dimostra l'efficacia di un approccio HW-in-the-loop per collaudi funzionali in ambito Industry 4.0, con implicazioni replicabili in altri contesti produttivi. L'automazione del processo di collaudo del sensore volumetrico ha consentito di migliorare significativamente l'efficienza, l'affidabilità e la ripetibilità dei test, riducendo i tempi e i costi di produzione. I risultati ottenuti sono replicabili in altri contesti produttivi, contribuendo all'evoluzione dei sistemi di collaudo verso soluzioni sempre più intelligenti e autonome. L'integrazione di tecnologie avanzate,

Metrica	**Manuale**	**Automatizzato**	**Miglioramento**
Tempo di collaudo	20 secondi	7 secondi	70%
Errori umani	Elevati $\approx$ 5-10%	Assenti	100%
Variabilità	$\approx$ 15-20%	$< 2\%$	Significativo
Costi operativi	Alti	Bassi	Ridotti del 60%

Tabella 1: Tabella di confronto dei dati raccolti a supporto dei risultati

come l'intelligenza artificiale e il machine learning, consentirà di sviluppare sistemi di collaudo in grado di adattarsi dinamicamente alle esigenze specifiche di ogni applicazione, ottimizzare i parametri di test in tempo reale e implementare strategie di manutenzione predittiva, aprendo la strada a una produzione sempre più efficiente, sicura e sostenibile, in linea con i principi dell'Industria 4.0.

Indice

Elenco delle tabelle VIII

Elenco delle figure IX

1 Introduzione 1

2 Funzioni Principali e Composizione del Sensore 5
2.1 Sensore PIR . . . 8
2.2 Effetto Piroelettrico nel Sensore PIR . . . 9
2.3 Sensore di Antimascheramento a Infrarosso Attivo . . . 12
2.4 Sensore a Microonde . . . 15
2.5 Tecnologia RADAR e Applicazioni nel Sensore a Microonde . . . 17
2.6 Sistema Anti-manomissione Tamper . . . 20

3 Sistema di Collaudo Attuale 21
3.1 Collegamento del DUT al Sistema di Collaudo . . . 24
3.2 Collaudo dei Sensori PIR . . . 25
3.3 Collaudo del Sensore Microonda . . . 27
3.4 Collaudo del Sensore Antimasking . . . 28
3.5 Collaudo delle Uscite di Allarme per Masking e Manomissione . . . 29
3.6 Misurazione degli Assorbimenti Energetici . . . 31

4 Obiettivi di Progetto del Nuovo Sistema 33
4.1 Svantaggi del Collaudo Manuale e le Loro Implicazioni per il Collaudo di Sensori PIR e MW . . . 33
4.2 Obiettivi e Vantaggi del Nuovo Sistema di Collaudo . . . 35
4.3 Descrizione Funzionale del Nuovo Sistema: Architettura e Componenti Fondamentali per il Collaudo Ottimizzato di Sensori PIR e MW . . . 37

5 Collaudo del sensore PIR 39
5.1 Analisi Sperimentale del Piastrino Eccitatore PIR a Resistenza . . . 40
5.2 Radiazione Termica e Rilevamento 47
5.3 Configurazione di Test Consigliata dal Produttore per PIR 50
5.4 Risoluzione delle Problematiche del Radiatore IR a Resistenza . . . 53
5.5 Analisi Sperimentale del Piastrino Eccitatore PIR a Lampadina . . 57

6 Collaudo del Sensore Microonde 63
6.1 Configurazione di Test Consigliata dal Produttore per il Sensore a Microonde 64
6.2 Isolamento Sensore Microonde da Rumore Esterno 65
6.3 Trasduttore per Stimolazione Sensore Microonda 68
6.4 Banco di Test per Stimolazione Sensore Microonda 75
6.5 Realizzazione circuito di stimolo dell'altoparlante 77

7 Conclusioni 89
7.1 Risultati Importanti 90
7.2 Limiti del Lavoro 90
7.3 Prospettive Future 91

Bibliografia 92

Elenco delle tabelle

1 Tabella di confronto dei dati raccolti a supporto dei risultati v

5.1 Confronto della risposta al PIR al variare della temperatura ambiente 46
5.2 Confronto della risposta al PIR al variare della temperatura ambiente con eccitatore a lampadina 59

6.1 Confronto della risposta della MW al variare della frequenza di stimolo dell'altoparlante 73
6.2 Risposta della MW al variare della frequenza di stimolo dell'altoparlante 86

Elenco delle figure

2.1 Diagramma a blocchi del DUT 6
2.2 Rappresentazione esemplificativa del campionamento di un segnale analogico e conversione ADC 7
2.3 Diagramma a blocchi sensore PIR 8
2.4 Cristallo piroelettrico 10
2.5 Circuito equivalente del sensore piroelettrico 10
2.6 Risposta del sensore piroelettrico al gradino di temperatura 12
2.7 Sensore antimascheramento 13
2.8 Corrente generata dal sensore di mascheramento in funzione della distanza dell'oggetto riflettente 14
2.9 Diagramma a blocchi sensore di antimascheramento 14
2.10 Sensibilità spettrale relativa VS lunghezza d'onda 15
2.11 Schema applicativo sensore Microonda 16
2.12 Un diagramma a blocchi semplificato di un RADAR 17

3.1 Diagramma a blocchi sistema di collaudo attuale 21
3.2 Diagramma di flusso del collaudo 23
3.3 Diagramma a blocchi eccitatore collaudo PIR 25
3.4 Diagramma a blocchi del sistema di collaudo del modulo microonda 27
3.5 Schema delle uscite allarme del sensore 29
3.6 Schema collaudo delle uscite di allarme 30
3.7 Schema di test uscite automatizzato 30

5.1 Diagramma a blocchi test setup eccitatore PIR realizzato 40
5.2 Schema elettrico delcircuito timer implementato per il pilotaggio dell'eccitatore PIR 41
5.3 Circuito Timer realizzato su millefori 42
5.4 Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 20°C 42
5.5 Risposta del PIR al treno di impulsi generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 20°C 43

5.6 Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 33°C 44
5.7 Risposta del DUT al treno di impulsi generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 33°C 44
5.8 Immagine dell'eccitatore pir a resistenza acquisita con termocamera 45
5.9 Spettro elettromagnetico 47
5.10 Diagramma di radiazione del corpo nero 48
5.11 Temperatura di un oggetto rispetto alla lunghezza d'onda 49
5.12 Configurazione di setup sensore PIR 50
5.13 Configurazione per la misurazione del segnale in uscita 51
5.14 Configurazione per misurazione del rumore. 51
5.15 Posizione occlusore in modalità test uscita bilanciata 52
5.16 Spettro di emissione di una lampadina al tungsteno, confrontato con lo spettro di emissione di un corpo nero 54
5.17 Diagramma di radiazione elettromagnetica di un corpo nero a diverse temperature 55
5.18 Immagine della lampadina scattata con termocamera 56
5.19 Prototipo emettitore IR a lampadina 57
5.20 Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 20°C 58
5.21 Risposta del DUT al treno di impulsi generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 20°C 59
5.22 Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 33°C 60
5.23 Risposta del DUT al treno di impulsi generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 33°C 61
5.24 Schema base eccitatore PIR 62

6.1 Segnale generato dal movimento di persone nei pressi del DUT. . . 64
6.2 Test setup MW previsto dal costruttore 65
6.3 Poliuretano espanso a forma di cono presente all'interno delle pareti di una camera anecoica 66
6.4 Cella anecoica realizzata per l'isolamento del sensore microonda vista dal basso. 67
6.5 Sollecitazione esterne con MW coperta da cella anecoica realizzata . 67
6.6 Estratto dall' InnoSentT Application Note III dove viene rappresentato come stimolatore del sensore microonda un altoparlante generico 68
6.7 Vista laterale di un altoparlante con indicati i principali componenti 69
6.8 Diagramma a blocchi test modulo MW realizzato tramite altoparlante 70

6.9 Acquisizione con oscilloscopio, in verde il segnale di stimolo dell'altoparlante in giallo il segnale in ingresso all'ADC del microcontrollore 71
6.10 Acquisizione all'oscilloscopio della risposta del DUT allo stimolo con frequenza fmax= 65Hz 72
6.11 Acquisizione all'oscilloscopio della risposta del DUT allo stimolo con frequenza fmin= 19Hz 72
6.12 Risposta del DUT allo SWIPE da 15Hz a 100Hz 73
6.13 Test setup sistema di collaudo modulo MW 75
6.14 A sinistra si può vedere il segnale in uscita dal microcontrollore, a destra il segnale di pilotaggio dell'altoparlante 77
6.15 Diagramma a blocchi del circuito di pilotaggio dell'altoparlante . . . 78
6.16 Simulazione del filtro da implementare tramite tool TINA. 78
6.17 Diagramma di BODE del filtro simulato 79
6.18 Acquisizione dei segnali di ingresso e di uscita dal filtro RC. In verde è rappresentato il segnale in ingresso del filtro in giallo è rappresentato il segnale in uscita dal filtro 80
6.19 Diagramma di BODE del filtro dimensionato per la frequenza di 40Hz 80
6.20 Segnale in ingresso e in uscita del filtro dimensionato per la frequenza di 40Hz. In verde è rappresentato il segnale in ingresso del filtro in giallo è rappresentato il segnale in uscita dal filtro 81
6.21 Diagramma di BODE del filtro dimensionato per la frequenza di 60Hz 82
6.22 Acquisizione da oscilloscopio del segnale in ingresso e in uscita del filtro dimensionato per la frequenza di 65Hz. In verde è rappresentato il segnale in ingresso del filtro in giallo è rappresentato il segnale in uscita dal filtro 82
6.23 Schema elettrico del circuito di pilotaggio dell'altoparlante 83
6.24 Schema elettrico del circuito di pilotaggio dell'altoparlante realizzato 84
6.25 Prototipo del circuito di pilotaggio altoparlante realizzato su millefori 85
6.26 Risposta del DUT alla sollecitazione a 20Hz 85
6.27 Risposta del DUT alla sollecitazione a 40Hz 86
6.28 Risposta del DUT alla sollecitazione a 65Hz 87

Capitolo 1

Introduzione

Il collaudo nel processo produttivo è un insieme di attività atte a verificare che il comportamento o le proprietà di un dispositivo prodotto rientrino nei parametri di progetto. Queste attività vengono sempre svolte al termine del processo produttivo per verificarne l'efficacia. L'attuale scenario economico globale evidenzia la crescente necessità di ottimizzare l'efficienza produttiva. La capacità di massimizzare l'output minimizzando i costi rappresenta un fattore competitivo determinante, in linea con la diffusa aspettativa dei consumatori di accedere a prodotti di qualità a prezzi contenuti. Ciò comporta la necessità di effettuare scelte progettuali nella fase di collaudo, analizzate nel presente studio, al fine di identificare in modo preciso sia la tipologia dei test da eseguire sia le modalità operative per la loro implementazione, per garantire che il prodotto funzioni adeguatamente nelle reali condizioni operative. La necessità, pertanto, che si viene a generare, è di realizzare un sistema di collaudo che presenti le seguenti caratteristiche:

1. **Costo contenuto**: la spesa per il collaudo è principalmente imputabile ai costi dei macchinari e al costo orario del personale. L'adozione di strategie di semplificazione o automazione permette di contenere i costi del personale, aprendo alla possibilità di impiegare operatori meno qualificati con conseguente riduzione della spesa oraria. Inoltre, l'efficienza del processo di collaudo, ottenuta tramite la minimizzazione dei tempi e la sovrapposizione delle fasi, contribuisce significativamente all'abbattimento dei tempi e dei costi di produzione

2. **Robustezza**: considerando l'elevato carico operativo richiesto al macchinario di collaudo, destinato a funzionare continuativamente per prolungati periodi e a processare volumi di produzione mensili significativi, è necessario minimizzare l'usura dei componenti attraverso una progettazione robusta. Inoltre, gli elementi soggetti a deterioramento devono garantire una riparabilità o sostituibilità agevole ed economicamente vantaggiosa.

3. **Percentuale di copertura dei test elevata**: il sistema di collaudo deve verificare la funzionalità di ogni componente o modulo del sensore al fine di prevenire la commercializzazione di prodotti difettosi, evitando così resi e onerosi interventi di riparazione post-vendita.

Le attività di collaudo che vengono effettuate dipendono fortemente dal grado di sicurezza che deve avere il prodotto e dalla fascia di prezzo in cui esso si colloca. Nella fase di progetto del sistema di collaudo è fondamentale, per prima cosa, valutare i limiti del collaudo stesso e quale parte del processo produttivo si intende testare. Il Device Under Test (DUT) oggetto di questo studio è un dispositivo elettronico che subisce tre processi produttivi distinti:

1. Assemblaggio elettronico a montaggio superficiale, o Surface Mount Technology (SMT)
2. Assemblaggio elettronico tradizionale, o Pin Through Hole (PTH)
3. Assemblaggio delle schede elettroniche nel contenitore plastico

Sebbene un collaudo al termine di ogni fase produttiva possa inizialmente apparire oneroso, esso rappresenta una strategia economicamente vantaggiosa nel lungo termine. Intercettare e risolvere le anomalie delle schede elettroniche previene costi significativamente maggiori legati all'assemblaggio, al disassemblaggio e al riassemblaggio delle unità complete, oltre a eliminare le spese di movimentazione attraverso le diverse fasi della linea produttiva.

Per quanto riguarda il primo processo di montaggio, ovvero l'assemblaggio SMT, la tecnica che viene utilizzata per verificare il corretto assemblaggio delle schede è l'ispezione ottica automatica, in inglese Automatic Optical Inspection (AOI). L'AOI è un'ispezione visiva del circuito stampato assemblato (PCBA) completamente automatica; si avvale di macchinari dotati di telecamera che, opportunamente programmati, sono in grado di riconoscere e distinguere i componenti elettronici assemblati sulla PCBA e segnalare all'operatore eventuali anomalie nel montaggio, tra cui la presenza di componenti errati o di valore errato, offset di montaggio, la polarità del componente, la presenza di cortocircuiti (dovuti, ad esempio, a un errato processo produttivo). Le schede che presentano anomalie vengono successivamente rilavorate, mentre le schede correttamente assemblate sono mandate al successivo processo produttivo.

In un contesto produttivo distribuito su tre sedi differenti, l'implementazione di un collaudo al termine di ogni fase assume un ruolo chiave nella gestione dei costi complessivi della supply chain. Identificare e risolvere le anomalie dei DUT in loco previene l'increscente aumento dei costi di riparazione e, in modo significativo, abbatte le spese di trasporto e la complessità logistica associata alla gestione di unità difettose tra le diverse sedi.

Esistono diversi modi per collaudare le schede elettroniche assemblate:

- **Collaudo in-circuit a letto d'aghi:** si tratta di un collaudo di tipo parametrico dove vengono eseguite misurazioni di tensioni e correnti su tutti i percorsi possibili del circuito. Il PCBA viene alloggiato in un macchinario realizzato ad hoc che con un letto d'aghi effettua misurazioni elettriche ed è in grado di rilevare eventuali anomalie dovute ad esempio all'interruzione di una pista sul PCB oppure ad una saldatura fredda, o ancora al montaggio di un componente errato. Questa tipologia di collaudo richiede, in genere, macchinari molto costosi, ma è in grado di individuare rapidamente un guasto dovuto ad un errato montaggio dei componenti elettronici o anomalie sul PCB consentendo di risparmiare tempo sulla ricerca guasti. Lo svantaggio di questo collaudo è che è in grado di intercettare solamente i guasti di tipo elettronico, non è infatti idoneo a verificare il corretto funzionamento del prodotto finito.

- **Collaudo a sonde mobili (flying probe):** questo tipo di collaudo si differenzia da quello sopra indicato in quanto le sonde utilizzate per misurare correnti e tensioni non sono fisse, ma sono mobili. I macchinari atti a questo scopo sono estremamente costosi e richiedono la realizzazione di appositi programmi di collaudo.

- **Collaudo funzionale:** questa tipologia di collaudo viene normalmente eseguita al termine del processo produttivo, quando la scheda o le schede elettroniche sono assemblate nel prodotto finito; questo collaudo è volto a verificare che il dispositivo rientri nei parametri di funzionamento previsti dal progetto. Questo tipo di collaudo a differenza del collaudo in-circuit non è sempre in grado di verificare con precisione la correttezza dei componenti montati: si pensi ad esempio ad un errata resistenza o capacità, a meno che non vengano fatti controlli parametrici può risultare molto difficile o impossibile far emergere problematiche di tipo funzionale derivate da un componente che presenta un valore errato.

Le tre modalità di collaudo sopra elencate si rivelano pertanto molto efficaci ma settoriali, per avere certezza che il prodotto funzioni in modo adeguato sarebbe infatti necessario realizzare i processi sopra elencati combinandoli tra loro in modo da garantire la massima copertura dei test.

L'attuale sistema di collaudo, che verrà descritto con dettaglio nei prossimi capitoli, è di tipo funzionale ed è costituito da un macchinario che non presenta attuatori automatici o controllati; infatti, le sollecitazioni, che vengono effettuate da un operatore specializzato, non sono controllate da un sistema automatico e possono determinare condizioni di test non perfettamente ripetibili. Questo fa sì che sia l'operatore a dover determinare se il DUT stia funzionando in modo corretto, interpretando la risposta alle sollecitazioni.

Uno degli obiettivi primari del presente studio è l'automazione del processo di collaudo attraverso la standardizzazione e la ripetibilità delle sollecitazioni. L'integrazione di attuatori controllati e di un microprocessore per l'analisi automatica delle risposte mira a minimizzare gli errori intrinseci alle procedure manuali, derivanti dalla variabilità delle sollecitazioni e dalla soggettività nell'interpretazione dei dati, consentendo al contempo una significativa riduzione dei tempi di esecuzione del collaudo.

Nei capitoli a venire saranno descritti i moduli del DUT analizzati. Verrà quindi illustrato l'attuale sistema di collaudo manuale. Il contributo principale di questo studio consisterà nell'esplorazione e nello sviluppo di un nuovo approccio al collaudo, focalizzato sull'automazione e sulla ripetibilità degli stimoli applicati.

Capitolo 2

Funzioni Principali e Composizione del Sensore

Il dispositivo che si intende collaudare è un sensore volumetrico da esterno che combina la tecnologia di rilevazione di movimento umano a infrarossi con la tecnologia a microonda planare. Sono entrambe tecnologie a largo impiego nel settore della rilevazione umana, che si basano su principi differenti che saranno approfonditi in seguito: la rilevazione della radiazione infrarossa e la riflessione di onde millimetriche. Entrambe le tecnologie presentano però dei limiti di funzionamento; la combinazione di entrambe consente di ottenere rilevazioni più precise, andando a ridurre drasticamente gli allarmi impropri. La tecnologia a infrarosso passivo è costituita da due moduli distinti che sono sempre attivi; quando entrambi rilevano un'intrusione dovuta a un corpo che si muove nell'area di copertura, viene attivata la microonda che effettua un'analisi di segnale per confermare o meno l'allarme. In Figura 2.1 viene presentato un diagramma a blocchi semplificato per comprendere meglio la composizione del DUT. Come accennato, l'impiego di questo dispositivo è la rilevazione in ambiente esterno del movimento umano per sistemi di antintrusione. La rilevazione del movimento è affidata ai sensori infrarossi passivi (PIR), il cui segnale analogico viene opportunamente trattato da una catena di filtri e amplificatori e alla microonda (MW), che a fronte di opportune sollecitazioni genera un segnale analogico che viene anch'esso filtrato e amplificato. Il dispositivo possiede inoltre dei sistemi di antisabotaggio, in particolare il sensore di prossimità che funge da anti-mascheramento, che genera un allarme quando il sensore viene oscurato da un corpo esterno per impedirne la rilevazione, e un accelerometro che genera un allarme quando vi è tentativo di rimuovere e/o orientare il sensore in modo da alterarne il funzionamento; questi due sensori comunicano con la central processing unit (CPU) tramite protocollo seriale I2C. La CPU è dotata di un microprocessore, il cui compito è di ricevere in input tutti i segnali generati dai

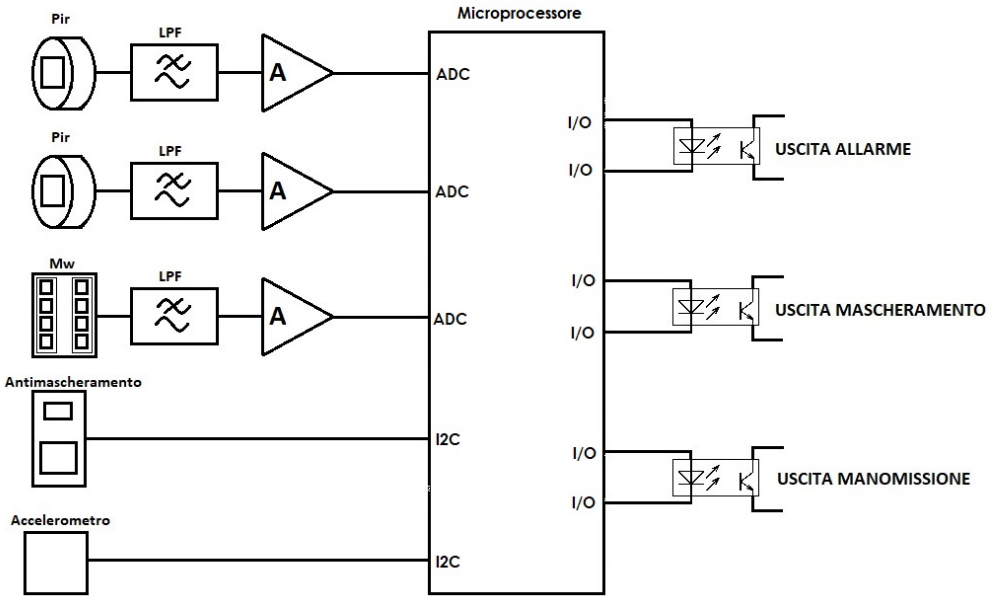


Figura 2.1: Diagramma a blocchi del DUT

trasduttori, analogici/digitali e, tramite opportuni algoritmi di analisi del segnale, determinare gli eventi di allarme discriminando quelle che possono essere sollecitazioni dovute ad altre cause (ad esempio eventi atmosferici). Qualora sussistano gli elementi per generare allarme, viene attivata l'uscita per segnalare l'allarme, oppure il mascheramento o la manomissione. Il dispositivo in analisi comunica l'allarme a una centrale tramite contatti liberi da potenziale: il contatto è chiuso in assenza di eventi e viene aperto quando vi è l'evento di allarme, o quando vi è mancanza di alimentazione o la manomissione/interruzione del cavo.

L'acquisizione dei segnali analogici avviene tramite conversione analogica-digitale. I segnali generati dai sensori PIR e dal sensore MW sono dei segnali con range di ampiezza ($0\,\mathrm{V} - 3.3\,\mathrm{V}$), con frequenza massima pari a $10\,Hz$. Come mostrato in Figura 2.1 i segnali analogici sono collegati agli ADC presenti nel microcontrollore. Il microcontrollore è sempre in ascolto ed effettua il campionamento dei segnali in ingresso e la conversione analogico-digitale per poter analizzare i segnali in ingresso (vedi Figura 2.2). Il risultato della conversione analogico-digitale sono dei campioni numerici il cui valore va da 0 (che corrisponde a $0\,\mathrm{V}$) a 65.536 (che corrisponde al valore di input massimo pari a $3.3\,\mathrm{V}$). In seguito, il microcontrollore effettua una comparazione tra il campione acquisito e un valore di soglia (definito trigger). Se il valore del campione acquisito è maggiore del valore di trigger, significa che il sensore è in stato di allarme. Per definire se la rilevazione è dovuta alla presenza di un umano nel range di rilevamento, i campioni devono superare il trigger per un certo numero di volte consecutivamente. Se entrambi i PIR e la MW rilevano,

viene generato l'evento di allarme tramite l'apertura dell'uscita ALLARME. Nei prossimi capitoli verranno trattati con maggior dettaglio tutti i trasduttori del DUT, andando ad approfondire ove necessario i principi fisici su cui sono basati. Questa analisi è fondamentale per la progettazione del sistema di collaudo, il cui scopo è simulare a banco le sollecitazioni a cui il sensore sarebbe sottoposto durante il suo normale impiego.

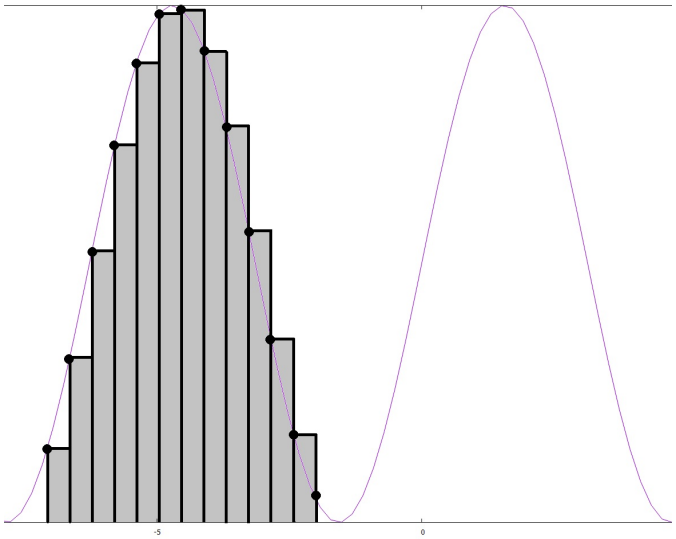


Figura 2.2: Rappresentazione esemplificativa del campionamento di un segnale analogico e conversione ADC

Lo studio presentato in questo documento si concentra sullo sviluppo di attuatori in grado di stimolare i sensori PIR ed MW. Questi sensori, infatti, sono di tipo analogico, e devono essere caratterizzati in quanto il loro impiego consiste nel misurare una grandezza fisica per discriminare un evento di allarme da un disturbo. I sensori di antimanomissione e di antimascheramento invece sono dei sensori a soglia; infatti, il sensore di antimanomissione deve solamente verificare che il sensore non venga spostato, non deve effettuare una misura in risposta ad una sollecitazione. Lo stesso discorso si applica sul sensore di prossimità, il quale deve solamente verificare che non ci siano oggetti che ostacolino la visuale del sensore.

2.1 Sensore PIR

I sensori a infrarossi passivi sono in grado di rilevare la radiazione termica emessa da un corpo; in particolare sono tarati per riconoscere e individuare la radiazione emessa dal corpo umano nel loro campo visivo. Le applicazioni sono molteplici, vanno dal lighting, in questo caso i sensori vengono usati per accendere le luci in presenza di un corpo umano, alla rilevazione per antintrusione e sistemi di sicurezza [1]. Il DUT oggetto di questo studio rientra in questa categoria; in particolare si tratta di un sensore volumetrico da esterno. I sensori PIR sono idonei alla produzione di massa, sono caratterizzati da un costo contenuto e hanno la capacità di rilevare la radiazione infrarossa con una buona accuratezza, il tutto garantendo consumi di corrente ridotti, nell'ordine di pochi µA. Il principio di funzionamento è il seguente: quando il sensore rileva un'intrusione nel suo campo di protezione, che viene opportunamente impostato in fase di installazione, comunica a una centrale di allarme l'evento. Un aspetto positivo di questa tecnologia è che consente di individuare gli oggetti in movimento, andando a sopprimere i segnali quasi-statici dovuti ad altre fonti di calore (come ad esempio una stufa), che presentano variazioni molto lente nel tempo, andando così a discriminare una buona parte di allarmi impropri non dovuti al movimento di un essere umano. Nella Figura 2.3 viene mostrato un diagramma a blocchi per comprendere il funzionamento del sensore PIR.

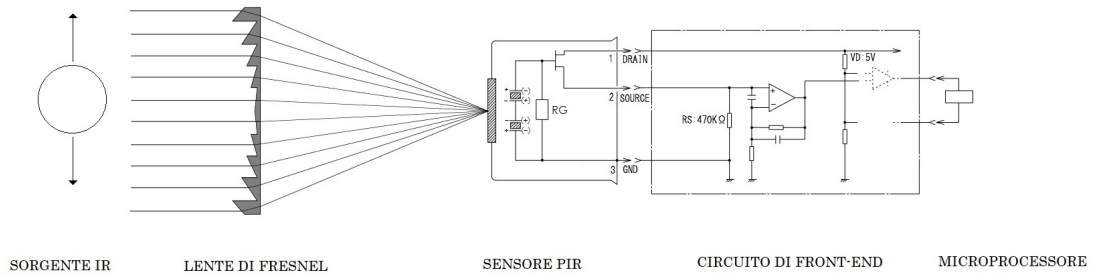


Figura 2.3: Diagramma a blocchi sensore PIR

Il sensore utilizza una lente di Fresnel il cui compito è di convogliare la radiazione termica emessa dalla sorgente IR nel centro focale del sensore PIR. La lente di Fresnel è costituita da diversi settori, ognuno dei quali delinea un settore di rilevazione. Esistono varie conformazioni delle lenti di Fresnel a seconda del tipo di applicazione e dell'area che deve proteggere il sensore.

Il sensore PIR utilizzato per questo genere di applicazioni è costituito da due elementi piroelettrici sensibili posti in contro serie. Questa tipologia circuitale fa sì che, quando i due elementi sensibili visualizzano lo stesso sfondo, la tensione ai capi dei due elementi piroelettrici presenta la medesima intensità ma polarità opposta.

In tal caso il segnale ai capi della resistenza RG è nullo e il MOSFET è interdetto. Quando la sorgente IR si muove nel campo di vista della lente e attraversa un settore, va a sollecitare uno dei due elementi sensibili, andando a creare una tensione ai suoi capi differente rispetto a quella dell'altro elemento sensibile che invece, visualizzando lo sfondo che presenta una radiazione IR differente, genera una tensione diversa. In questo modo si crea una differenza di potenziale ai capi della resistenza RG. La tensione generata fa sì che il MOSFET si accenda e venga attraversato da una corrente proporzionale alla tensione differenziale dei due elementi sensibili. La corrente passa nella resistenza RS e la tensione ai suoi capi viene opportunamente filtrata e amplificata da uno o più stadi amplificatori. Il segnale in tensione di uscita è pertanto proporzionale all'intensità della differenza di radiazione IR tra lo sfondo e la sorgente IR. Infine, il segnale in uscita dagli stadi amplificatori viene ricevuto da un ingresso analogico del microprocessore che, tramite algoritmi specifici, è in grado di determinare se nell'area di protezione avviene un'effrazione. Il DUT è costituito da due sensori PIR puntati in direzioni differenti. L'allarme viene generato se entrambe le testine PIR rilevano un movimento; in questo modo tutte le sorgenti di allarme improprio vengono ignorate.

2.2 Effetto Piroelettrico nel Sensore PIR

I materiali piroelettrici sono sostanze cristalline in grado di generare cariche elettriche quando vengono investiti da un flusso di calore [2]. Questo effetto è strettamente correlato all'effetto piezoelettrico, ovvero la capacità di alcuni materiali di polarizzarsi generando una differenza di potenziale elettrico quando sono soggetti a una deformazione meccanica. I materiali piroelettrici sono utilizzati in forma di film sottili, ai cui lati opposti vengono depositati due elettrodi per raccogliere le cariche indotte termicamente; in Figura 2.4 è rappresentato un cristallo piroelettrico. Fondamentalmente si tratta di un condensatore la cui carica viene generata dal flusso di calore.

I materiali piroelettrici generano cariche elettriche in risposta ad una variazione di temperatura. Quando il cristallo piroelettrico è esposto a un flusso di calore, dovuto ad esempio a una sorgente di radiazione infrarossa, la sua temperatura si eleva e diventa una fonte di calore a sua volta. Un cristallo è considerato piroelettrico se mostra una polarizzazione spontanea dovuta al cambiamento della temperatura. Oltre alle proprietà piroelettriche, questi cristalli presentano anche un certo grado di proprietà piezoelettriche: generano una carica elettrica in risposta a sollecitazioni meccaniche.

Supponiamo ora che il calore venga applicato al lato inferiore del sensore. Il calore raggiunge il sensore sotto forma di radiazione termica che viene assorbita dall'elettrodo inferiore e si propaga verso il materiale piroelettrico per conduzione

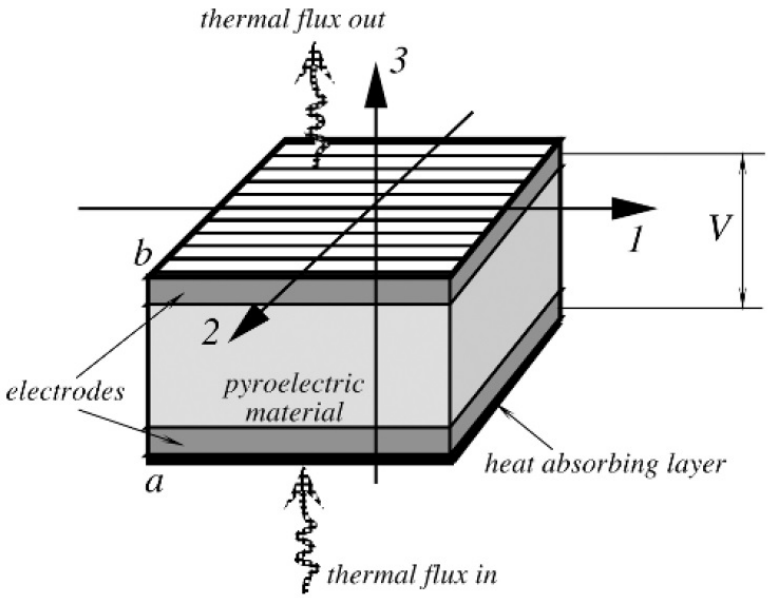


Figura 2.4: Cristallo piroelettrico

termica. Come risultato dell'assorbimento del calore, il lato inferiore diventa più caldo e si espande. L'espansione porta alla flessione del sensore, che a sua volta produce un cambiamento nell'orientamento dei dipoli. Avendo proprietà piezoelettriche, il materiale sollecitato genera pertanto cariche elettriche di polarità opposta tra gli elettrodi.

La Figura 2.5 mostra un rilevatore piroelettrico connesso a un resistore R_b che rappresenta o la resistenza di leakage interna, o la resistenza di ingresso di un circuito a cui è collegato. Il circuito equivalente elettrico mostrato in figura è costituito da un generatore di corrente, dalla capacità intrinseca del sensore e dalla resistenza di leakage R_b. Il segnale in uscita dal sensore piroelettrico può essere prelevato in corrente o in tensione a seconda dell'applicazione.

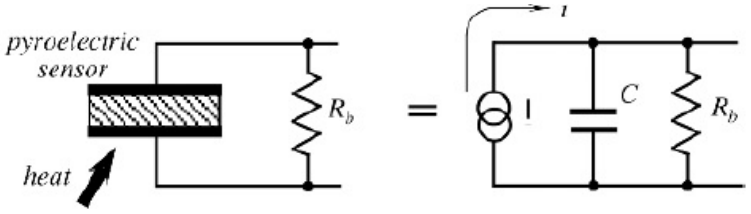


Figura 2.5: Circuito equivalente del sensore piroelettrico

La corrente che passa attraverso la resistenza R_b o la tensione ai suoi capi dipende dalla carica dovuta al riscaldamento del cristallo. Questo fenomeno può

essere caratterizzato da due coefficienti:

- coefficiente della carica piroelettrica $p_Q = \frac{dP_S}{dT}$
- coefficiente della tensione piroelettrica $p_V = \frac{dP_E}{dT}$

dove P_S è la polarizzazione spontanea (carica elettrica) E è il campo elettrico e T è la temperatura espressa in K. Entrambi i coefficienti sono funzione della temperatura e sono correlati tra loro dalla permittività elettrica ϵ_r e dalla costante dielettrica ϵ_0.

Quando un materiale piroelettrico viene esposto ad una sorgente di calore, la sua temperatura cresce e la corrispettiva carica o tensione cambia. Questo fenomeno può essere descritto dalle formule:

$$\Delta Q = p_Q A \Delta T \tag{2.1}$$

$$\Delta V = \frac{p_V h \Delta T}{C_s} \tag{2.2}$$

Considerando che la capacità del sensore è definita:

$$C_s = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \tag{2.3}$$

Ne consegue che

$$\Delta V = \frac{A}{C_s} p_Q \Delta T = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{h} p_Q \Delta T. \tag{2.4}$$

Pertanto, la tensione di picco è proporzionale alla variazione di temperatura nel sensore e al coefficiente di tensione piroelettrica ed inversamente proporzionale al suo spessore. In Figura 2.6 si può osservare la risposta del sensore piroelettrico alla variazione di temperatura rappresentata dalla funzione porta.

In sintesi, il sensore a infrarosso passivo si configura come un dispositivo fondamentale per la rilevazione di movimento, operando attraverso l'assorbimento della radiazione infrarossa naturalmente emessa dai corpi. La sua capacità di convertire questa energia radiante in un segnale elettrico proporzionale (tensione o corrente) lo rende un trasduttore efficace per sistemi di sicurezza. Questa sensibilità alla variazione di radiazione termica ambientale permette di rilevare la presenza di corpi caldi in movimento senza emettere alcuna energia, rendendolo "passivo". Le caratteristiche di basso consumo energetico e relativa semplicità costruttiva hanno contribuito alla sua ampia diffusione nei sistemi di allarme antintrusione e in altre applicazioni di rilevamento.

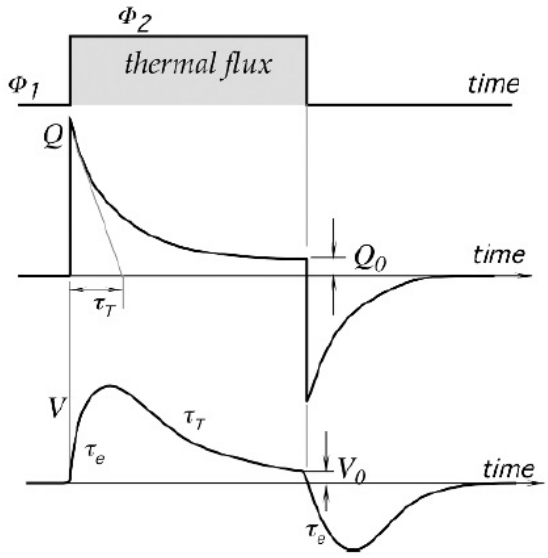


Figura 2.6: Risposta del sensore piroelettrico al gradino di temperatura

2.3 Sensore di Antimascheramento a Infrarosso Attivo

Il DUT oggetto di questo studio è dotato di un sensore definito "antimascheramento a infrarosso attivo". Nella protezione di ambienti esterni bisogna tenere conto che, per introdursi in un ambiente protetto, l'intruso possa tentare di bloccare la visuale del sensore per impedirne la rilevazione ad allarme disinserito. Tutti i sensori che basano la rilevazione sulla tecnologia PIR, infatti, hanno un limite: non riescono a vedere attraverso le superfici opache. Così come un sensore PIR non è in grado di rilevare una sorgente IR attraverso una porta o un muro, allo stesso modo può essere facilmente mascherato. I classici metodi di mascheramento sono la sovrapposizione di una patina di Domopak o verniciare con uno spray la lente del rilevatore PIR. Il sensore di antimascheramento protegge il sensore di allarme da tentativi di accecamento, assicurando che non appena un tentativo di manomissione di questo tipo venga intrapreso, il sensore invii alla centrale a cui è connesso una segnalazione di anomalia tramite l'uscita mascheramento che si tramuterà in un allarme.

Il principio di funzionamento su cui si basa il sistema di antimascheramento implementato sul DUT in esame è la riflessione di una sorgente luminosa infrarossa. Il sensore di antimascheramento è costituito da un LED che emette una radiazione infrarossa e un fotorilevatore adiacenti, come mostrato in Figura 2.7.

Quando un oggetto si trova nell'area sensibile la luce emessa viene riflessa e illumina il fotorilevatore facendo aumentare la quantità di energia luminosa che lo

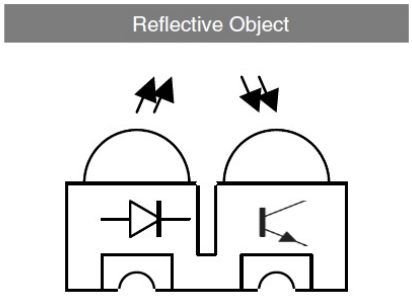


Figura 2.7: Sensore antimascheramento

raggiunge. Questo cambio di energia luminosa fa aumentare la corrente erogata dal fotorilevatore [3] e questo parametro viene comunicato al microprocessore del DUT, il quale considera l'intensità e la durata del segnale per generare l'allarme di mascheramento. L'intensità della corrente erogata dal fotorilevatore dipende principalmente da due parametri: la riflettanza del materiale e la distanza tra l'oggetto da rilevare e il sensore [4]. La riflettanza può essere definita come la capacità di riflettere parte della luce incidente su una data superficie o materiale. La riflettanza delle superfici nel range dell'infrarosso può variare significativamente rispetto a quella nel range del visibile; infatti, ogni materiale è caratterizzato da una riflettanza che varia al variare della lunghezza d'onda della radiazione incidente. La corrente del fotorilevatore dipende inoltre dalla distanza tra la superficie riflettente e il sensore. Il diagramma rappresentato in Figura 2.8 rappresenta la variazione della corrente relativa di un generico sensore di riflessione in funzione della distanza dell'oggetto che lo copre.

Il dispositivo di antimascheramento a infrarossi attivo utilizzato nel DUT è un circuito integrato il cui diagramma a blocchi è rappresentato in Figura 2.9; è costituito da un diodo emettitore, un fotodiodo e un Application Specific Integrated Circuit (ASIC).

L'emettitore infrarosso presenta un picco di lunghezza d'onda pari a circa 890 nm [5] (Figura 2.10), ed emette una radiazione luminosa che riflette su un oggetto a una distanza fino a 20 cm dal sensore [6]

Il fotodiodo riceve la luce riflessa dall'oggetto e la converte in corrente. Il picco di sensibilità di 890 nm coincide con il picco della lunghezza d'onda dell'emettitore infrarosso; è pertanto insensibile alla luce ambientale (che presenta lunghezza d'onda compresa tra i 400 nm e i 700 nm) e ignora i segnali in continua; infatti, "cerca" la luce pulsata emessa dall'emettitore. L'ASIC include un LED driver, l'interfaccia bus I2C, un amplificatore, un ADC e altri componenti integrati e converte la corrente del fotodiodo in un segnale digitale a 16 bit. Questo dispositivo dialoga con il DUT tramite bus I2C; è impostato per mandare un interrupt quando

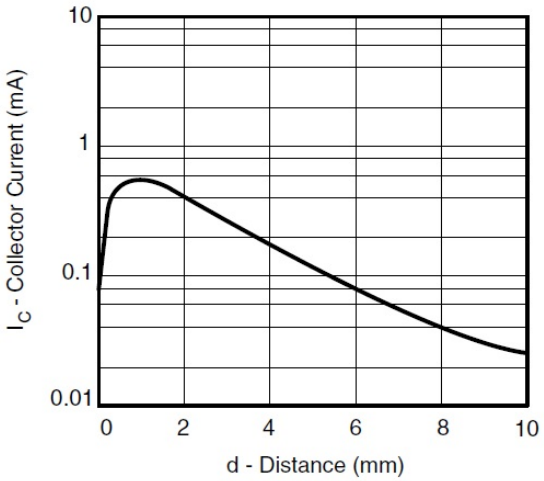


Figura 2.8: Corrente generata dal sensore di mascheramento in funzione della distanza dell'oggetto riflettente

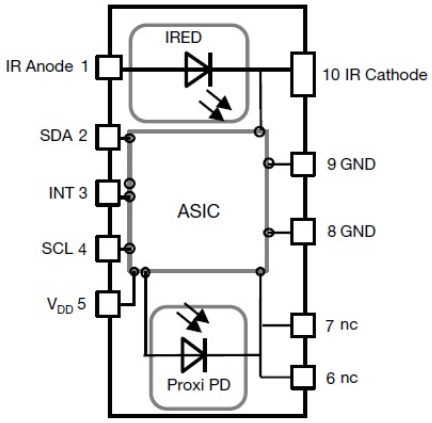


Figura 2.9: Diagramma a blocchi sensore di antimascheramento

una determinata soglia viene superata. Dopo un certo numero di eventi, il DUT apre il contatto di mascheramento per segnalare l'evento di allarme mascheramento alla centrale, garantendo la protezione del DUT dalla manomissione.

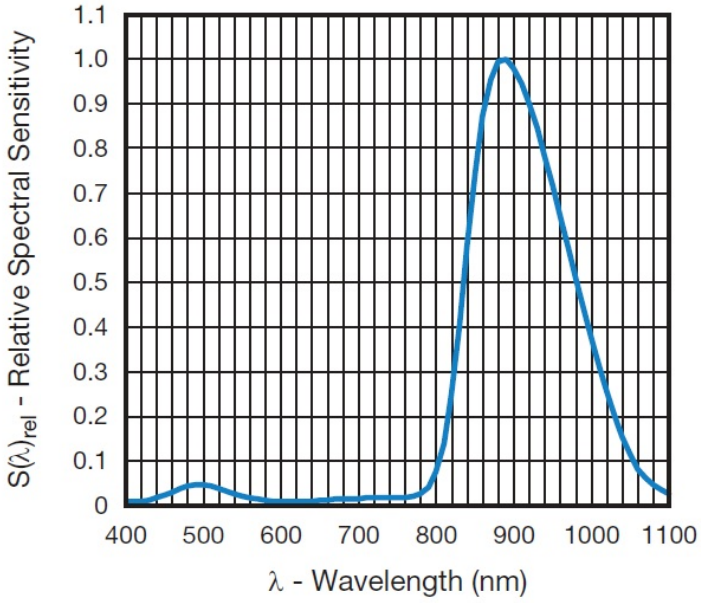


Figura 2.10: Sensibilità spettrale relativa VS lunghezza d'onda

2.4 Sensore a Microonde

Il dispositivo oggetto di questa trattazione (Device Under Test) impiega un sensore RADAR, che per brevità sarà indicato come sensore microonda (MW), per la rilevazione del movimento di un soggetto umano all'interno dell'area designata per la sorveglianza. Tale tecnologia si basa sull'emissione di onde elettromagnetiche nella banda delle microonde e sulla successiva analisi delle onde riflesse dagli oggetti presenti nell'ambiente. La variazione nella frequenza e nella fase delle onde riflesse, dovuta al movimento di un target, permette al sistema di rilevare la presenza e lo spostamento di persone. Una tipica configurazione di un sistema basato su sensore microonda, concettualmente simile a quella implementata nel DUT, è illustrata in Figura 2.11.

Il segnale analogico proveniente dal sensore MW, viene sottoposto a un processo di condizionamento che include operazioni di filtraggio e amplificazione. Questi stadi di elaborazione del segnale sono fondamentali per eliminare il rumore e adattare l'ampiezza del segnale ai livelli richiesti per la successiva analisi da parte del microprocessore, il "cuore" del DUT. Il microprocessore, attraverso sofisticati algoritmi, interpreta le variazioni del segnale per determinare la presenza e le caratteristiche del movimento rilevato.

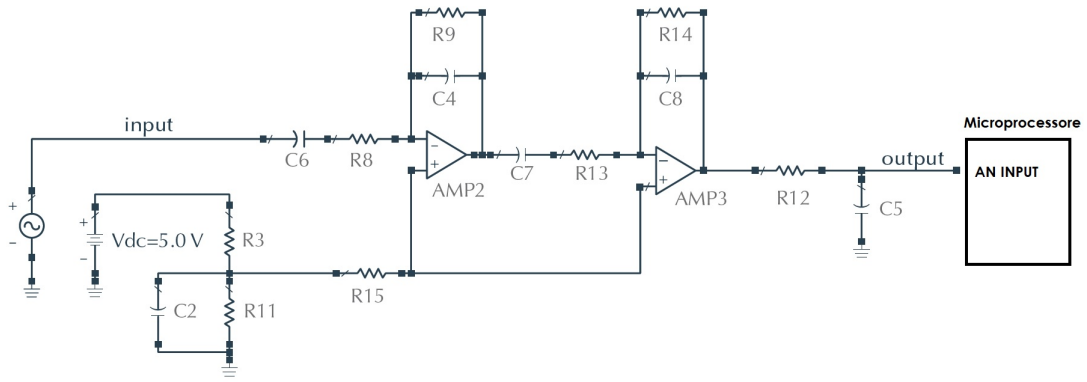
L'impiego della tecnologia microonda è motivato dalla sua elevata sensibilità e capacità di operare in diverse condizioni ambientali. Tuttavia, i sensori microonda

sono caratterizzati da un assorbimento di corrente relativamente elevato, il che rappresenta una limitazione in sistemi alimentati a batteria o dove l'efficienza energetica è un fattore critico. Per ovviare a questo inconveniente, il DUT adotta una strategia di rilevamento ibrida, combinando la tecnologia microonda con la tecnologia a infrarossi passivi.

Come accennato nel Capitolo 2.1 i sensori PIR sono dispositivi in grado di rilevare le variazioni nella radiazione infrarossa emessa dai corpi caldi, come il corpo umano. Questa tecnologia è caratterizzata da un consumo di corrente significativamente inferiore rispetto ai sensori a microonda, rendendola adatta per un monitoraggio continuo dell'ambiente. Di conseguenza, il DUT mantiene attiva solo la sezione di rilevamento PIR nella fase di sorveglianza standard, minimizzando il consumo energetico.

In caso di potenziale evento di allarme, ovvero quando i sensori PIR rilevano una variazione significativa nella radiazione infrarossa indicativa di un movimento, viene attivato il sensore microonda. Il sensore microonda, con la sua maggiore precisione e capacità di discriminare tra diverse tipologie di movimento, viene utilizzato per confermare o meno la presenza di un'intrusione umana.

La combinazione delle tecnologie PIR e microonda consente al DUT di raggiungere un livello superiore di accuratezza nella rilevazione di allarmi reali, riducendo drasticamente l'incidenza di falsi allarmi. Questo approccio permette di distinguere efficacemente tra il movimento di una persona e altri eventi che potrebbero attivare i sensori, come il movimento di animali, variazioni rapide di temperatura o fenomeni atmosferici, garantendo così un sistema di sicurezza più affidabile ed efficiente.



R3:	10 kOhm	**R12:**	100 Ohm	**C2:**	10 uF	**C7:**	22 uF
R8:	475 Ohm	**R13:**	475 Ohm	**C4:**	2.2 nF	**C7:**	4.7 nF
R9:	47.5 kOhm	**R14:**	22.1 kOhm	**C5:**	100 pF		
R11:	10 kOhm	**R15:**	475 Ohm	**C6:**	22 uF		

Figura 2.11: Schema applicativo sensore Microonda

2.5 Tecnologia RADAR e Applicazioni nel Sensore a Microonde

La tecnologia Radio Detection And Ranging (RADAR) trova largo impiego nella rilevazione di oggetti in movimento o stazionari. In origine questa tecnologia era caratterizzata da costi di sviluppo molto elevati, che ne consentivano l'applicazione solo in alcuni ambiti come, ad esempio, quello militare. Negli anni, la crescita della produzione in larga scala dei dispositivi RADAR ha consentito l'impiego anche in settori commerciali, come ad esempio l'antiintrusione. Questa tecnologia consente di rilevare un oggetto, determinarne la posizione, velocità e addirittura la direzione di movimento. Il principio di funzionamento è il seguente: il RADAR è costituito da un trasmettitore e da un ricevitore; il trasmettitore emette onde elettromagnetiche, la cui lunghezza d'onda è compresa tra 30 cm e 1 mm, nello spazio. Il ricevitore riceve le onde elettromagnetiche che, riflesse sul target, tornano indietro. Quando la radiazione emessa trova un ostacolo, denominato target, questa viene riflessa e parte di essa ritorna verso il sensore che la capta tramite il ricevitore. La radiazione elettromagnetica riflessa viene denominata ECO; i sensori basati su tecnologia RADAR utilizzano le informazioni contenute nell'ECO per determinare direzione e distanza di un oggetto riflettente[7]. In particolare, la distanza del target viene determinata dal tempo richiesto da un segnale pulsato per raggiungere il target e tornare indietro, mentre la velocità radiale del target è legata allo spostamento in frequenza del segnale di ECO, dovuto all'effetto Doppler.

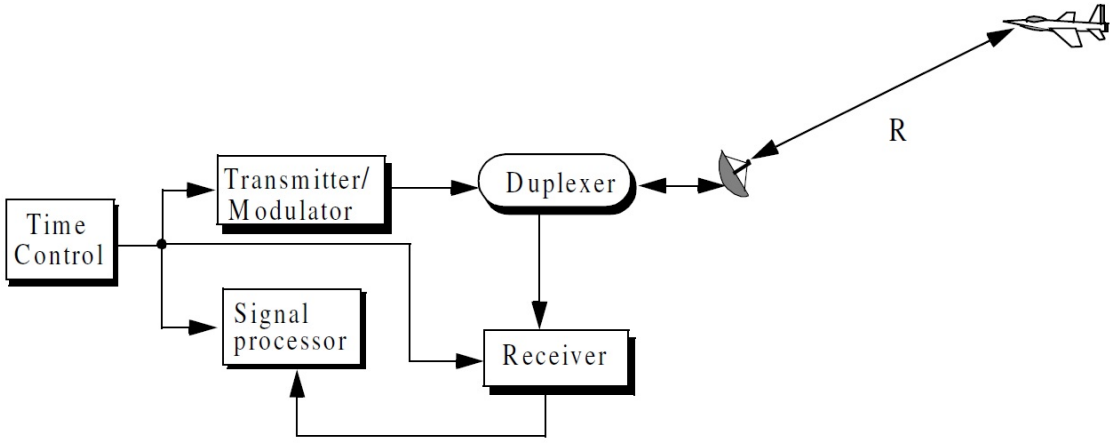


Figura 2.12: Un diagramma a blocchi semplificato di un RADAR

Le applicazioni più tipiche dei RADAR sono di tipo civile (ad esempio sorveglianza aeroportuale, navigazione marina, RADAR meteorologici, sistemi di allarme, misurazione della velocità, mappature geografiche ecc.); di tipo militare

(navigazione marina e aerea, rilevazione e tracking di velivoli, missili, guida dei missili, ricognizione ecc.) e di tipo scientifico (astronomia, misurazioni di distanze, telerilevamento dell'ambiente ecc.)

Per comprendere adeguatamente i principi base di questa tecnologia è necessario ricavare l'equazione RADAR. I sistemi basici RADAR sono di due tipi: monostatico, dove la stessa antenna viene utilizzata per trasmettere e per ricevere, e bistatico, dove vengono utilizzate due antenne separate per queste funzioni[8]. La maggior parte delle applicazioni, specialmente quelle a basso costo, utilizza RADAR di tipo monostatico. L'utilizzo di due antenne separate viene utilizzato per applicazioni dove è necessario ottenere isolamento tra il segnale trasmesso e il segnale ricevuto. Prendiamo in analisi il radar monostatico. Il radar emette una radiazione elettromagnetica ad una potenza P_t, tramite un'antenna che presenta guadagno G, la densità di potenza che illumina il target è data da

$$S_t = \frac{GP_t}{4\pi R^2} \text{ W/m}^2 \tag{2.5}$$

dove R è la distanza tra l'antenna e il target, assumendo che il target sia posizionato all'interno del lobo di radiazione dell'antenna. Il target riflette la radiazione elettromagnetica che lo investe in tante direzioni. Una porzione dell'onda elettromagnetica riflessa ritorna verso il RADAR. Il rapporto tra la potenza riflessa in una data direzione e la potenza incidente è definito radar cross section, σ, del target.

$$\sigma = \frac{P_s}{S_t} \text{ m}^2 \tag{2.6}$$

dove P_s è la potenza riflessa dal target in una data direzione. Il radar cross section è dimensionalmente un'area e rappresenta la misura di quanto un determinato oggetto è in grado di essere visto da un sistema RADAR; si tratta di una caratteristica intrinseca del target e dipende da svariati fattori, tra cui l'angolo di incidenza e di riflessione, così come dalla polarizzazione delle onde incidenti e riflesse. La potenza della radiazione elettromagnetica riflessa dal target segue la legge della propagazione nel mezzo, pertanto, il target può essere assimilato a un emettitore di dimensione finita, per cui la densità di potenza della radiazione emessa dal target decade con il quadrato della distanza ($1/4\pi R^2$).

Pertanto, la densità di potenza della radiazione riflessa e ricevuta è pari a

$$S_r = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2} \tag{2.7}$$

Moltiplicando per l'area effettiva di apertura dell'antenna

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \tag{2.8}$$

Si ottiene la potenza ricevuta pari a

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \tag{2.9}$$

Questa è l'equazione RADAR. È importante notare che il segnale trasmesso decade con la quarta potenza della distanza del target. Il radar utilizzato nel DUT lavora nella banda di frequenze denominata range K, infatti lavora a 24 GHz. Questo genere di RADAR soffre molto l'attenuazione atmosferica e meteorologica, viene infatti utilizzato per applicazioni a corto range.

La Figura 2.12 rappresenta un diagramma a blocchi di un tipico sistema RADAR di tipo pulsato: il blocco denominato Time Control genera i segnali di sincronizzazione di timing richiesti dal sistema. Un segnale modulato viene generato e mandato all'antenna dal blocco Transmitter/Modulator. Lo switching dell'antenna dal blocco trasmettitore a quello ricevitore viene effettuato dal blocco Duplexer, che consente l'utilizzo di una sola antenna per la ricezione e per la trasmissione. Il ricevitore manda il segnale ricevuto al blocco Signal processor, che si occupa di estrarre le informazioni utili dal segnale per determinare tutte le informazioni necessarie.

Nel nostro caso il DUT estrapola solo le informazioni necessarie per determinare il movimento del corpo umano nell'area protetta dal DUT. I RADAR usano la frequenza di Doppler per determinare la velocità radiale del target, così come per distinguere un oggetto stazionario da un oggetto in movimento. Il fenomeno di Doppler descrive lo spostamento della frequenza centrale di un'onda incidente su un target, dovuto al movimento del target stesso rispetto alla sorgente dell'onda. In base alla direzione del movimento del target, lo spostamento in frequenza può essere positivo o negativo. Un target in avvicinamento determinerà un aumento della frequenza dell'onda elettromagnetica ricevuta (proporzionale alla velocità di avvicinamento), così come un target che si sta allontanando dalla sorgente rifletterà la radiazione elettromagnetica con frequenza più bassa.

2.6 Sistema Anti-manomissione Tamper

Il DUT è dotato di un sistema di antimanomissione per garantire l'integrità del dispositivo e prevenire tentativi di sabotaggio. I sensori antintrusione da esterno, in particolare, sono spesso equipaggiati con meccanismi di rilevamento atti a segnalare la rimozione non autorizzata o la manomissione del dispositivo. Questi sistemi di allarme antimanomissione sono progettati per essere attivi in modo permanente, indipendentemente dallo stato di attivazione del sistema di sicurezza principale.

Le metodologie impiegate per implementare la funzione antimanomissione sono varie e dipendono dalle specifiche esigenze dell'applicazione e dal livello di sicurezza richiesto. Le soluzioni più semplici si basano su un pulsante meccanico a molla, mantenuto premuto dalla superficie di montaggio; la rimozione del sensore causa il rilascio del pulsante e l'attivazione dell'allarme. In alternativa, si utilizzano inclinometri elettromeccanici, che rilevano variazioni nell'orientamento del dispositivo oltre una soglia predefinita.

Le soluzioni più moderne e avanzate sfruttano accelerometri elettromeccanici microelettromeccanici (MEMS). Questi sensori, come l'accelerometro ISS2 della STMicroelectronics integrato nel DUT oggetto del collaudo, offrono una maggiore sensibilità e capacità di rilevare un ampio spettro di movimenti e accelerazioni.

Il principio di funzionamento degli accelerometri MEMS si basa sulla misurazione dell'accelerazione, definita come la variazione della velocità nel tempo. Secondo la seconda legge di Newton, l'accelerazione di un corpo è direttamente proporzionale alla forza netta che agisce su di esso e inversamente proporzionale alla sua massa. In pratica, l'accelerometro non misura direttamente l'accelerazione, ma la forza inerziale che questa produce su una massa di prova interna al sensore[9].

Gli accelerometri MEMS capacitivi, una tipologia comune, rilevano l'accelerazione attraverso la variazione di capacità elettrica causata dallo spostamento di una massa mobile. Il sensore è costituito da una massa sospesa tra due elettrodi fissi; l'accelerazione provoca lo spostamento della massa, modificando le distanze relative tra le superfici conduttive e, di conseguenza, la capacità. Questa variazione di capacità viene convertita in un segnale elettrico proporzionale all'accelerazione.

Nel contesto del sistema antimanomissione del DUT, l'accelerometro MEMS viene calibrato durante l'installazione per stabilire un sistema di riferimento. Il dispositivo registra i valori di accelerazione in condizioni di riposo, definendo così l'"orientamento di origine". Qualsiasi tentativo di spostare, inclinare o rimuovere il sensore dalla sua posizione di montaggio, come nel caso di un tentativo di manomissione, viene rilevato come una forza esterna che agisce sulla massa interna dell'accelerometro, causando una variazione significativa nei valori di accelerazione misurati [10]. Se l'accelerazione misurata supera una soglia predefinita, il sistema interpreta l'evento come un tentativo di manomissione e attiva l'allarme.

Capitolo 3

Sistema di Collaudo Attuale

Il sistema di collaudo attuale, il cui diagramma a blocchi è rappresentato in Figura 3.1, è costituito sostanzialmente da un contenitore che serve per alloggiare il DUT e radunare tutte le connessioni. Il DUT viene chiuso da un coperchio che serve per isolarlo dalle sollecitazioni esterne ed ospita due circuiti eccitatori per i sensori PIR. L'interfaccia utente è costituita da un software proprietario per personal computer che consente al collaudatore di visualizzare i segnali generati dal DUT in risposta alle sollecitazioni che vengono effettuate durante le varie fasi del collaudo.

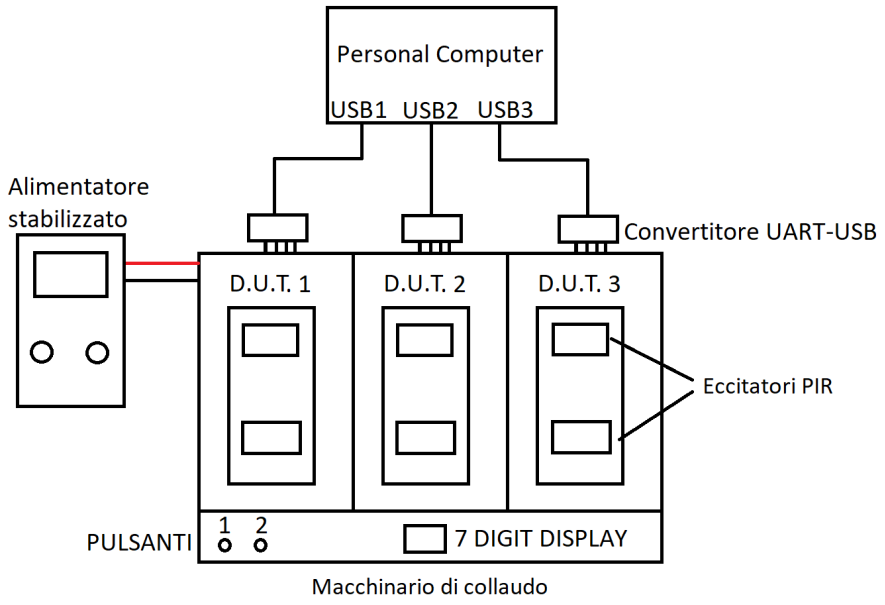


Figura 3.1: Diagramma a blocchi sistema di collaudo attuale

Siccome il macchinario di collaudo consente di alloggiare 3 sensori contemporaneamente, il contenitore è equipaggiato da un display 7 digit dove viene visualizzato il DUT che sta comunicando con il PC. Il macchinario di collaudo è inoltre equipaggiato da 6 piastrini "eccitatore PIR" costituiti da un banco di resistenze che, quando azionate tramite pulsante, fungono da sorgente infrarossa per eccitare i PIR. I pulsanti a bordo del sistema di collaudo hanno le seguenti funzioni:

- **Pulsante 1:** è il pulsante che aziona il piastrino di eccitazione PIR.
- **Pulsante 2:** consente di selezionare quale dei tre dispositivi viene collaudato

Il convertitore USB-UART: serve per collegare il DUT al PC. Il PC è dotato di un software di collaudo con un'interfaccia utente che permette all'operatore di eseguire un collaudo step by step. Allo stato attuale, ogni fase del collaudo richiede un operatore specializzato, in grado di determinare, in base a quanto visualizza a monitor, se il DUT rientra nei parametri di funzionamento o meno. Ogni step del collaudo è caratterizzato da una schermata dotata di interfaccia grafica, dove vengono mostrati i dati elaborati dal microprocessore del DUT e permette all'operatore di interagire con esso.

La prima fase è quella di warm-up del sensore: all'avvio bisogna attendere un tempo pari a circa 90 s, durante il quale le testine PIR del sensore si stabilizzano e raggiungono le corrette tensioni operative. Durante la fase di assestamento del primo sensore, vengono collegati e alimentati anche i DUT 2 e il DUT 3, che inizieranno a loro volta il loro ciclo di warm-up. Questo consente di parallelizzare il tempo di warm-up in modo che, quando il DUT 1 ha ultimato il collaudo, il DUT 2 sia subito pronto per essere collaudato.

Il sistema di collaudo attuale permette all'operatore di collaudare tutte le funzionalità del sensore e prevede le seguenti operazioni:

1. Connessione del DUT al macchinario di collaudo
2. Collaudo moduli PIR
3. Collaudo modulo microonda
4. Collaudo sensore antimasking
5. Collaudo del sistema antimanomissione (accelerometro)
6. Misurazione degli assorbimenti nello stato di quiete e nello stato di allarme

In Figura 3.2 è rappresentato il diagramma di flusso delle operazioni di collaudo.

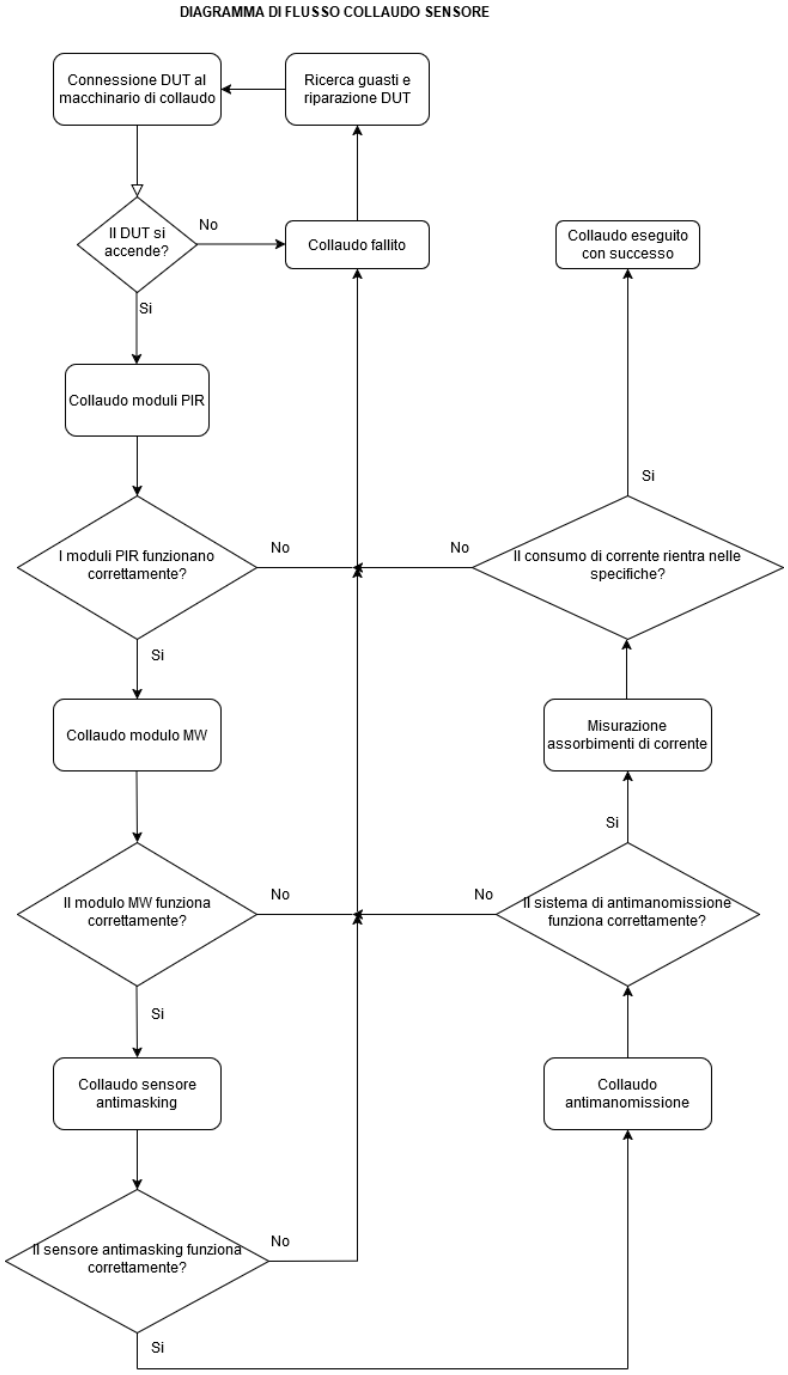


Figura 3.2: Diagramma di flusso del collaudo

3.1 Collegamento del DUT al Sistema di Collaudo

In questa fase l'operatore collega il DUT al macchinario di collaudo. Le connessioni tra il DUT e il macchinario di collaudo sono le seguenti:

1. **Connettore seriale:** questo connettore è presente sulla mainboard del sensore, si tratta di una connessione seriale che permette al DUT di colloquiare con il PC. Il macchinario di collaudo è equipaggiato da un convertitore RS232-USB per consentire al DUT di comunicare con il PC. Ogni step del collaudo è caratterizzato da una schermata dotata di interfaccia grafica dove vengono mostrati i dati elaborati dal microprocessore del DUT e permette all'operatore di interagire con esso.

2. **Connettore di alimentazione:** il DUT deve essere alimentato ad una tensione di 12 V. L'alimentazione avviene tramite l'alimentatore da banco stabilizzato

3. **Connettore uscite del sensore:** il sensore segnala tramite le uscite optomos libere da potenziale, gli eventi di allarme, di mascheramento e di manomissione. Il macchinario di collaudo è equipaggiato da un circuito che accende un LED quando le uscite vengono aperte.

Dopo aver collegato il DUT al macchinario di collaudo ed averlo alimentato, il DUT si accende ed entra automaticamente in modalità collaudo.

3.2 Collaudo dei Sensori PIR

Il diagramma a blocchi mostrato in Figura 3.3 descrive la parte relativa all'attuale collaudo dei moduli PIR.

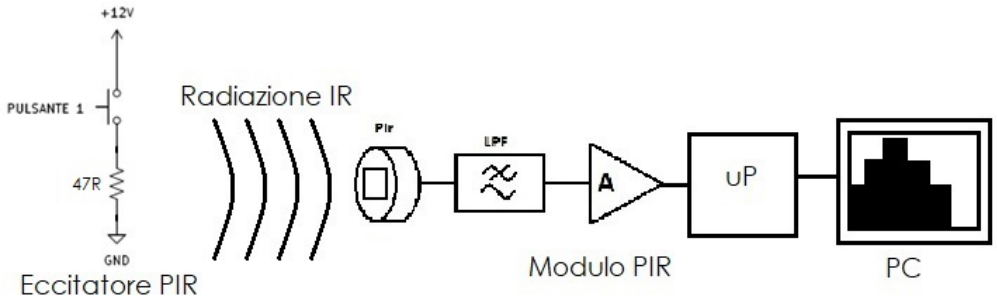


Figura 3.3: Diagramma a blocchi eccitatore collaudo PIR

L'eccitatore del PIR è costituito da un radiatore infrarosso che viene comandato dal collaudatore tramite il pulsante 1. Il radiatore è costituito da una resistenza da 47 Ω in grado di dissipare $\frac{1}{8}$ W alimentata a 2.45 V, quando il pulsante 1 viene premuto, il circuito viene chiuso e la resistenza, attraversata da una corrente pari a 52 mA, si scalda per effetto Joule ed emette radiazione infrarossa. Il segnale generato dal PIR in risposta alla sollecitazione viene filtrato e amplificato dalla catena di condizionamento di segnale, ed è collegato a un ingresso ADC del microprocessore del DUT. Il microprocessore campiona il segnale in ingresso ed effettua una conversione analogico-digitale, il cui valore varia da 0 (sollecitazione assente) a 65.535 (sollecitazione massima). Durante il normale funzionamento, il microprocessore analizza la sequenza di numeri ricevuta all'ingresso dell'ADC e determina l'evento di allarme. Quando il DUT è in modalità collaudo, invece, il microprocessore svolge un compito differente: comunica tramite interfaccia seriale i dati campionati al PC, il quale, tramite software di collaudo proprietario, illustra graficamente la successione dei campioni in tempo reale. In questo modo si ottiene un risultato simile alla visualizzazione che si otterrebbe collegando un oscilloscopio all'ingresso del microprocessore, dove però, essendo il segnale elaborato dal microprocessore digitale, la rappresentazione a monitor presenta un andamento discontinuo e discretizzato; la rappresentazione del segnale a monitor è infatti una sequenza di rettangoli di base fissa, la cui ampiezza è proporzionale all'intensità della radiazione IR percepita dal DUT. Il collaudatore, in base alla risposta alla sollecitazione visualizzata, determina se il DUT funziona correttamente.

Questo sistema di collaudo, seppur efficace, presenta alcuni limiti; infatti, la temperatura delle resistenze, che generano la radiazione IR, non è controllata e dipende da diversi fattori, tra cui la quantità di energia che dissipano le resistenze stesse durante la fase di riscaldamento, la variazione della resistenza elettrica al variare

della temperatura della resistenza stessa, l'efficienza della dispersione nell'ambiente dell'energia termica rilasciata dalla resistenza e dall'inerzia termica della resistenza e del suo supporto. Specialmente gli ultimi due fenomeni dipendono sensibilmente dal differenziale tra la temperatura della resistenza e quella dell'ambiente, il che fa sì che la lunghezza d'onda della radiazione IR non sia controllata e questo si traduce in una sollecitazione del PIR non perfettamente ripetibile da un test all'altro, in quanto il PIR è sensibile a un range di lunghezza d'onda piuttosto ristretta. Questo fa sì che il collaudatore debba interpretare la risposta del DUT alla sollecitazione basandosi sulla sua esperienza.

Queste problematiche inficiano la ripetibilità e i risultati del test, il cui risultato dipende fortemente dalla temperatura ambiente e, in linea teorica, anche dalla temperatura iniziale dell'eccitatore PIR. Si ricorda infatti che il sensore PIR è in grado di rilevare la differenza di radiazione infrarossa tra una sorgente e lo sfondo. Tutti questi fattori portano il collaudatore ad avere condizioni variabili durante una sessione di collaudo da DUT a DUT, andando a rendere sempre meno efficiente la radiazione IR emessa dall'eccitatore del PIR e facendo sì che, per compensare il degrado del segnale di risposta del DUT, il collaudatore debba sollecitare il PIR per un tempo superiore. Questo, oltre a fornire dati non attendibili e a non creare condizioni di test ripetibili e corrette, può portare al guasto prematuro del piastrino eccitatore, rendendone necessaria la sostituzione. Inoltre, l'esito del collaudo è a discrezione del collaudatore, il segnale generato non essendo controllato e avendo condizioni al contorno differenti come la temperatura iniziale delle resistenze, genera una risposta del DUT variabile alla sollecitazione che deve essere analizzata da un operatore specializzato per definire l'esito del collaudo.

L'obiettivo che si pone in questo progetto è di rendere il test completamente automatico. Per automatizzare il processo è necessario creare una sollecitazione il più possibile ripetibile, in modo che il microcontrollore presente nella main-board di collaudo sia in grado di determinare se il sensore è funzionante effettuando l'analisi dei segnali ricevuti dal DUT in seguito a uno stimolo controllato dalla mainboard stessa. Oltretutto si pone come obiettivo la riduzione dei tempi di attesa per ripristinare le condizioni iniziali dei sollecitatori PIR al fine di ottimizzare i tempi di collaudo. Questo approccio automatizzato elimina le operazioni manuali di stimolazione del sensore e rende l'esito del collaudo oggettivo, determinato dal microcontrollore della mainboard sulla base di parametri predefiniti, superando la valutazione qualitativa basata sull'esperienza dell'operatore. Pertanto, nei prossimi capitoli verrà studiato e implementato un sistema in grado di realizzare una sollecitazione ripetibile, che implica da parte del DUT una risposta sempre uguale con una tolleranza percentuale ridotta. In questo modo è possibile eliminare l'interazione operatore-macchinario di collaudo e permettere al macchinario di collaudo di sollecitare il modulo PIR e, allo stesso tempo, analizzare la risposta alla sollecitazione per determinare se il DUT funziona correttamente.

3.3 Collaudo del Sensore Microonda

L'attuale metodologia di collaudo del modulo microonda prevede esclusivamente operazioni manuali. La decisione sulla conformità del DUT è demandata all'operatore specializzato, il quale si basa sull'analisi dei risultati ottenuti dalle sollecitazioni applicate al modulo.

Attualmente il modulo microonda viene collaudato in due condizioni differenti. Il primo collaudo viene effettuato in assenza di sollecitazioni, per analizzare il rumore di fondo. Il rumore deve essere al di sotto di una soglia prestabilita. Il secondo test viene effettuato in presenza di sollecitazione per verificare il corretto funzionamento del DUT. Si tratta pertanto di un collaudo funzionale, che non è in grado di arrivare a un alto dettaglio di test. Analogamente a quanto descritto per il collaudo del sensore PIR, il DUT comunica tramite seriale i dati che percepisce e il PC, tramite software proprietario, manda a video un diagramma che permette di visionare l'andamento del segnale nel tempo. Il diagramma a blocchi del collaudo della microonda è rappresentato in Figura 3.4.

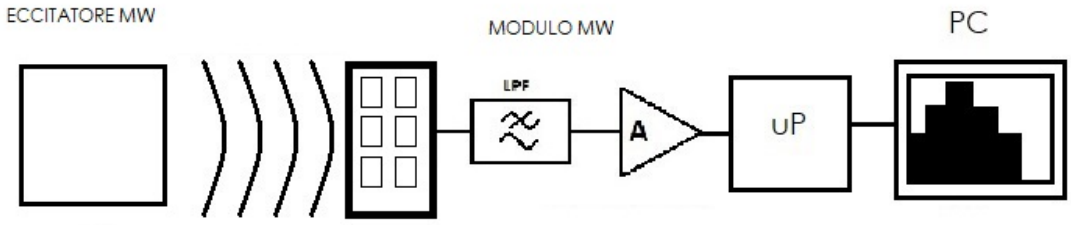


Figura 3.4: Diagramma a blocchi del sistema di collaudo del modulo microonda

Il modulo microonda viene sollecitato da un eccitatore, il segnale viene filtrato e amplificato e viene mandato al microprocessore del DUT. Il microprocessore del DUT comunica al PC tramite collegamento seriale i campioni acquisiti, i quali vengono mostrati a monitor, rappresentati da dei rettangoli la cui ampiezza è proporzionale all'intensità del segnale. Nel sistema di collaudo attuale è l'operatore stesso a sollecitare tramite un movimento della mano il sensore microonda. Questa metodologia di lavoro presenta evidenti svantaggi, tra cui l'impossibilità di generare una sollecitazione sempre identica e quindi risultati ripetibili. L'operatore deve effettuare una vera e propria operazione manuale che non consente di ottenere una risposta ripetibile e controllata dal sensore e deve verificare che il DUT risponda in modo adeguato alla sollecitazione effettuata. Inoltre, la microonda è progettata per rilevare la presenza umana in un campo aperto in un raggio di 15 m; pertanto, è estremamente sensibile ai movimenti degli oggetti o delle persone che la circondano;

infatti, durante le operazioni di collaudo può persino essere sensibile al battito cardiaco dell'operatore, andando a sfalsare i risultati del test.

Uno dei problemi più grandi che affliggono l'attuale sistema di collaudo è la difficoltà di isolare il sensore microonda per renderlo insensibile all'ambiente circostante. Infatti, le onde elettromagnetiche a 24 GHz sono in grado di oltrepassare molti tipi di materiale, andando a rendere molto complicata l'analisi del rumore e l'analisi della risposta alla sollecitazione della microonda senza che questa venga influenzata da condizioni al contorno che alterano il risultato finale.

Nei prossimi capitoli verranno affrontati e risolti i problemi relativi all'isolamento del sensore MW, della ripetibilità del test e della sua completa automatizzazione. Per fare ciò verrà implementato un attuatore controllato elettricamente che sia in grado di sollecitare il modulo MW in modo ripetitivo.

3.4 Collaudo del Sensore Antimasking

Attualmente il collaudo del sensore antimasking avviene tramite la copertura del sensore di mascheramento chiudendo il coperchio del macchinario di collaudo. L'operatore, quando il sistema di collaudo gli comunica che si sta verificando il funzionamento del sensore di antimascheramento, chiude il coperchio del macchinario di collaudo dove è alloggiato il DUT per verificare l'avvenuta rilevazione. Come nel caso del sensore PIR, nell'interfaccia grafica dell'operatore viene mostrato un grafico temporale con i valori rilevati dal sensore tramite l'utilizzo di rettangoli la cui altezza è proporzionale al segnale di uscita.

Questo tipo di collaudo può essere considerato sufficiente in quanto i funzionamenti del sensore da collaudare sono:

1. Comunicazione I2C
2. Rilevazione di un ostacolo ad una distanza di circa 10 cm dal sensore

È pertanto sufficiente analizzare il segnale generato dal sensore in assenza di ostacoli per verificare che il sensore operi correttamente e confrontarlo al segnale generato quando viene applicato il cartoncino per simulare un mascheramento. Il collaudo del sensore di mascheramento non è oggetto di questo studio, in quanto la sua esecuzione non presenta particolari criticità, e può essere riportato agevolmente nel nuovo sistema di collaudo, facendo analizzare la risposta alla sollecitazione direttamente dal microcontrollore. L'ottimizzazione che si potrà fare è di inserire il collaudo del sensore di antimascheramento in una fase conveniente del processo di collaudo. Per fare ciò, considerando che il dispositivo di collaudo sarà automatico, sarà sufficiente effettuare due misurazioni, una a contenitore aperto e una a contenitore chiuso. La differenza tra i valori prelevati nelle due condizioni deve superare una soglia minima che garantisce che il sensore di prossimità funzioni. Il

superamento di questa soglia determina il risultato positivo del test; al contrario, se il valore rimane al di sotto o uguale ad essa, il test è considerato fallito.

3.5 Collaudo delle Uscite di Allarme per Masking e Manomissione

In questa fase vengono collaudate le uscite di allarme del sensore. Le uscite di allarme del sensore sono costituite da un optomos CPC1017 della IXYS IC. In Figura 3.5 è rappresentato lo schema elettrico delle uscite di allarme del sensore.

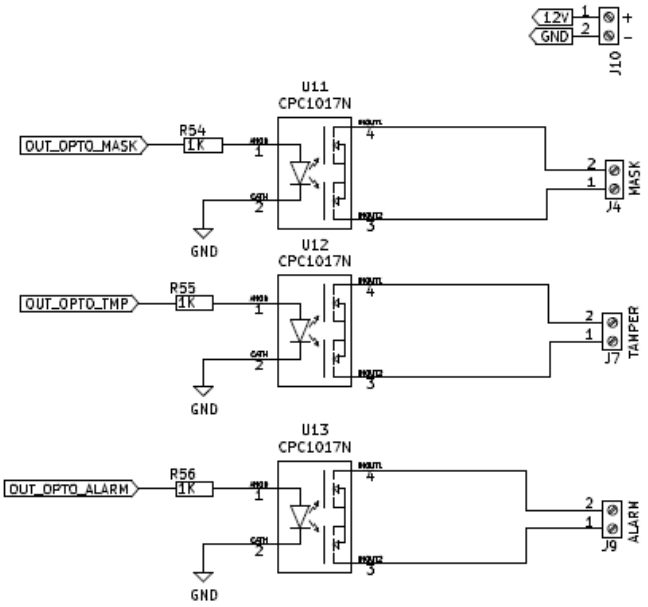


Figura 3.5: Schema delle uscite allarme del sensore

Gli optomos di uscita sono normalmente chiusi, pertanto, in assenza di allarme le uscite ai capi dei morsetti sono cortocircuitate. Quando il sensore comunica l'allarme, le uscite si aprono; dunque, non c'è più contatto elettrico ai capi del morsetto.

Il collaudatore può visualizzare tramite un circuito LED se l'uscita di allarme funziona correttamente. In figura 3.6 è rappresentata la porzione di schema del macchinario di collaudo alla quale sono collegate le uscite del sensore.

Per collaudare le uscite di allarme, il sensore è collegato ad uno schedino le cui uscite sono collegate in parallelo a 3 LEDs (vedi Figura 3.6). L'interfaccia grafica a monitor avverte l'installatore che le uscite vengono attivate in sequenza e invita l'operatore a visualizzare i LEDs di allarme. Quando vengono attivate le uscite, i

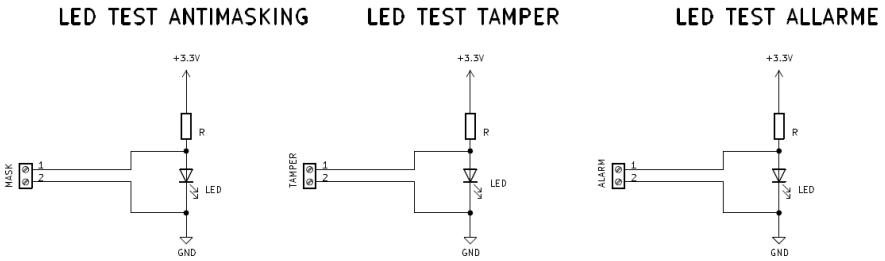


Figura 3.6: Schema collaudo delle uscite di allarme

LEDs vengono accesi. In questo modo l'operatore è in grado di verificare il corretto funzionamento delle uscite filari del sensore. Lo svantaggio di questa operazione è che richiede l'attenzione dell'operatore. Automatizzare questa fase di collaudo è molto semplice. È infatti sufficiente collegare le uscite del sensore da testare a degli ingressi del microprocessore del macchinario di collaudo. In Figura 3.7 si può vedere lo schema implementato per automatizzare questo test.

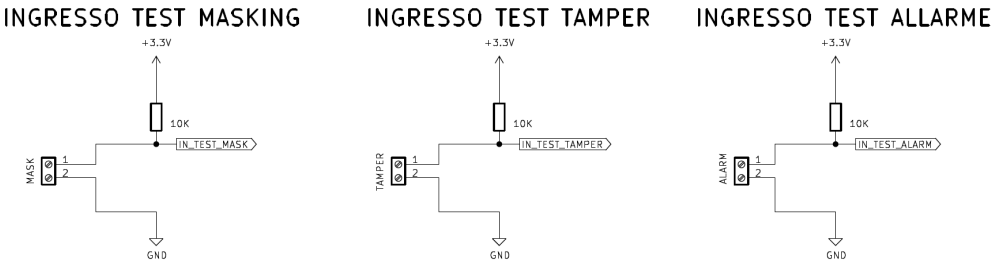


Figura 3.7: Schema di test uscite automatizzato

Le label `IN_TEST_MASK`, `IN_TEST_TAMPER` `IN_TEST_ALARM` sono collegate a tre ingressi digitali del microcontrollore presente sulla mainboard. Il principio di funzionamento è molto semplice: quando il sensore è nella fase di collaudo delle uscite, attiverà l'uscita da testare, portando il segnale di ingresso da $3.3\,V$ a $0\,V$.

3.6 Misurazione degli Assorbimenti Energetici

Il sensore oggetto del collaudo viene anche sottoposto al controllo dei consumi. Il sensore da specifiche tecniche presenta un consumo di circa 5 mA in stato di quiete e di 20 mA in stato di allarme. È di fondamentale importanza analizzare il consumo di un sensore, in quanto un assorbimento anomalo può essere indice di componenti montati erroneamente, cortocircuiti o circuiti integrati guasti. Attualmente, il collaudatore collega in serie all'alimentazione del sensore un amperometro da banco e controlla che, nello stato di quiete e di allarme, l'assorbimento di corrente sia al di sotto di una certa soglia.

Capitolo 4

Obiettivi di Progetto del Nuovo Sistema

L'analisi critica del sistema di collaudo attualmente impiegato, dettagliatamente descritta nel Capitolo 3, ha evidenziato una serie di limitazioni che ne compromettono l'efficacia, l'efficienza e la capacità di garantire un adeguato livello di qualità del prodotto finito. La marcata dipendenza dall'intervento umano in tutte le fasi del processo di collaudo si configura come la principale fonte di inefficienze e di potenziali errori, introducendo un'intrinseca soggettività che si ripercuote negativamente sull'intero ciclo produttivo. Tale problematica assume particolare rilevanza nel contesto del collaudo dei sensori PIR e MW, i quali presentano specifiche peculiarità e criticità che il sistema di collaudo attuale non è in grado di gestire in modo ottimale.

4.1 Svantaggi del Collaudo Manuale e le Loro Implicazioni per il Collaudo di Sensori PIR e MW

1. **Costi Operativi Elevati e Gestione Inefficiente delle Risorse Umane:** L'impiego di operatori altamente specializzati, con una profonda conoscenza del DUT e delle procedure di collaudo, comporta costi orari elevati. La complessità delle operazioni e la necessità di un'accurata interpretazione dei risultati, spesso influenzati da fattori ambientali o da specifiche caratteristiche dei sensori, richiedono una formazione specifica e un costante aggiornamento delle competenze. La gestione del personale addetto al collaudo risulta onerosa in termini di flessibilità e continuità operativa. La specializzazione richiesta

limita la possibilità di impiegare personale meno qualificato in caso di assenze o picchi di lavoro.

- **Implicazioni per il collaudo di sensori PIR e MW:**
  - Nel collaudo del sensore PIR, l'esperienza dell'operatore è cruciale per valutare correttamente la risposta del sensore alle sollecitazioni, che possono variare in base alla temperatura ambiente e alle caratteristiche dell'eccitatore.
  - Nel collaudo del sensore MW, l'operatore deve essere in grado di distinguere i segnali reali dalle interferenze esterne, che possono facilmente alterare la risposta del sensore.

2. **Suscettibilità agli Errori Umani e Rischio di Non Conformità del Prodotto:** L'esecuzione manuale delle operazioni di collaudo espone al rischio di errori umani, derivanti da distrazione, affaticamento, disomogeneità nell'applicazione delle procedure o interpretazioni soggettive dei risultati. Le conseguenze degli errori possono essere gravi, compromettendo l'affidabilità del collaudo e aumentando la probabilità di immettere sul mercato prodotti non conformi.

   - **Implicazioni per il collaudo di sensori PIR e MW:**
     - Nel collaudo del sensore PIR, l'operatore può commettere errori nella valutazione dell'ampiezza e della durata del segnale di risposta, soprattutto in presenza di rumore o variazioni di temperatura.
     - Nel collaudo del sensore MW, l'operatore può avere difficoltà a valutare la sensibilità del sensore e la sua capacità di discriminare tra movimenti reali e falsi allarmi.

3. **Limitata Tracciabilità e Difficoltà nell'Analisi dei Dati:** L'assenza di un sistema di registrazione e reportistica automatizzata ostacola l'analisi dei dati e l'identificazione delle cause di non conformità. La mancanza di un registro dettagliato delle sollecitazioni, delle risposte e delle valutazioni impedisce la ricostruzione del processo di collaudo e l'individuazione di anomalie o tendenze.

   - **Implicazioni per il collaudo di sensori PIR e MW:**
     - Nel collaudo del sensore PIR, è difficile analizzare l'influenza della temperatura ambiente o delle caratteristiche dell'eccitatore sulla risposta del sensore.
     - Nel collaudo del sensore MW, non è possibile tracciare con precisione i parametri dello stimolo (frequenza, ampiezza, velocità) e metterli in relazione con la risposta del sensore.

4. **Inefficienza del Processo e Tempi di Collaudo Prolungati:** L'esecuzione manuale comporta tempi di esecuzione variabili e prolungati, influenzati da fattori umani e procedurali. La mancanza di standardizzazione e automazione impedisce l'ottimizzazione del flusso di lavoro e la riduzione dei tempi morti.
    - **Implicazioni per il collaudo di sensori PIR e MW:**
        - Nel collaudo del sensore PIR, i tempi sono prolungati dalla necessità di attendere il raffreddamento dell'eccitatore e dalla difficoltà di ripetere le misurazioni in modo rapido.
        - Nel collaudo del sensore MW, l'operatore deve dedicare tempo alla preparazione del test e alla valutazione soggettiva della risposta del sensore.

4.2 Obiettivi e Vantaggi del Nuovo Sistema di Collaudo

Per superare le limitazioni del sistema attuale e realizzare un processo più efficiente, affidabile e sostenibile, si propone un sistema ampiamente automatizzato, progettato specificamente per il collaudo di sensori PIR e MW.

1. **Riduzione Drastica dei Costi Operativi:** L'automazione delle operazioni e la riduzione della dipendenza dall'operatore permetteranno di abbattere i costi del personale. L'ottimizzazione del flusso di lavoro e la parallelizzazione delle attività contribuiranno alla diminuzione dei costi indiretti.
    - **Vantaggi specifici per il collaudo di sensori PIR e MW:**
        - Nel collaudo del sensore PIR, l'automazione riduce la necessità di personale altamente specializzato per l'interpretazione dei risultati.
        - Nel collaudo del sensore MW, l'automazione elimina i tempi morti legati alla preparazione del test e alla valutazione soggettiva.
2. **Miglioramento Significativo dell'Affidabilità e della Qualità del Prodotto:** L'esecuzione automatica e ripetibile delle operazioni garantirà risultati più accurati e affidabili. La standardizzazione delle procedure e l'impiego di sensori e attuatori di precisione ridurranno l'influenza di fattori esterni e di soggettività umana.
    - **Vantaggi specifici per il collaudo di sensori PIR e MW:**
        - Nel collaudo del sensore PIR, l'automazione garantisce la ripetibilità degli stimoli e la misurazione oggettiva della risposta del sensore, eliminando l'influenza della temperatura ambiente e delle caratteristiche dell'eccitatore.

  - Nel collaudo del sensore MW, l'automazione consente di controllare con precisione i parametri dello stimolo e di isolare il sensore dalle interferenze esterne, ottenendo risultati più affidabili.

3. **Incremento Sostanziale della Produttività e Ottimizzazione dei Tempi:** L'automazione delle operazioni e la riduzione dei tempi di collaudo si tradurranno in un aumento della produttività. La minimizzazione dei tempi morti e la parallelizzazione delle attività consentiranno di collaudare un maggior numero di DUT nello stesso intervallo di tempo.

   - **Vantaggi specifici per il collaudo di sensori PIR e MW:**
     - Nel collaudo del sensore PIR, l'automazione elimina i tempi di attesa per il raffreddamento dell'eccitatore e consente di eseguire i test in modo più rapido e continuo.
     - Nel collaudo del sensore MW, l'automazione riduce i tempi di preparazione del test e permette di eseguire una serie di misurazioni in sequenza, senza intervento manuale.

4. **Garanzia di Completa Tracciabilità ed Efficace Analisi dei Dati:** L'implementazione di un sistema di registrazione e reportistica automatizzata consentirà di tracciare in modo dettagliato tutte le informazioni relative alle prestazioni del DUT. La memorizzazione sistematica dei dati faciliterà l'identificazione di anomalie, la diagnosi delle cause di non conformità e l'implementazione di azioni correttive.

   - **Vantaggi specifici per il collaudo di sensori PIR e MW:**
     - Nel collaudo del sensore PIR, sarà possibile correlare la risposta del sensore con i parametri dello stimolo e le condizioni ambientali, ottenendo informazioni preziose per l'ottimizzazione del progetto.
     - Nel collaudo del sensore MW, si potranno analizzare in dettaglio le caratteristiche del segnale di risposta (ampiezza, frequenza, fase) e metterle in relazione con i parametri dello stimolo, migliorando la comprensione del comportamento del sensore.

4.3 Descrizione Funzionale del Nuovo Sistema: Architettura e Componenti Fondamentali per il Collaudo Ottimizzato di Sensori PIR e MW

Il nuovo sistema di collaudo sarà basato su un'architettura modulare e flessibile, progettata per garantire scalabilità, adattabilità e facilità di manutenzione. Il sistema sarà specificamente progettato per affrontare le peculiarità del collaudo dei sensori PIR e MW, integrando componenti e funzionalità in grado di gestire le loro specifiche esigenze.

1. **Microcontrollore per l'Elaborazione dei Dati di Sensori PIR e MW** Il microcontrollore svolgerà un ruolo centrale nel controllo e nella temporizzazione delle operazioni di collaudo, nell'acquisizione e nell'elaborazione dei dati provenienti dal DUT e nella generazione dei segnali di controllo per gli attuatori. La scelta del microcontrollore sarà guidata da requisiti quali potenza di calcolo, periferiche di comunicazione (UART, SPI, I2C), ingressi/uscite digitali e analogici e facilità di programmazione. Si prevede l'impiego di un microcontrollore della famiglia PIC32, della Microchip.

2. **Sistema di Generazione degli Stimoli: Soluzioni Ottimizzate per Sensori PIR e MW** Il sistema sarà progettato per generare stimoli controllati e ripetibili, simulando accuratamente le condizioni operative reali di sensori PIR e MW. La progettazione sarà specifica per ciascun tipo di sensore:

   - **Sensore PIR:** Si prevede un sistema di stimolo basato su un emettitore infrarosso controllato in intensità e durata, con particolare attenzione alla stabilità della radiazione emessa e all'indipendenza dalla temperatura ambiente. Questo sistema dovrà consentire la variazione controllata dei parametri dello stimolo (intensità, frequenza, durata) per caratterizzare completamente la risposta del sensore.
   - **Sensore MW:** Si utilizzerà un attuatore per generare segnali di movimento controllati e ripetibili, simulando l'effetto Doppler. Sarà cruciale implementare un efficace sistema di isolamento dalle interferenze esterne per garantire l'accuratezza delle misurazioni e la riproducibilità dei risultati. Il sistema dovrà consentire la variazione dei parametri dello stimolo (frequenza, ampiezza, velocità simulata) per valutare la sensibilità e la selettività del sensore.

3. **Sistema di Acquisizione e Analisi delle Risposte: Algoritmi Dedicati per Sensori PIR e MW** Il sistema acquisirà le risposte del DUT, generati da trasduttori appositamente progettati. I dati saranno elaborati e analizzati dal microcontrollore, con algoritmi specifici per ciascun tipo di sensore:

- **Sensore PIR:** L'analisi si concentrerà sull'estrazione di parametri quali ampiezza, durata, tempo di salita e tempo di discesa del segnale di risposta, nonché sulla valutazione del rumore e della stabilità del segnale.
- **Sensore MW:** L'analisi si concentrerà sulla misurazione della frequenza e dell'ampiezza del segnale Doppler, sulla valutazione del rapporto segnale-rumore e sulla determinazione della capacità del sensore di rilevare movimenti a diverse velocità e distanze.

4. **Sistema di Registrazione e Reportistica: Dati Strutturati e Visualizzazione Intuitiva per il Collaudo di Sensori PIR e MW** Le informazioni relative alle operazioni di collaudo saranno registrate in un database strutturato. Il sistema genererà report dettagliati e personalizzabili, con visualizzazione grafica dei dati e strumenti di analisi statistica. I report conterranno informazioni specifiche per ciascun tipo di sensore:

   - **Sensore PIR:** Grafici della risposta del sensore in funzione dei parametri dello stimolo e della temperatura ambiente, tabelle dei valori misurati, analisi statistiche del rumore e della stabilità.
   - **Sensore MW:** Grafici dello spettro di frequenza del segnale Doppler, mappe di sensibilità del sensore, tabelle dei valori di rapporto segnale-rumore e di velocità rilevata.

5. **Interfaccia Operatore: Controllo Avanzato e Feedback Dettagliato per il Collaudo di Sensori PIR e MW** L'interfaccia utente consentirà all'operatore di monitorare il processo di collaudo, visualizzare i risultati e intervenire in caso di anomalie. L'interfaccia fornirà strumenti di controllo avanzati e feedback dettagliato per il collaudo di sensori PIR e MW:

   - **Sensore PIR:** Visualizzazione in tempo reale della forma d'onda del segnale di risposta, controllo dei parametri dello stimolo, strumenti di calibrazione del sensore.
   - **Sensore MW:** Visualizzazione della mappa di sensibilità del sensore, controllo dei parametri dello stimolo, strumenti di analisi della frequenza Doppler.

Questo approccio mirato al collaudo di sensori PIR e MW consentirà di ottenere risultati più accurati, affidabili ed efficienti, contribuendo significativamente al miglioramento della qualità del prodotto e all'ottimizzazione del processo produttivo.

Capitolo 5

Collaudo del sensore PIR

La fase iniziale di questo studio è stata dedicata all'analisi e alla risoluzione delle problematiche operative del radiatore infrarosso a resistenze, uno strumento fondamentale per le procedure di test. I feedback provenienti dal personale addetto al collaudo hanno evidenziato una criticità significativa: la notevole variazione nella risposta del DUT agli stimoli termici emessi dal radiatore, influenzata principalmente dalle fluttuazioni delle condizioni ambientali. Questa instabilità rendeva difficile ottenere misurazioni affidabili e ripetibili, compromettendo la validità delle procedure di collaudo. In particolare, la temperatura ambiente influisce molto sulla risposta del PIR alla sollecitazione, rendendo di difficile interpretazione l'esito del collaudo. Un'altra problematica riscontrata consiste nel fatto che, dopo un certo numero di sollecitazioni del PIR, è necessario attendere che il radiatore a resistenze si raffreddi. Si è osservato infatti che un incremento significativo della temperatura del radiatore a resistenze ne compromette l'efficacia nell'ambito delle procedure di collaudo. Tale innalzamento termico può indurre variazioni indesiderate nelle caratteristiche spettrali dell'emissione infrarossa o determinare instabilità nel flusso radiante. Di conseguenza, lo stimolo fornito al DUT potrebbe non soddisfare più i criteri di prova stabiliti, con ripercussioni negative sull'accuratezza dei risultati dei test. Questo capitolo si propone di approfondire la comprensione di questi fenomeni, esplorandone le motivazioni fisiche fondamentali al fine di pervenire a una risoluzione appropriata. Viene implementato un prototipo funzionale del sollecitatore dei PIR e viene analizzata la risposta del PIR alla sollecitazione. L'obiettivo che ci si pone dunque è di utilizzare una sorgente infrarossa che possa essere comandata dal microcontrollore della mainboard, il cui stimolo sia il più possibile indipendente dalla temperatura ambiente e che, anche dopo un elevato numero di sollecitazioni, non si surriscaldi.

5.1 Analisi Sperimentale del Piastrino Eccitatore PIR a Resistenza

L'obiettivo di questo test è di verificare il funzionamento del piastrino eccitatore PIR a resistenza, verificare i limiti teorici esposti nel Capitolo 4 e individuare delle soluzioni che rendano il test setup automatizzabile. Il diagramma a blocchi del test setup realizzato è mostrato in Figura 5.1. Per pilotare l'eccitatore PIR è stato realizzato un semplice circuito timer che permette di regolare la durata del tempo di emissione IR (Ton). Il periodo Toff in cui il piastrino eccitatore non è alimentato deve tenere in considerazione il ritorno in quiete del segnale del PIR; questo permette di avere sempre le stesse condizioni di partenza del test, in caso contrario si perde la ripetibilità del risultato, rendendo l'analisi priva di accuratezza. Durante il ciclo automatico di eccitazione dell'emettitore IR, il segnale generato dal

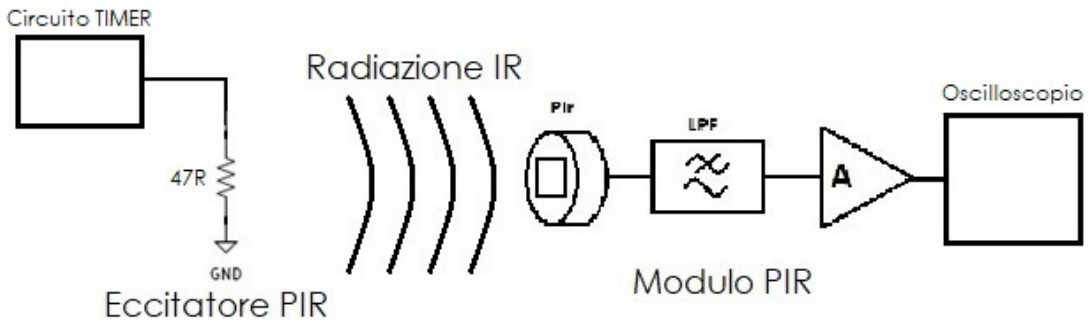


Figura 5.1: Diagramma a blocchi test setup eccitatore PIR realizzato

DUT è stato visualizzato tramite oscilloscopio. Questa visualizzazione ha permesso un confronto diretto con un segnale di riferimento, al fine di ottenere un segnale di test che simuli condizioni di rilevazione realistiche e ritenute particolarmente critiche per la validità della prova. Il segnale che viene prodotto con il test garantisce di valutare rapidamente e in modo automatico la corretta funzionalità di tutti i componenti coinvolti nel trattamento del segnale ricevuto. Inizialmente, è stato implementato su una breadboard millefori il circuito multivibratore basato sul circuito integrato LM555, il cui schema elettrico è illustrato in Figura 5.2. Questo circuito ha lo scopo di generare un'onda quadra con duty cycle variabile (regolabile tramite potenziometro RV1) per pilotare il piastrino eccitatore; come driver è stato utilizzato il MOS NTR4501 della ONSEMI, si tratta di un MOS a canale N caratterizzato da una tensione di soglia V_{th} pari a 1.2 V e in grado di assorbire una corrente di drain massima pari a 3.4 A. Una volta realizzato il circuito mostrato in Figura 5.2, sono state effettuate le regolazioni necessarie per generare un impulso la cui durata avesse un Ton di circa 350 ms. In questo modo il DUT viene stimolato

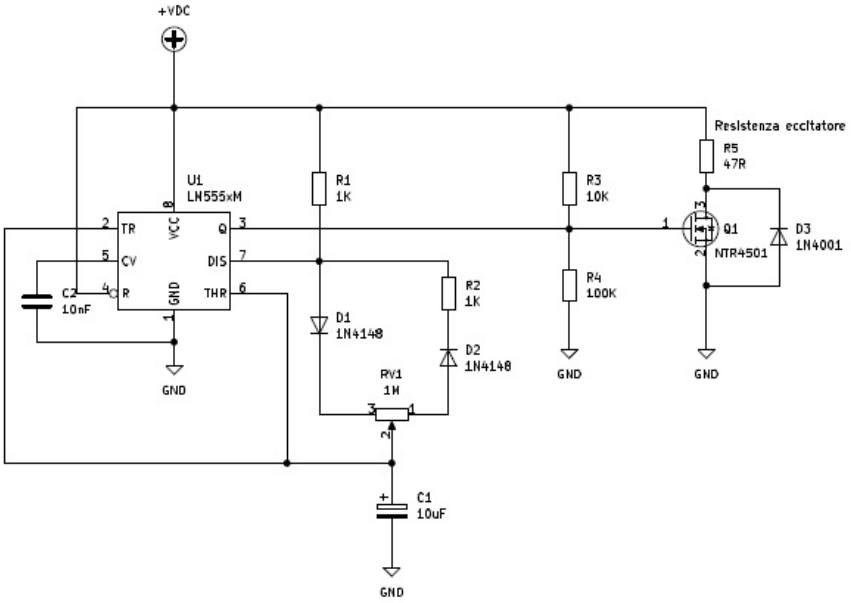


Figura 5.2: Schema elettrico delcircuito timer implementato per il pilotaggio dell'eccitatore PIR

per generare un segnale che permette di verificarne il funzionamento. Andando ad aumentare la tensione di comando $+V_{\mathrm{dc}}$ si aumenta la corrente che passa nel piastrino eccitatore costituito da R_5 e di conseguenza l'intensità della radiazione IR emessa dal piastrino eccitatore. Andando a variare la posizione del trimmer R_{V1} invece si modifica il duty cycle dell'onda quadra. Il piastrino eccitatore è stato posto a 3 mm di distanza rispetto alla superficie del PIR, posizionato leggermente a lato di esso in modo da irradiare un solo elemento e massimizzare l'effetto della radiazione. In Figura 5.3 è fotografato il circuito di pilotaggio realizzato. I test sono stati svolti in due condizioni climatiche distinte, temperatura ambiente di 20 °C e temperatura ambiente di 33 °C per verificare la correlazione tra temperatura ambiente e risposta del PIR. Per il primo test svolto a temperatura di 20 °C si può osservare la risposta al singolo impulso in Figura 5.4, e la risposta a un treno di impulsi della durata complessiva di 500 s in Figura 5.5. In entrambi i casi, il segnale rosso rappresenta lo stimolo, ovvero il segnale di alimentazione alla resistenza per riscaldarla. Il segnale in giallo rappresenta la risposta del PIR.

Le acquisizioni effettuate con l'oscilloscopio offrono svariati spunti di riflessione. Il primo aspetto che emerge da questo test è che il problema del surriscaldamento delle resistenze non si verifica con lo stimolo effettuato dal temporizzatore. Questo perché il tempo di stimolo impostato è quello strettamente necessario per far attivare il PIR, ed è pari a 350 ms. Quando il collaudatore preme il pulsante per

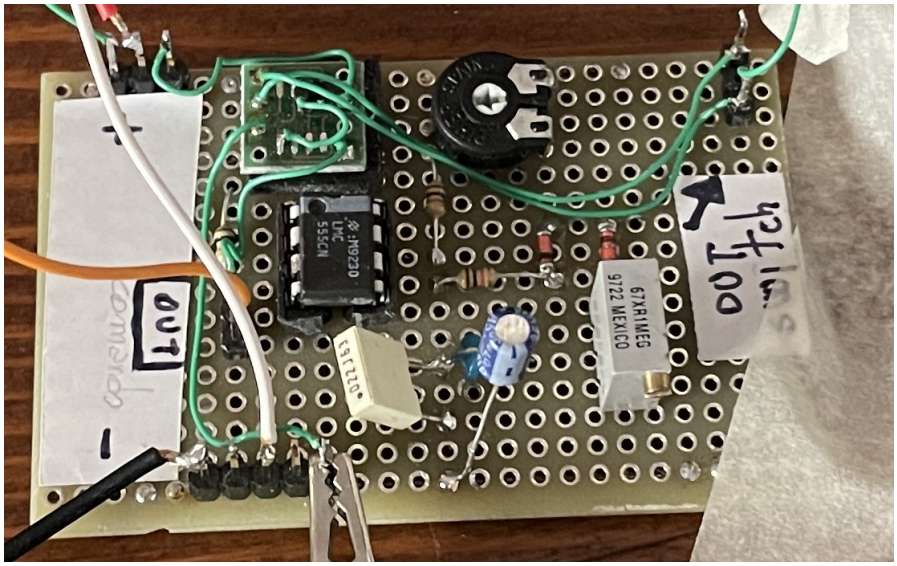


Figura 5.3: Circuito Timer realizzato su millefori

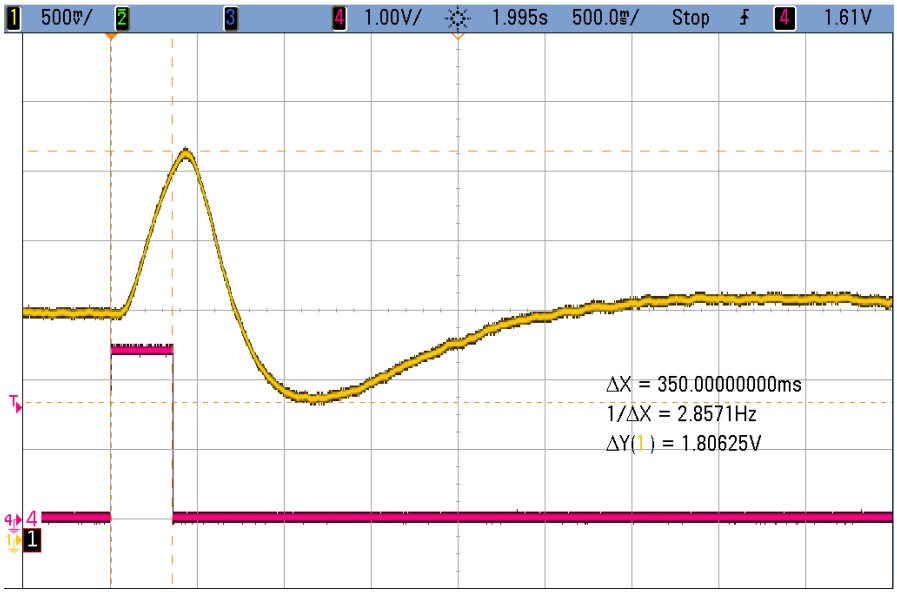


Figura 5.4: Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 20°C

effettuare il test, mantiene attivo il circuito eccitatore per almeno un secondo, facendo surriscaldare troppo la resistenza, creando così la necessità che questa si raffreddi. Come si può notare dalla Figura 5.5, in queste condizioni di test, con un tempo di stimolo dell'eccitatore pari a 350 ms, la risposta del DUT rimane invariata

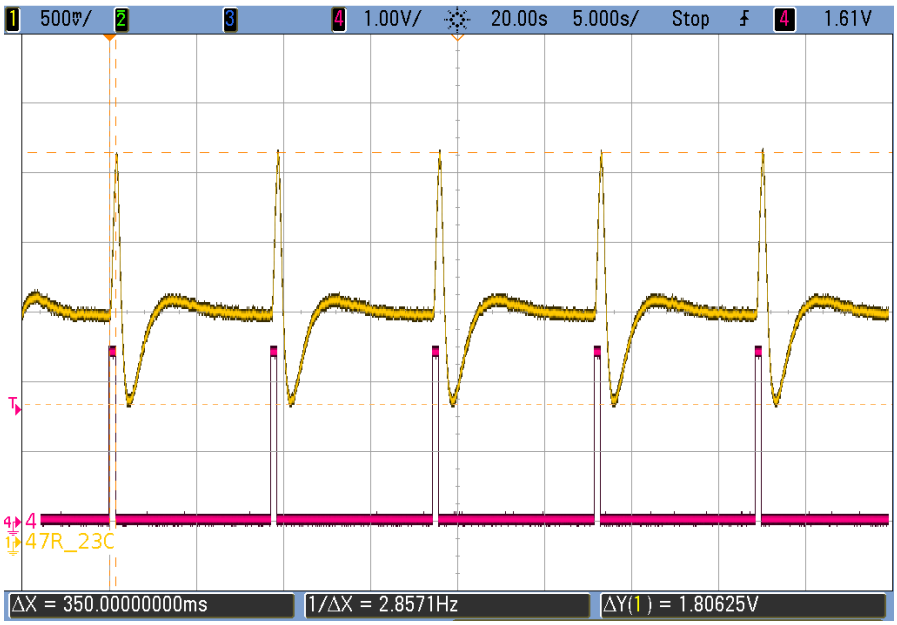


Figura 5.5: Risposta del PIR al treno di impulsi generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 20°C

per oltre 50 s. Questo stress test mette in risalto che, con una sollecitazione di 350 ms, il collaudo può essere eseguito correttamente, evitando i tempi di attesa dovuti al raffreddamento della resistenza.

Il test è stato inoltre svolto per un tempo di 500 s, e si è potuto constatare che il DUT risponde correttamente alla sollecitazione. Questo stress test è eccessivo e non rispecchia la condizione normale di collaudo. Questo significa che, sebbene le resistenze presentino i limiti teorici espressi nel capitolo precedente, la temperatura ambiente di 20 °C consente al piastrino eccitatore di ripristinare le condizioni iniziali di test in tempi sufficientemente rapidi da consentire un collaudo ripetitivo e automatizzabile. Il segnale di risposta del DUT presenta ampiezza costante, da impulso a impulso, pari a circa 1,8 V_{pp}, della durata di circa 2 s. Il segnale di risposta del DUT verrà confrontato con il segnale generato dal test eseguito alla temperatura di 33 °C.

La seconda fase del test prevede l'esecuzione delle medesime prove, svolte ad una temperatura di 33 °C, che è la massima temperatura che si può avere in estate nell'ambiente dove viene svolto il collaudo. Le Figure 5.6 e 5.7 mostrano la risposta del DUT alla sollecitazione al singolo impulso e al treno di impulsi della durata di 50 s. Come si può notare il DUT mantiene una risposta costante alla temperatura di 33 °C. Quello che si può anche notare è che il segnale di risposta del DUT è diminuito in ampiezza; infatti, alla temperatura di 33 °C si registra un valore di

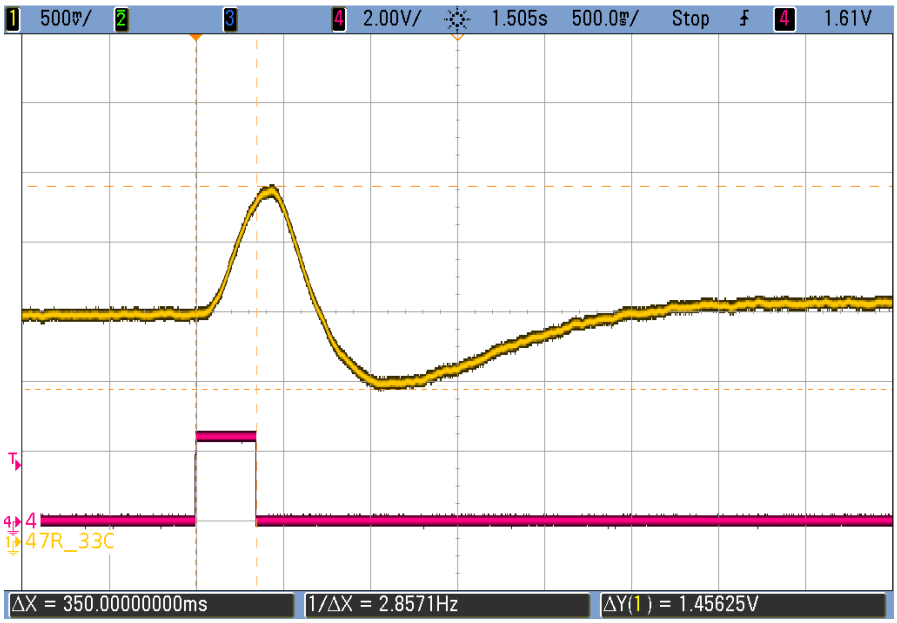


Figura 5.6: Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 33°C

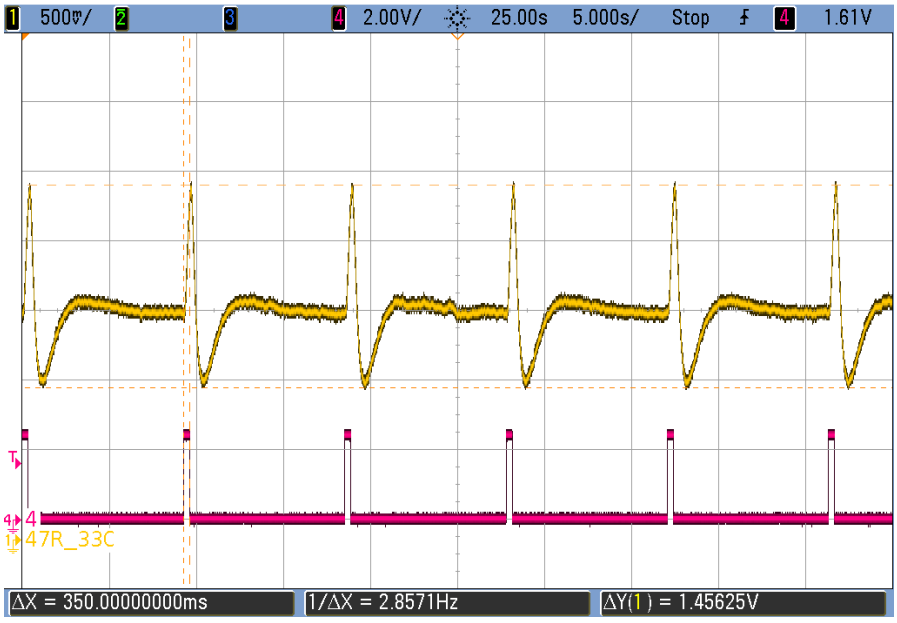


Figura 5.7: Risposta del DUT al treno di impulsi generato dall'eccitatore a resistenza alla temperatura di 33°C

ampiezza pari a circa $1{,}4\,V_{pp}$, mentre la durata del segnale rimane invariata, circa pari a 2 s. Le ragioni che stanno alla base di una dipendenza del segnale di risposta del PIR dalla temperatura di esercizio sono la combinazione di fattori meccanici, ottici ed elettrici.

Per analizzare le motivazioni che stanno alla base della variazione della risposta del DUT allo stimolo in funzione della temperatura, è stata acquisita un'immagine dalla termocamera per visionare l'emissione infrarossa dell'eccitatore a resistenza e la sua temperatura quando viene percorsa da corrente. La termocamera presenta il vantaggio di essere sensibile alle radiazioni con lunghezza d'onda superiore a $8\,\mu$m; pertanto, è in grado di mostrare la sollecitazione dal punto di vista del DUT. L'acquisizione effettuata è mostrata in Figura 5.8. Dall'acquisizione effettuata con

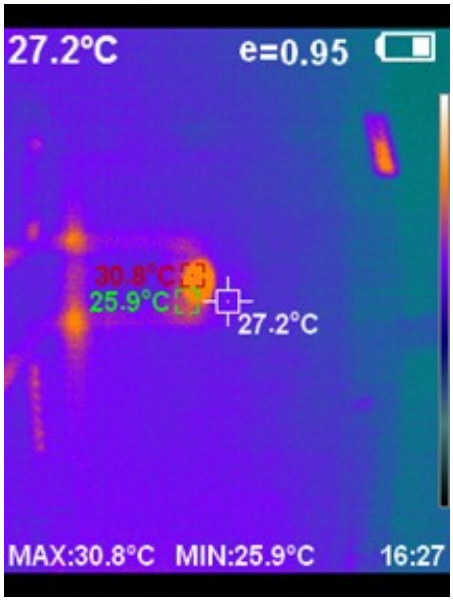


Figura 5.8: Immagine dell'eccitatore pir a resistenza acquisita con termocamera

termocamera si può notare un importante gradiente di temperatura che varia tra 25.9 °C, che rappresenta la temperatura dello sfondo, e 30.8 °C che è la massima temperatura raggiunta dalla resistenza. La lunghezza d'onda di picco dell'emissione infrarossa emessa dalla resistenza si può pertanto calcolare mediante la formula 5.1 (legge dello spostamento di Wien)

$$\lambda_{MAX} = \frac{k}{T} = \frac{3 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}}{303.15\,\mathrm{K}} = 9.87\,\mu\mathrm{m} \tag{5.1}$$

Con l'aumentare della temperatura ambiente, a parità di potenza radiata dalla resistenza, anche la temperatura finale raggiunta dalla resistenza si innalza della stessa quantità. Ipotizzando un innalzamento termico di 10 °C si può ipotizzare

che la temperatura finale raggiunta dalla resistenza sia di 40.8 °C. Calcolando la lunghezza d'onda del picco di emissione si ottiene:

$$\lambda_{\text{MAX}} = \frac{k}{T} = \frac{3 \cdot 10^{-3}\,\text{m} \cdot \text{K}}{313.15\,\text{K}} = 9.58\,\mu\text{m} \tag{5.2}$$

Non avendo a disposizione uno spettrometro si può procedere per ipotesi. Lo shift di lunghezza d'onda di picco della radiazione IR emessa dalla resistenza non dovrebbe influenzare in maniera tangibile il test in quanto si tratta di uno spostamento esiguo e inoltre rientra nella fascia di sensibilità del PIR. L'ipotesi maggiormente plausibile è che essendo la sorgente IR quasi puntiforme la sua radiazione non investe tutta la superficie sensibile di uno dei due elementi del piroelettrico, il quale rimanendo in parte esposto, può risentire della temperatura ambiente, riducendo così il delta di radiazione IR percepito dai due elementi piroelettrici del sensore. Questa prova evidenzia dunque una riduzione dell'ampiezza del segnale di risposta del DUT di circa il 20 % all'aumentare della temperatura ambiente. Questa tolleranza potrebbe comunque essere accettabile per determinare il funzionamento del DUT durante il collaudo, ma per rendere il processo più preciso e immune alla temperatura ambiente è necessario utilizzare un eccitatore PIR la cui radiazione termica sia il più possibile indipendente dalla temperatura. La Tabella 5.1 rappresenta i risultati dei test eseguiti alle due temperature.

Temperatura esecuzione test	Tensione di picco risposta del PIR
20 °C	1.8 Vpp
33 °C	1.4 Vpp

Tabella 5.1: Confronto della risposta al PIR al variare della temperatura ambiente

Nel prossimo capitolo vengono esposti i principi che stanno alla base dell'emissione infrarossa, con il fine di progettare un sistema non influenzato dalla temperatura.

5.2 Radiazione Termica e Rilevamento

Tutti i corpi caratterizzati da una temperatura superiore allo zero assoluto emettono energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. Lo spettro di emissione appare continuo e si osserva che al crescere della temperatura aumenta la potenza emessa e diminuisce il valore medio delle lunghezze d'onda contenute nello spettro di emissione. Lo spettro delle onde elettromagnetiche mostrato in Figura 5.9 viene suddiviso in base alla lunghezza d'onda λ. L'occhio umano è sensibile alle onde elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda è compresa tra 400 nm a circa 700 nm, questa fascia prende il nome di "banda del visibile". Le lunghezze d'onda più corte del visibile sono radiazioni ultraviolette, raggi X e raggi gamma. La regione al di sopra del visibile, con lunghezza d'onda compresa tra 700 nm e 1 mm, viene detta infrarosso e non è percepita dall'occhio umano. Non esistono suddivisioni assolute della regione infrarosso, ma la regione con λ da 700 nm a 1 μm è generalmente detta near infrared (NIR), la regione con $\lambda = (1-3)\,\mu$m è denominata short wave infrared (SWIR), la regione λ da 3 μm a 6 μm è denominata mid-wave infrared (MWIR) e la regione con $\lambda > 6\,\mu$m è denominata long wave infrared (LWIR) [11]. La radiazione termica, dovuta alla temperatura di un oggetto, include pertanto la radiazione infrarossa.

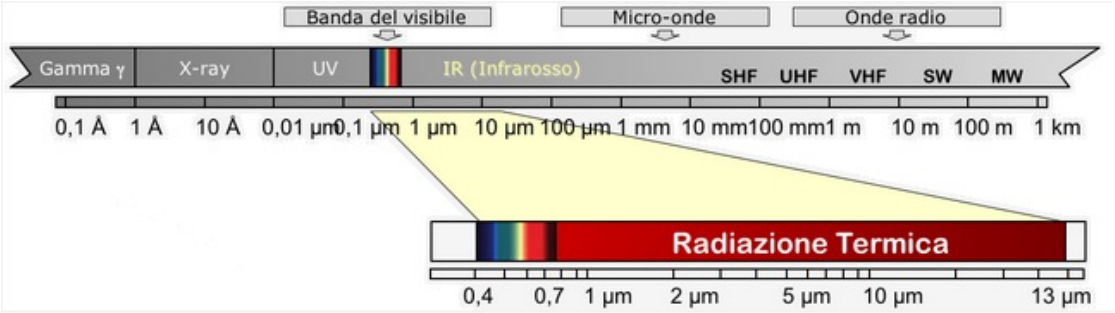


Figura 5.9: Spettro elettromagnetico

Per ricavare le leggi che descrivono l'emissione termica si fa riferimento al corpo nero. In fisica il corpo nero è un oggetto ideale in grado di assorbire completamente la radiazione elettromagnetica che lo colpisce, o alternativamente si può dire che il corpo nero non riflette la radiazione elettromagnetica che lo colpisce. La distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero è data dalla legge di Planck per la radiazione [12].

$$W_\lambda = 2\pi hc^2 \left[\lambda^5 \left(e^{\frac{ch}{\lambda kT}} - 1\right)\right]^{-1} \tag{5.3}$$

h è la costante di Planck (6.626×10^{-34} Js)
c è la velocità della luce (2.9979×10^{8} m/s)
λ è la lunghezza d'onda in metri
K è la costante di Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)
T è la temperatura assoluta in K

Il diagramma di radiazione del corpo nero può essere calcolato teoricamente e dipende unicamente dalla temperatura. La Figura 5.10 mostra il diagramma di radiazione del corpo nero per alcune temperature. W_λ (emissione spettrale) è la potenza ottica irradiata per unità di area della superficie emittente. Come si può osservare dal grafico mostrato in Figura 5.10, la lunghezza d'onda corrispondente al picco di emissione di ciascuna curva diviene sempre più piccola all'aumentare della temperatura. Questo andamento è confermato dalla legge dello spostamento

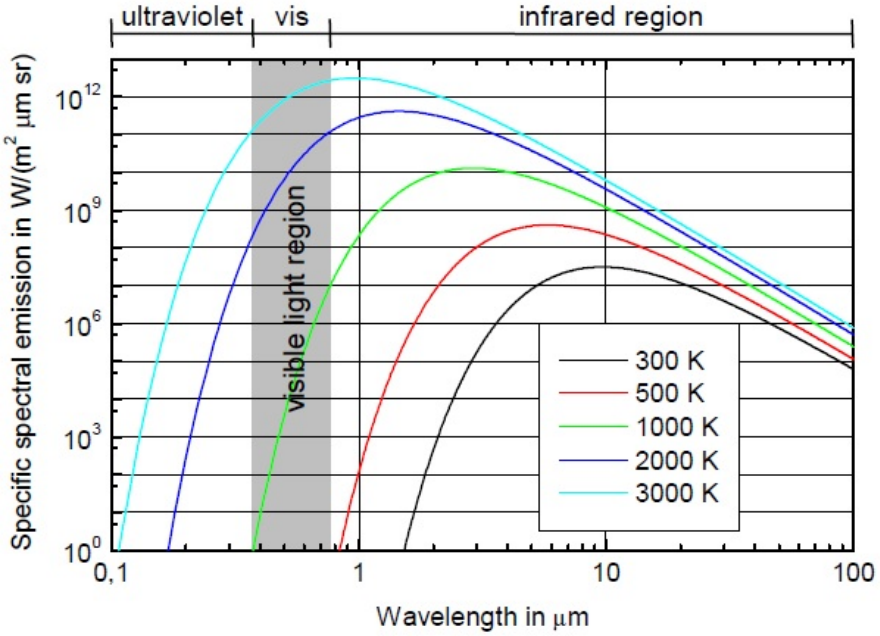


Figura 5.10: Diagramma di radiazione del corpo nero

di Wien, che consente di individuare la lunghezza d'onda della massima emissione radiativa del corpo nero a una determinata temperatura.

$$\lambda_{\mathrm{MAX}} \cdot T = k \tag{5.4}$$

k è una costante di valore $3 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{K}$.

La legge di Wien esprime il fatto che la lunghezza d'onda alla quale avviene il massimo dell'emissione della radiazione elettromagnetica è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta della sorgente. Un corpo a temperatura inferiore ai 50 °C come, ad esempio, il corpo umano emette radiazione con

$$\lambda_{\mathrm{MAX}} > \frac{3 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{K}}{323.15\,\mathrm{K}} = 9\,\mu\mathrm{m} \tag{5.5}$$

Il picco di emissione avviene nella regione LWIR. All'aumentare della temperatura lo spettro di emissione raggiunge la banda del visibile, ciò implica che un oggetto quando diventa incandescente emette radiazioni elettromagnetiche visibili (un esempio tipico è il filamento di tungsteno nelle lampadine, che raggiunge temperature fino a 3000 K). Per questo motivo la radiazione elettromagnetica emessa per effetto della temperatura elevata viene denominata "radiazione termica". Il grafico in Figura 5.11 mette in relazione la temperatura, la lunghezza d'onda e l'intensità di radiazione; all'aumentare della temperatura la lunghezza d'onda decresce mentre aumenta la radiazione emessa. Si pensi ad esempio a un corpo incandescente, a mano a mano che la temperatura sale il corpo diventa sempre più luminoso e la radiazione visibile emessa passa dal rosso al giallo fino ad arrivare al bianco.

Un corpo a temperatura simile a quella ambiente, invece, emette radiazione elettromagnetica nella regione infrarossa con un picco di potenza molto basso. Questo è il genere di radiazione che viene rilevata dai sensori di movimento con tecnologia PIR.

Nel prossimo capitolo viene analizzato un test setup eseguito da una casa produttrice di sensori PIR, per verificarne il funzionamento.

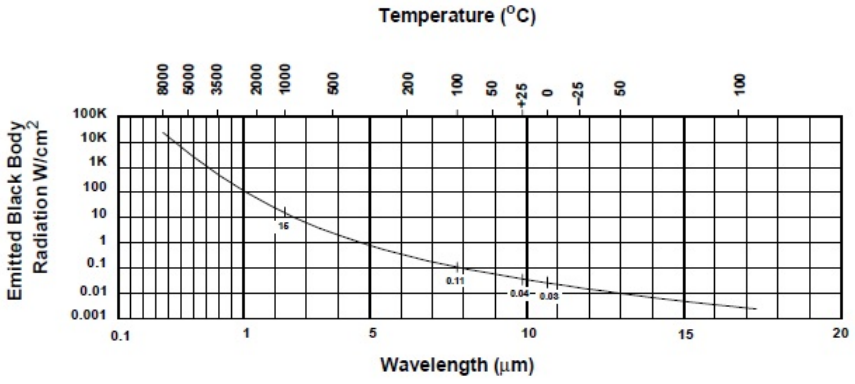


Figura 5.11: Temperatura di un oggetto rispetto alla lunghezza d'onda

5.3 Configurazione di Test Consigliata dal Produttore per PIR

I dati elettrici del dispositivo e la configurazione di test utilizzata sono illustrati nel diagramma a blocchi in Figura 5.12, come indicato nel datasheet [13]. L'analisi di questa configurazione di test può fornire spunti utili per la progettazione del sistema di collaudo. Il sistema di test in Figura 5.12 viene utilizzato per effettuare

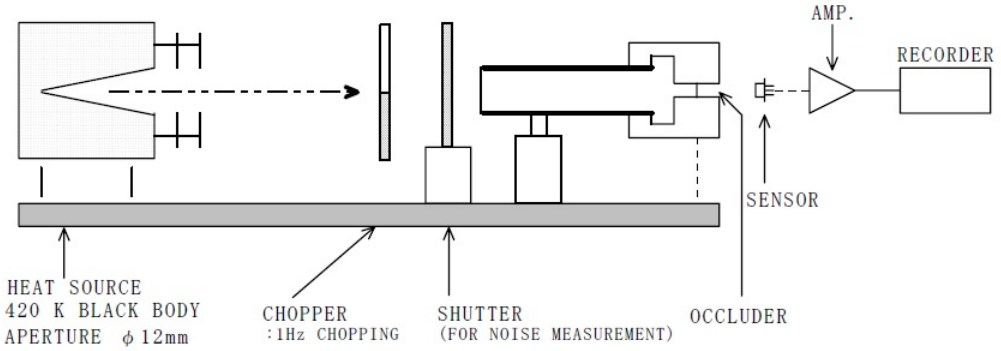


Figura 5.12: Configurazione di setup sensore PIR

i seguenti test:

1. **Test del segnale di uscita:** viene misurato il segnale in uscita dal sensore PIR (opportunamente amplificato) sottoposto ad una sollecitazione nota.

2. **Rumore in uscita:** viene misurato il rumore in uscita dal sensore PIR (opportunamente amplificato).

3. **Uscita bilanciata:** viene misurato il segnale di modo comune, generato quando entrambi gli elementi sensibili vengono investiti dalla stessa radiazione elettromagnetica.

Come sorgente per la radiazione infrarossa viene utilizzato un corpo nero, che si ricorda essere un sistema fisico in grado di emettere radiazioni elettromagnetiche a tutte le lunghezze d'onda, comportandosi di fatto come un radiatore ideale. Nel 1859 Kirchhoff dimostrò che si può ottenere un dispositivo che si comporta come un corpo nero mantenendo a temperatura costante le pareti di un contenitore cavo, nel quale sia praticata una piccola apertura. Una cavità radiante di questo tipo ha proprietà di emissione di radiazioni elettromagnetiche indipendenti dal materiale utilizzato per realizzarlo [14]. Nel dispositivo di test rappresentato in Figura 5.12 viene utilizzato un corpo nero mantenuto alla temperatura di 420 K, con un'apertura di diametro 12 mm. Il chopper serve per oscurare ciclicamente alla

frequenza di 1 Hz la sorgente luminosa. Il chopper è necessario poiché il sensore PIR è sensibile soltanto alle variazioni di emissione infrarossa; una sorgente che investe il sensore PIR con una radiazione termica costante non procura un eccitamento apprezzabile del sensore. Il segnale di uscita è il segnale che si misura all'uscita del circuito in determinate condizioni operative. Per essere considerato funzionante, il sensore PIR deve rispondere a una sollecitazione nota, con un segnale in uscita che superi un valore minimo indicato dalla casa costruttrice. Il segnale in uscita viene misurato con la frequenza di chopper di 1 Hz quando il sensore PIR è connesso a un amplificatore con guadagno pari a 72.5 dB (a 1 Hz) e sottoposto all'emissione dell'energia infrarossa di 13 μW/cm^2 emessa dal corpo nero a 420 K. L'occlusore in questa fase di test copre solamente l'elemento sensibile B del PIR, lasciando l'elemento sensibile A illuminato dalla radiazione infrarossa (Figura 5.13). In queste condizioni operative il segnale minimo in uscita rilevato deve essere pari a 2.0 V_{pp} (valore tipico 3.5 V_{pp}).

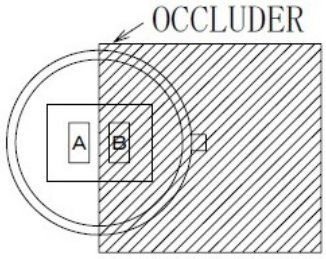


Figura 5.13: Configurazione per la misurazione del segnale in uscita

In assenza di sollecitazioni, il segnale di uscita del dispositivo PIR corrisponde al rumore generato dalle sue sorgenti interne. Il dispositivo PIR, per funzionare correttamente, deve presentare un rumore in uscita che sia al di sotto di un certo valore, specificato dalla casa madre. Per misurare il rumore in uscita, lo shutter copre entrambi gli elementi sensibili del PIR (Figura 5.14), impedendo che la radiazione termica li raggiunga.

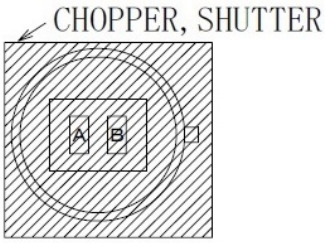


Figura 5.14: Configurazione per misurazione del rumore.

In questa configurazione il segnale che viene misurato in uscita è dovuto solamente al rumore elettrico del dispositivo. Un dispositivo che presenta un rumore in uscita al di sopra di una certa soglia è caratterizzato da un rapporto segnale-rumore troppo elevato; questo degrada le caratteristiche di rilevazione del dispositivo e la possibilità di trarre informazioni dal segnale in uscita. La misurazione del rumore avviene per 20 secondi, con il dispositivo PIR collegato all'amplificatore con guadagno pari a 72.5 dB (a 1 Hz) con entrambi gli elementi sensibili coperti dallo shutter, per isolarli dalla radiazione infrarossa (vedi Figura 5.14).

Il segnale di uscita bilanciata rappresenta il segnale generato quando la stessa radiazione infrarossa investe entrambi gli elementi sensibili del PIR. In queste condizioni, idealmente, il segnale di uscita dovrebbe essere nullo. Nella realtà tutti i processi produttivi sono sottoposti a delle tolleranze, questo fa sì che gli elementi sensibili del PIR non siano perfettamente identici, pertanto vi è una piccola percentuale di variazione nella risposta di un elemento sensibile rispetto all'altro alla medesima sollecitazione. Questo fa sì che quando entrambi gli elementi sensibili sono investiti dalla radiazione infrarossa, il segnale di uscita sia diverso da zero. Il segnale di uscita bilanciata viene misurato con l'occlusore posto in modo da non oscurare gli elementi sensibili del PIR (Figura 5.15), con la frequenza di chopper pari a 1 Hz e il PIR connesso all'amplificatore con gain pari a 72.5 dB (a 1 Hz) sottoposto all'emissione di energia infrarossa pari a 13 μW/cm^2 emessa dal corpo nero a 420 K.

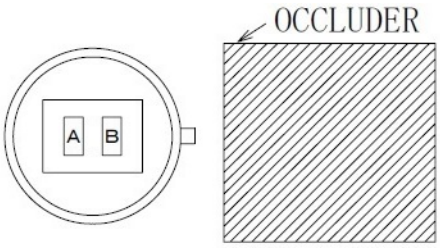


Figura 5.15: Posizione occlusore in modalità test uscita bilanciata

L'uscita bilanciata massima ammessa è pari al 10 %. Ovvero:

$$\frac{B_o}{|SA + SB|} \leq 0.10 \tag{5.6}$$

Dove:
B_o = Uscita bilanciata;
SA = Segnale di uscita sull'elemento A;
SB = Segnale di uscita sull'elemento B.

5.4 Risoluzione delle Problematiche del Radiatore IR a Resistenza

Dal test sperimentale descritto nel capitolo precedente è emersa la dipendenza dalla temperatura ambiente della risposta del DUT alla radiazione infrarossa emessa dall'emettitore a resistenza. In questo capitolo, si tenterà di fornire una spiegazione a questo fenomeno e di identificare una sorgente IR che produca risultati più affidabili e ripetibili durante i test del DUT. In particolare, quando la resistenza viene percorsa da corrente, si scalda ed emette radiazione infrarossa che dovrebbe essere convogliata esclusivamente su uno dei due elementi del PIR, mentre l'altro elemento, invece, viene colpito dalla radiazione infrarossa dell'ambiente circostante. Di conseguenza, il PIR genera un segnale elettrico proporzionale alla differenza tra le radiazioni infrarosse che investono i due elementi sensibili del PIR, che corrisponde alla differenza tra l'emissione infrarossa emessa dall'ambiente e la radiazione infrarossa emessa dalla resistenza percorsa da corrente. L'analisi sarà avviata considerando la legge dell'irraggiamento di Stefan-Boltzmann:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \cdot t \tag{5.7}$$

dove:
Q = quantità di energia trasmessa
ε = emittanza, valore che varia tra 0 e 1, (per corpo nero $= 1$)
σ = costante di Stefan-Boltzmann ($5.670374419 \times 10^{-8}\,\mathrm{W\ m^{-2}K^{-4}}$)
A = superficie del corpo
T = temperatura del corpo
t = tempo di irraggiamento

Il PIR misura la differenza di radiazione che incide sugli elementi sensibili del PIR stesso, pertanto dividendo la quantità di energia trasmessa per il tempo e per l'area che resta invariata si ottiene

$$\frac{Q}{A \cdot t} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{5.8}$$

Per cui la radiazione emessa dall'eccitatore dipende dalla quarta potenza della temperatura; dunque, per piccole variazioni di temperatura si hanno grandi variazioni di energia.

Si deduce quindi che se il corpo che irradia (in questo caso la resistenza) presenta un delta termico basso rispetto all'ambiente che la circonda può essere suscettibile

e influenzato dall'ambiente stesso, in quanto la differenza di energia misurata dagli elementi sensibili del PIR può diventare trascurabile. Inoltre, se la radiazione IR emessa non investe interamente uno dei due elementi sensibili, la differenza di radiazione rilevata dai due elementi sensibili viene a diminuire.

Teoricamente, andando ad aumentare la temperatura della resistenza si ottiene un irraggiamento maggiore. Si deduce che, aumentando la temperatura, la radiazione infrarossa diventa sempre meno influenzata dall'ambiente che la circonda. Questo significa che all'aumentare della temperatura il comportamento della resistenza, in teoria, può arrivare a simulare quello del corpo nero. Il principio sopra descritto può essere confermato analizzando lo spettro di emissione di una lampadina, che di fatto è una resistenza che, a causa del passaggio di corrente, diventa incandescente, e confrontarla con quella del corpo nero, come mostrato in Figura 5.16.

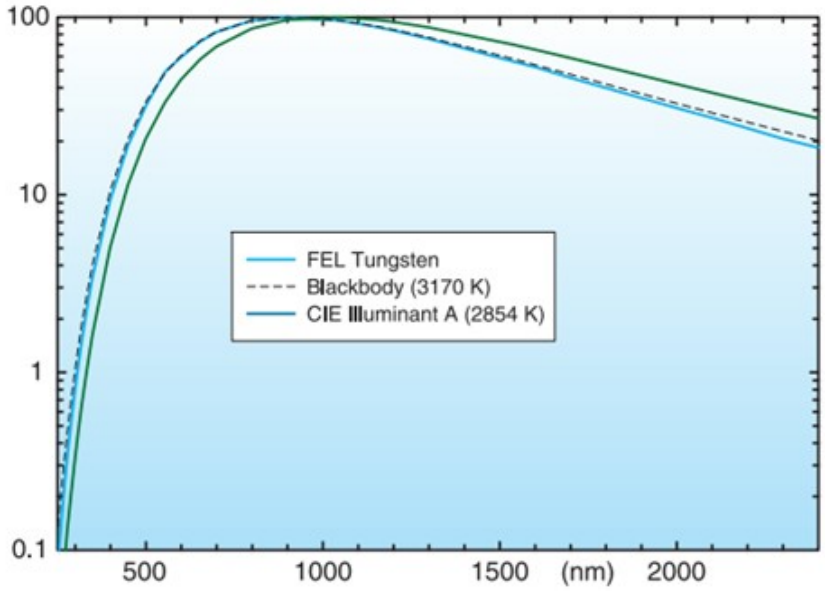


Figura 5.16: Spettro di emissione di una lampadina al tungsteno, confrontato con lo spettro di emissione di un corpo nero

Il comportamento della lampadina è del tutto sovrapponibile a quello del corpo nero [15], pertanto presenta un andamento ideale. Analizziamo ora la radiazione del corpo nero a diverse temperature mostrata in Figura 5.17: il diagramma non mostra lo spettro alla lunghezza d'onda di nostro interesse, ma pare che tutte le curve tendano a convergere; questo significa che alla lunghezza d'onda di nostro interesse il picco di emissione dipenda poco dalla temperatura del corpo radiante. Ciò significa che la potenza radiata dal resistore non è sufficiente, ed essendo praticamente una sorgente puntiforme, viene influenzata dalla temperatura ambiente.

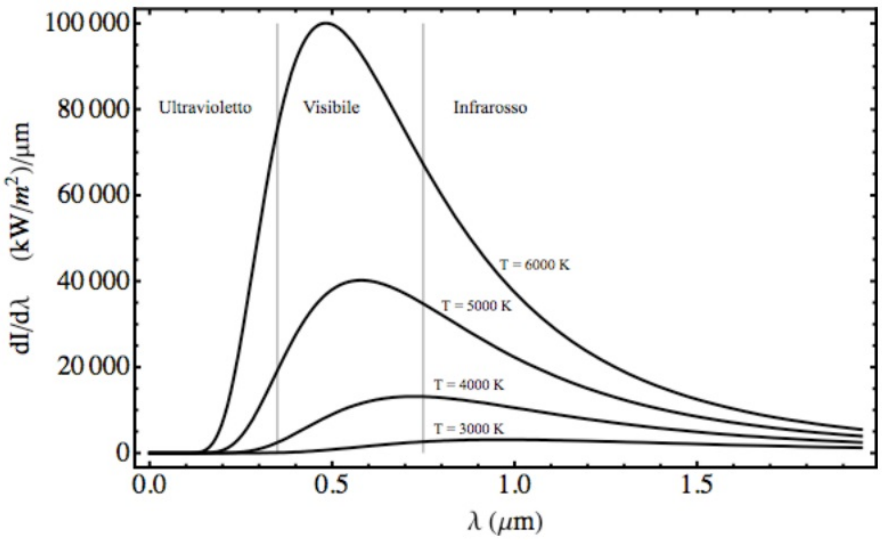


Figura 5.17: Diagramma di radiazione elettromagnetica di un corpo nero a diverse temperature

Per aumentare la temperatura bisogna passare ad un emettitore a incandescenza, come la lampadina. La lampadina si scalda ad una temperatura nettamente superiore alla resistenza; pertanto, la quantità di energia che investe il PIR è decisamente superiore a quella dell'ambiente e pertanto dovrebbe risentire meno delle variazioni di quest'ultima. In Figura 5.18 si può vedere un'immagine della lampadina accesa, scattata con la termocamera:

Si può facilmente notare che con la lampadina si crea un fascio di radiazione di sezione molto larga, che, se correttamente indirizzato otticamente può investire completamente uno dei due elementi sensibili del PIR, lasciando l'altro elemento esposto alla radiazione ambientale. Inoltre, è constatato che la temperatura ambiente può variare di circa 10° in funzione della stagionalità, quello che vede il PIR pertanto è la differenza tra la temperatura di sfondo che è compresa tra 20 °C e 30 °C e il fascio di luce che investe l'altro elemento del PIR, la cui radiazione infrarossa è molto forte rispetto a quella dell'ambiente di collaudo in quanto emessa ad una temperatura molto elevata. Questo fa sì che quando la lampadina viene accesa lo sbilanciamento tra i due elementi sensibili del PIR avviene comunque in quanto l'intensità della radiazione della lampadina è decisamente superiore a quella dell'ambiente. Nel caso della resistenza, invece, che raggiunge una temperatura massima di 40 °C, il delta termico non si discosta molto dalla temperatura ambiente. Oltretutto essendo la radiazione molto debole, non riesce a illuminare completamente la superficie dell'elemento sensibile del PIR. Quindi il "rumore di fondo" generato dall'emissione infrarossa a temperatura ambiente del macchinario

Figura 5.18: Immagine della lampadina scattata con termocamera

di collaudo diventa rilevante durante l'acquisizione. Queste supposizioni verranno confermate dai test svolti nel capitolo successivo utilizzando come sorgente IR una lampadina al posto della resistenza.

5.5 Analisi Sperimentale del Piastrino Eccitatore PIR a Lampadina

Al fine di ridurre la dipendenza della risposta del DUT allo stimolo si è pensato di cambiare l'eccitatore PIR, utilizzando un emettitore il cui spettro di emissione sia influenzato il meno possibile dalla temperatura. Le caratteristiche sopra indicate presuppongono che l'emettitore IR abbia uno spettro di emissione che non presenti uno shift alla lunghezza d'onda del picco di emissione nella zona spettrale di massima sensibilità del PIR, e che abbia una maggiore potenza radiante. Un buon emettitore infrarosso è la lampadina a filamento [15]. La lampadina, infatti, quando viene percorsa da corrente, riscalda il filamento di tungsteno che diventa incandescente e arriva a una temperatura di migliaia di gradi. Utilizzando una lampadina come sorgente IR, in teoria dovrebbe diminuire l'effetto della differenza di temperatura con l'ambiente, in quanto l'intensità della radiazione IR prodotta non viene influenzata dalla variazione di temperatura che può subire un ambiente climatizzato come quello in cui vengono svolti i test. Inoltre, essendo la lampadina incandescente, il picco di lunghezza d'onda della radiazione infrarossa sarà sicuramente inferiore e pertanto, alla lunghezza d'onda in cui è suscettibile il PIR, l'emettitore incandescente dovrebbe comportarsi come un corpo nero ideale, garantendo per un range di temperatura piuttosto vasto un comportamento sempre identico. Per verificare questa ipotesi è stato necessario eseguire dei test a banco e acquisire i segnali generati dal DUT in risposta alla sollecitazione.

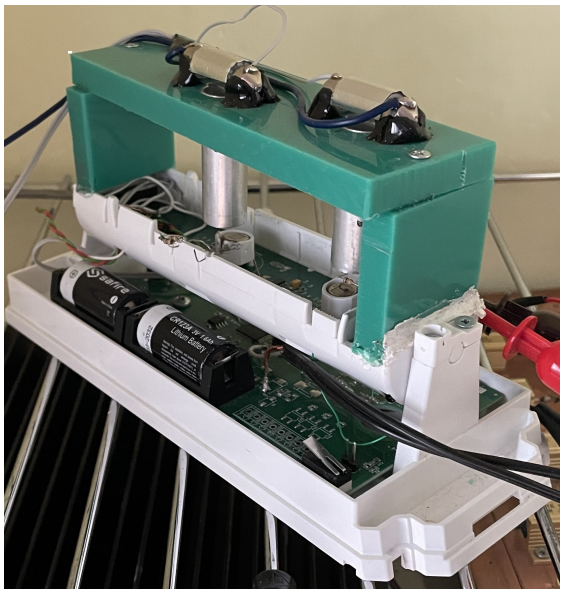


Figura 5.19: Prototipo emettitore IR a lampadina

Per svolgere questo test si è realizzato un prototipo di eccitatore PIR (mostrato in Figura 5.19) costituito da una lampadina a incandescenza a siluro da 12 V, 10 W, alimentata a 4.5 V_{dc}, posta alla distanza di 50 mm dal sensore IR. La lampada dispone di una guida di luce costituita da un tubetto avente un'apertura di 13 mm. Per sbilanciare il DUT con l'irraggiamento, il tubetto è posizionato su un lato della finestra del PIR in modo che il fascio di luce investa unicamente un elemento sensibile del PIR. I test sono stati svolti replicando le condizioni del test precedente, in una prima fase alla temperatura di 20 °C, successivamente alla temperatura di 33 °C.

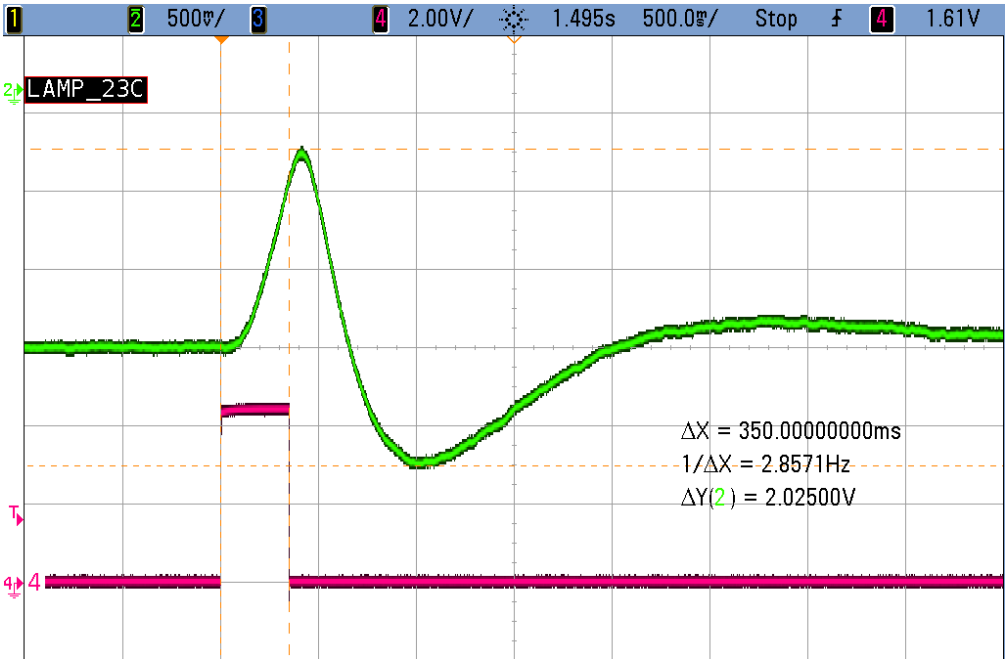


Figura 5.20: Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 20°C

Dalle acquisizioni mostrate nelle Figure 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 si evince che i segnali sono quasi perfettamente sovrapponibili. Non si apprezza infatti una variazione in ampiezza dovuta alla temperatura ambiente come invece succedeva con l'eccitatore a resistenza. Questo risultato permette di rendere il test ripetibile; inoltre le lampadine, che sono progettate per essere alimentate a 12 V_{dc}, emettono radiazione infrarossa sufficiente a stimolare il DUT anche se alimentate a 4,5 V_{dc}. Il vantaggio nell'impiego della lampadina sottoalimentata è la longevità del macchinario di collaudo. Lo schema di pilotaggio della lampada da implementare per il sistema di collaudo automatizzato è molto semplice ed è mostrato in Figura 5.24; consente il pilotaggio della lampadina tramite due piedini GPIO del microprocessore centrale

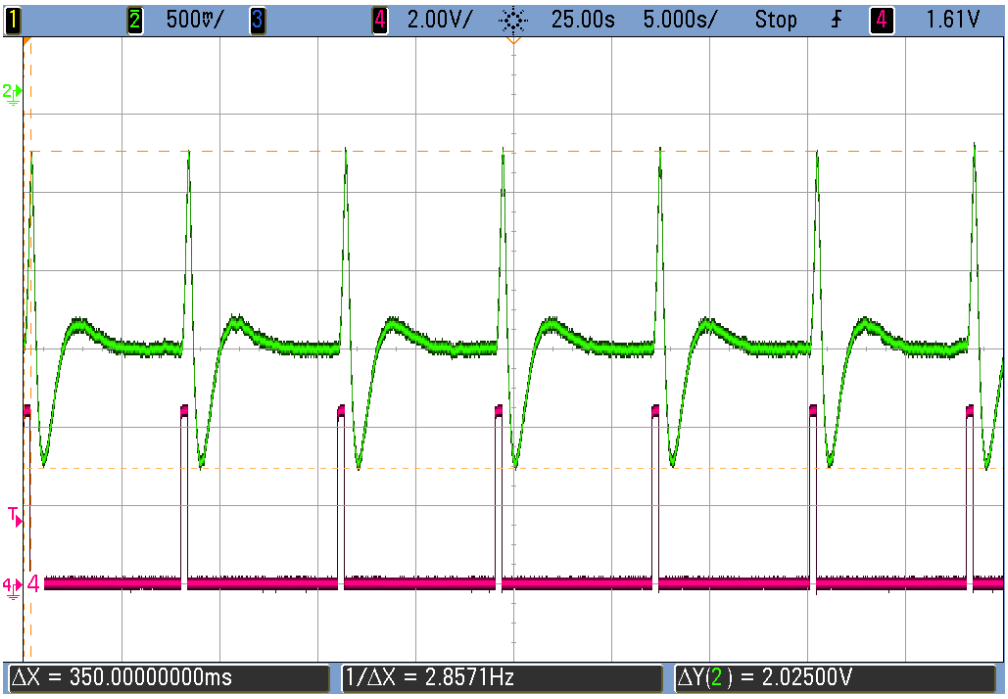


Figura 5.21: Risposta del DUT al treno di impulsi generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 20°C

del dispositivo di collaudo denominati `OUT_EP1` e `OUT_EP2`. Andando a variare la tensione di alimentazione $+V_{dc}$ si può modificare l'intensità della radiazione IR prodotta dalla lampadina e la potenza dissipata dalla stessa.

La Tabella 5.2 mostra i dati raccolti nei due test. Messi a confronto, si può constatare che la temperatura ambiente non influenza la risposta del PIR quando viene stimolato tramite la lampadina.

Temperatura esecuzione test	Tensione di picco risposta del PIR
20 °C	2,025 V_{pp}
33 °C	2,025 V_{pp}

Tabella 5.2: Confronto della risposta al PIR al variare della temperatura ambiente con eccitatore a lampadina

In sintesi, la fase sperimentale iniziale di questa ricerca ha messo in luce le criticità intrinseche all'impiego di un radiatore infrarosso a resistenza per la stimolazione dei sensori PIR in contesti di collaudo. La marcata dipendenza della risposta del dispositivo sotto test dalle fluttuazioni della temperatura ambientale

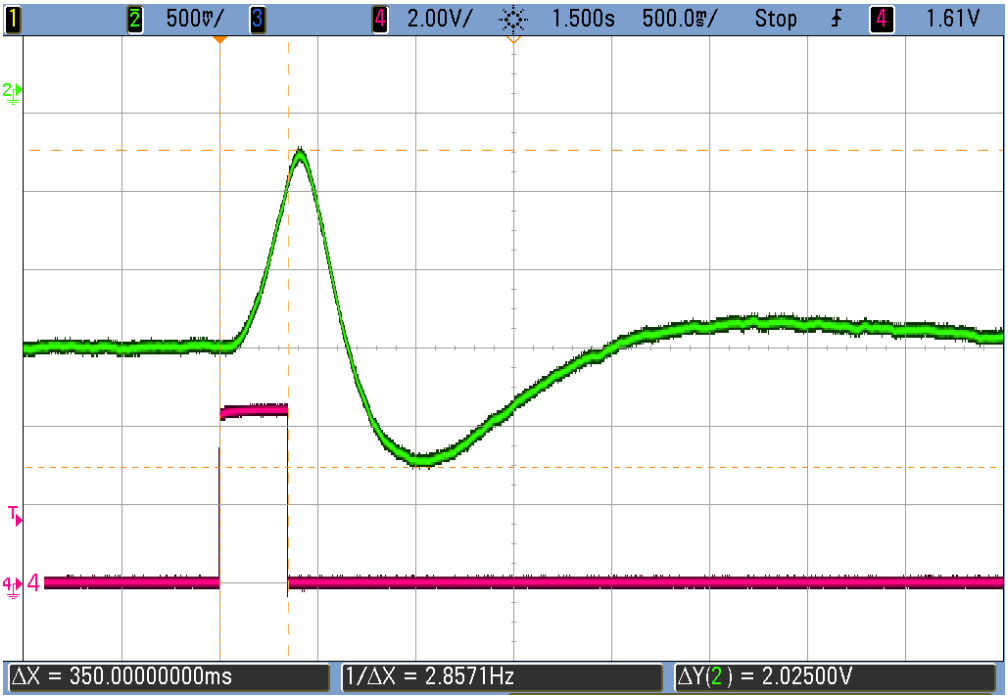


Figura 5.22: Risposta del DUT al singolo impulso generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 33°C

ha rappresentato un ostacolo significativo all'ottenimento di misurazioni affidabili e ripetibili, inficiando la validità delle procedure di verifica.

L'implementazione e l'analisi di un prototipo di sollecitatore PIR basato su una lampadina a incandescenza hanno offerto una soluzione promettente a tali problematiche. I risultati sperimentali ottenuti con questa nuova sorgente di radiazione infrarossa hanno dimostrato una notevole stabilità nella risposta del sensore PIR in presenza di variazioni della temperatura ambiente. Le acquisizioni condotte a 20 °C e 33 °C hanno evidenziato segnali di risposta del DUT caratterizzati da un'ampiezza pressoché costante, in netto contrasto con la variabilità osservata impiegando il radiatore a resistenza.

Questa insensibilità alle variazioni termiche esterne, unitamente alla semplicità di controllo tramite un microcontrollore, conferisce all'eccitatore a lampadina le caratteristiche ideali per l'implementazione di un sistema di collaudo automatizzato, in grado di garantire elevati livelli di affidabilità e ripetibilità nella valutazione dei sensori PIR. La capacità di ottenere risposte stabili e indipendenti dalle condizioni ambientali rappresenta un avanzamento significativo verso procedure di collaudo più robuste e accurate.

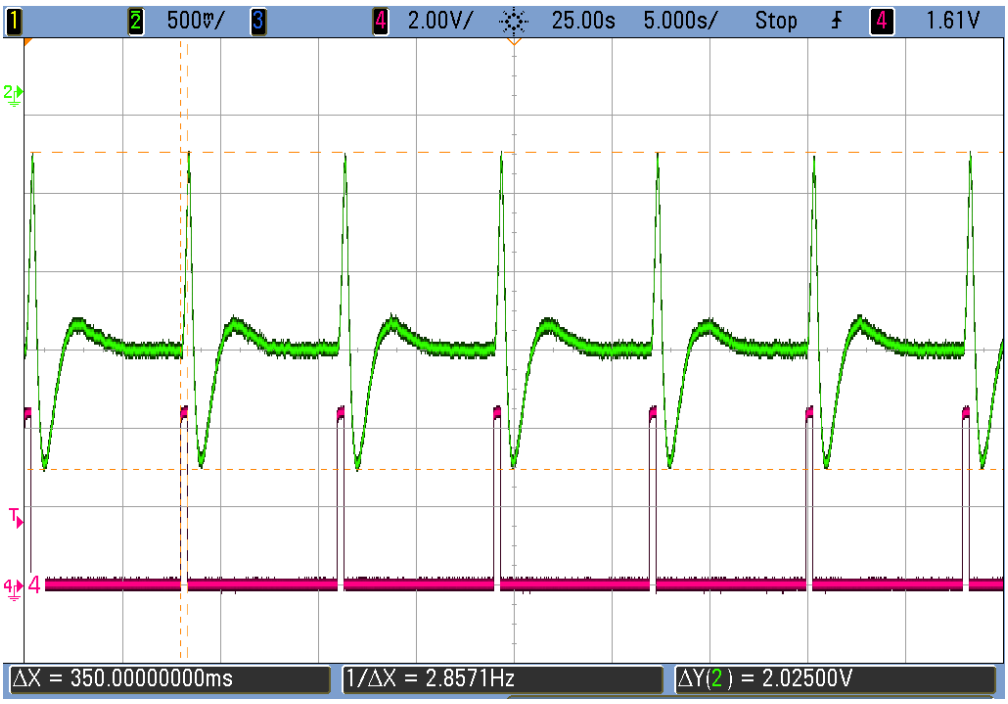


Figura 5.23: Risposta del DUT al treno di impulsi generato dall'eccitatore a lampadina alla temperatura di 33°C

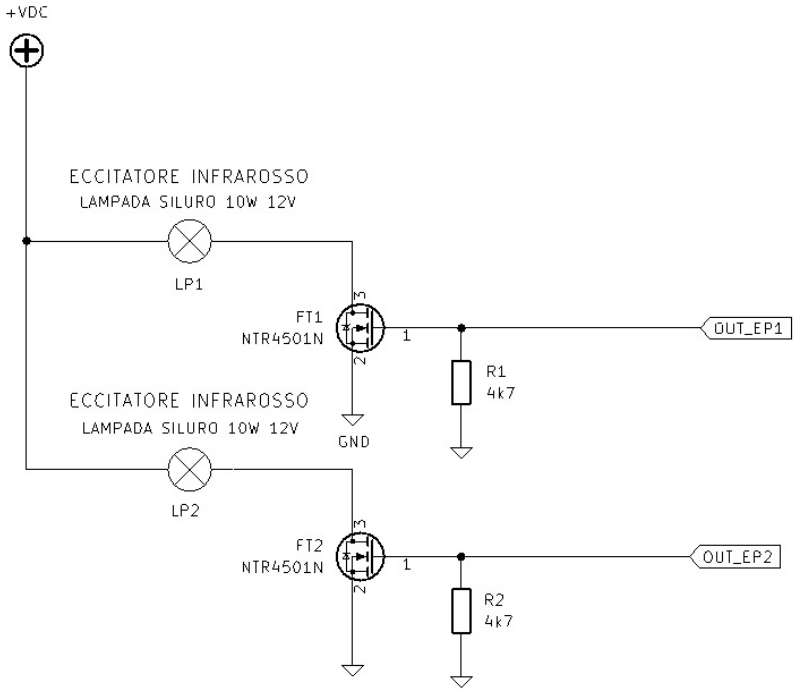


Figura 5.24: Schema base eccitatore PIR

Capitolo 6

Collaudo del Sensore Microonde

Come anticipato nel Capitolo 3.3, l'attuale procedura di collaudo del modulo MW si basa su una stimolazione manuale del sensore a microonde. In pratica, un operatore esegue un movimento con un arto nelle vicinanze del sensore, osservando contestualmente la risposta prodotta dal DUT visualizzata su un monitor. Questa metodologia, soggetta alla variabilità dell'azione umana, presenta diverse limitazioni significative che compromettono l'efficacia e l'affidabilità del processo di verifica. In primo luogo, l'impossibilità di generare uno stimolo di movimento perfettamente ripetibile nel tempo rende difficile stabilire criteri di accettazione oggettivi e misurabili. Ogni sollecitazione manuale è unica, introducendo un'incertezza intrinseca nei risultati del collaudo.

Inoltre, il collaudo viene eseguito direttamente nell'ambiente produttivo, un contesto notoriamente ricco di interferenze e disturbi elettromagnetici e fisici. La presenza di personale in movimento all'interno del reparto, l'attivazione di macchinari e altre sorgenti di disturbo ambientale possono indurre segnali spuri nel DUT, mascherando o alterando la sua risposta alla sollecitazione desiderata. Per simulare in modo semplificato questa problematica a livello di laboratorio, è stato condotto un test ponendo il DUT su un banco di lavoro e acquisendo il segnale generato dal semplice movimento di oggetti o persone nelle immediate vicinanze. Come chiaramente illustrato nella Figura 6.1, il disturbo captato dal sensore in queste condizioni ambientali non controllate raggiunge un'ampiezza massima di circa 2.6 V. Considerando che il segnale utile del DUT presenta una dinamica operativa limitata tra 0 V e 3.3 V, l'entità del rumore ambientale si configura come una seria criticità, rendendo estremamente ardua la distinzione tra la reale risposta del sensore alla sollecitazione e le fluttuazioni indotte dall'ambiente circostante. Questa elevata suscettibilità ai disturbi esterni inficia significativamente

l'accuratezza e l'oggettività del collaudo manuale del modulo MW.

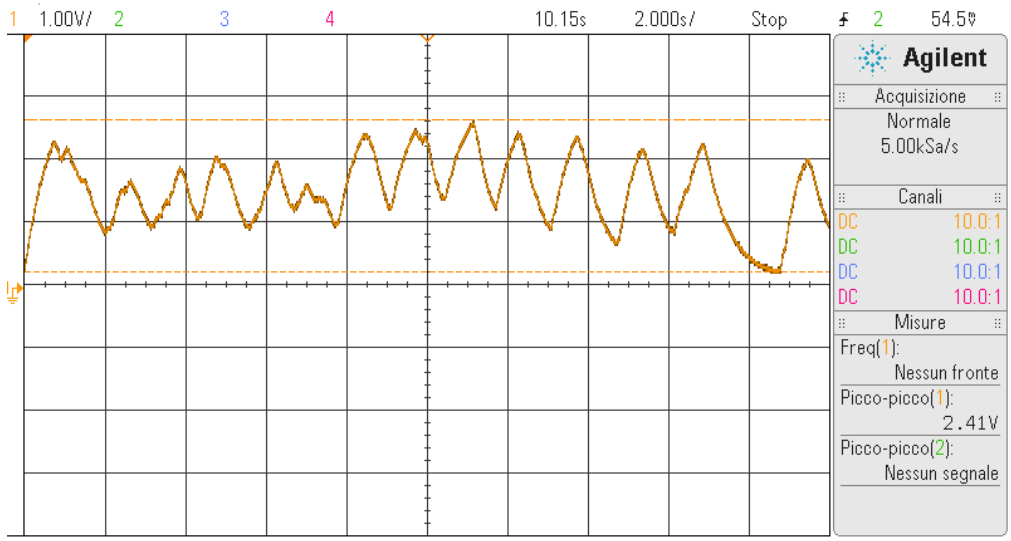


Figura 6.1: Segnale generato dal movimento di persone nei pressi del DUT.

Inoltre, il sistema di collaudo attuale non consente di analizzare un insieme di parametri fondamentali per garantire il funzionamento del sistema, quali guadagno del sistema e banda passante.

6.1 Configurazione di Test Consigliata dal Produttore per il Sensore a Microonde

Per la verifica iniziale del funzionamento del sensore a microonde IPM-365, come suggerito dal produttore nell'Application Note [16], è necessario seguire la configurazione di test illustrata in Figura 6.1, che prevede l'alimentazione del modulo a 3 V e il collegamento dell'uscita del modulo a un amplificatore a bassa frequenza con un guadagno di almeno 60 dB, prima di visualizzare il segnale su un oscilloscopio con una sensibilità di almeno 50 mV/divisione.

Per stimolare la microonda il costruttore suggerisce di muovere la mano ad una distanza che varia da 60 cm ad 1 m, a seconda del guadagno dell'amplificatore, per poter apprezzare sull'oscilloscopio un segnale sinusoidale con frequenza non costante. Per un'analisi più dettagliata e professionale, viene suggerito di utilizzare un simulatore di Doppler (IDS-208), che è in grado di simulare un oggetto in movimento monotono (ripetitivo) in una direzione. Prendendo spunto da questo test setup si realizzerà un sistema a banco in grado di testare il sistema in modo automatico e ripetitivo.

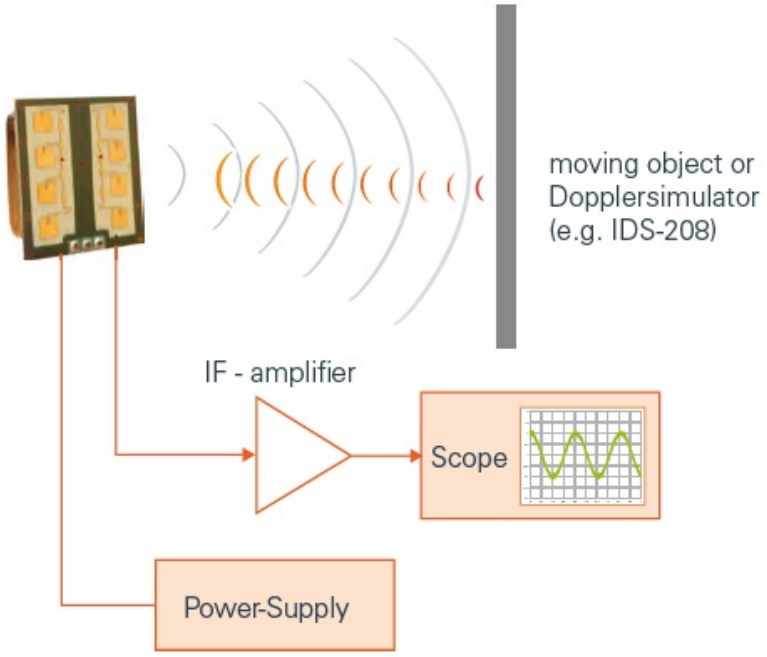


Figura 6.2: Test setup MW previsto dal costruttore

6.2 Isolamento Sensore Microonde da Rumore Esterno

Il primo problema da affrontare è trovare un modo efficace per isolare il sensore microonda dai disturbi esterni. Questo problema può trovare soluzione con l'esecuzione del test all'interno di un ambiente privo di disturbi e di riflessioni, come ad esempio una camera anecoica. Il termine anecoico significa privo di eco; la camera anecoica è particolarmente utilizzata nelle applicazioni che presentano la necessità di ricreare in un ambiente chiuso condizioni simulate di spazio aperto di dimensione infinita, come conseguenza dell'assenza di riflessioni per effettuare misurazioni. Ovviamente non è possibile spostare il collaudo del sensore microonda all'interno di una camera anecoica, ma si può ricreare una piccola cella anecoica che ospiti il sensore microonda oggetto di test in modo da isolarlo completamente dall'ambiente esterno. La camera anecoica è interamente rivestita al suo interno da un materiale in grado di assorbire le onde elettromagnetiche incidenti; di solito si tratta di poliuretano espanso, caricato con materiali conduttivi quali ferro e/o carbonio. Il rivestimento di una camera anecoica è mostrato in Figura 6.3. La caratteristica forma a cono del poliuretano espanso serve a migliorare l'assorbimento delle onde elettromagnetiche. L'esterno di una camera anecoica è caratterizzato da un'alta conducibilità elettrica al fine di schermare i campi elettrici provenienti dall'esterno

secondo il principio della gabbia di Faraday.

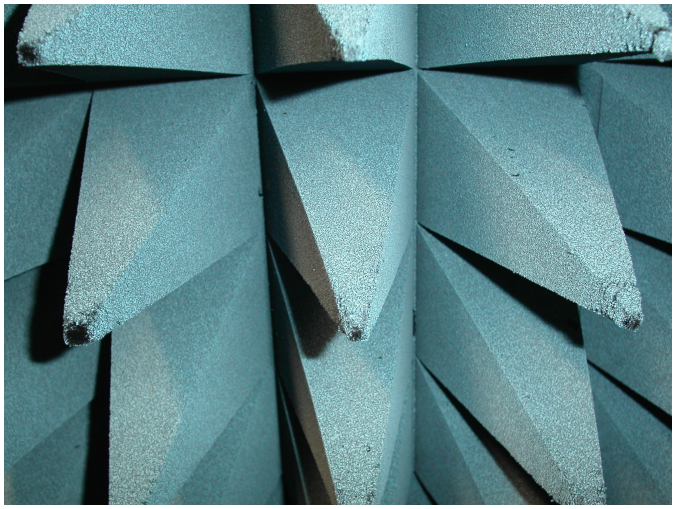


Figura 6.3: Poliuretano espanso a forma di cono presente all'interno delle pareti di una camera anecoica

Per isolare il sensore microonda del DUT è stata realizzata una piccola cella anecoica a forma di cubo vuoto, realizzata in stampa 3D. La cella è stata successivamente rivestita internamente ed esternamente con materiale adesivo conduttivo. Infine, sono stati applicati due strati di poliuretano espanso caricato a carbone sulla superficie interna ed esterna della cella anecoica. In Figura 6.4 vi è una fotografia della cella anecoica realizzata.

Per verificare l'efficacia isolante della cella anecoica realizzata, sono state eseguite delle prove a banco dalle quali si è potuto constatare che il sensore microonda, racchiuso nella piccola camera anecoica creata, non risentisse dei disturbi esterni generati dal movimento. In Figura 6.5 si può analizzare l'acquisizione da oscilloscopio dell'effetto schermante della cella anecoica realizzata. La prova a banco è stata effettuata nelle medesime condizioni di disturbo ambientale della prova precedente, ma con il DUT protetto dalla cella anecoica. Il risultato è un segnale quasi completamente privo di sollecitazioni, con un disturbo il cui valore massimo arriva a circa 200 mV.

Figura 6.4: Cella anecoica realizzata per l'isolamento del sensore microonda vista dal basso.

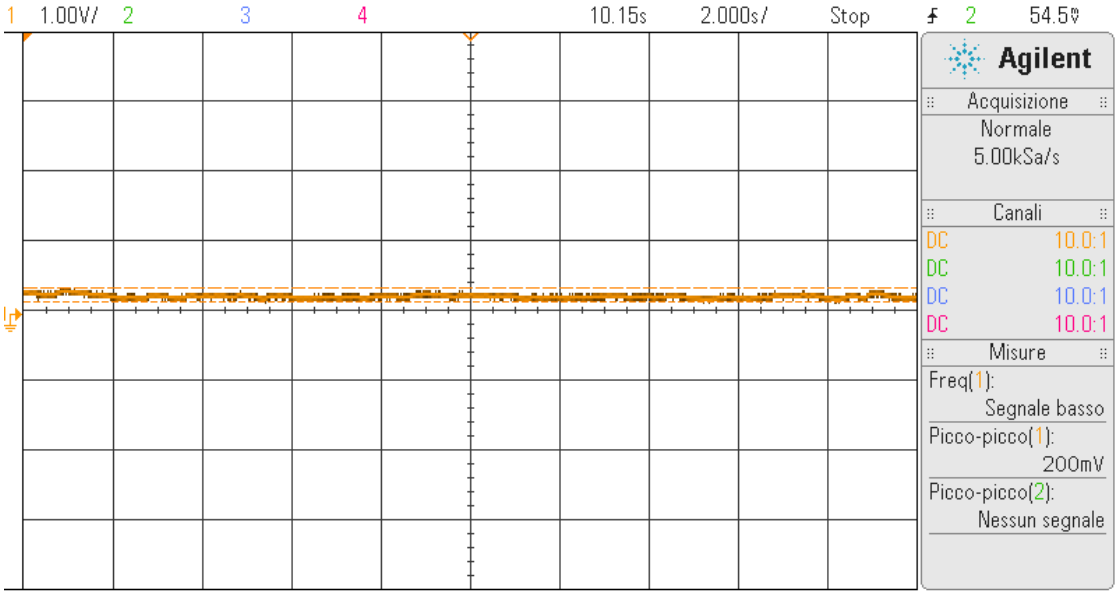


Figura 6.5: Sollecitazione esterne con MW coperta da cella anecoica realizzata

6.3 Trasduttore per Stimolazione Sensore Microonda

Dopo aver risolto il problema dell'isolamento del sensore microonda, si è passati alla ricerca di un trasduttore utile alla sollecitazione della microonda. Per sollecitare il sensore microonda è necessario utilizzare un oggetto che, stimolato da un segnale elettrico, sia in grado di muoversi longitudinalmente all'antenna del sensore in modo controllato. Il produttore del sensore microonda, InnoSenT, mette a disposizione diversi Application Note, dai quali emerge che per testare questo tipo di sensori è possibile procedere o con il movimento della mano a circa 60 cm − 1 m dal sensore, oppure utilizzare un trasduttore professionale come il simulatore doppler IDS-208 o un qualsiasi trasduttore in grado di effettuare movimenti controllati longitudinali al sensore, come ad esempio una ventola che gira. In alcuni Application Note della InnoSenT, dove viene affrontato il tema del testing del sensore microonda IPM-365 utilizzando un generico altoparlante [17], come mostrato in Figura 6.6, dove viene rappresentato un estratto dell'Application Note in questione.

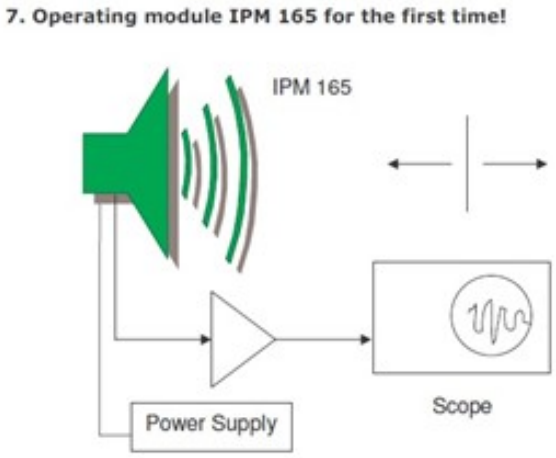


Figura 6.6: Estratto dall' InnoSentT Application Note III dove viene rappresentato come stimolatore del sensore microonda un altoparlante generico

L'altoparlante può simulare efficacemente l'effetto Doppler, in quanto la sua stimolazione consente di ottenere un movimento controllato, utile ai fini del test. Come mostrato in Figura 6.7, gli elementi mobili di un altoparlante, principalmente costituiti dal cono e dalla bobina mobile, svolgono un ruolo cruciale nella generazione dello stimolo. Entrambi questi componenti possono infatti fornire una superficie riflettente mobile per le microonde. Stimolando l'altoparlante con un segnale elettrico, si induce un'oscillazione della membrana, la cui frequenza corrisponde a

quella del segnale di eccitazione. In teoria, l'utilizzo dell'altoparlante permette di eseguire un test quantitativo per misurare parametri quali la sensibilità effettiva del sensore IPM-365, il guadagno e la larghezza di banda del circuito di amplificazione. Si potrebbe, ad esempio, impiegare un sensore di riferimento, stimolarlo con l'altoparlante, e definire i dati ottenuti come valori limite entro i quali le prestazioni di tutti i sensori in fase di test devono rientrare.

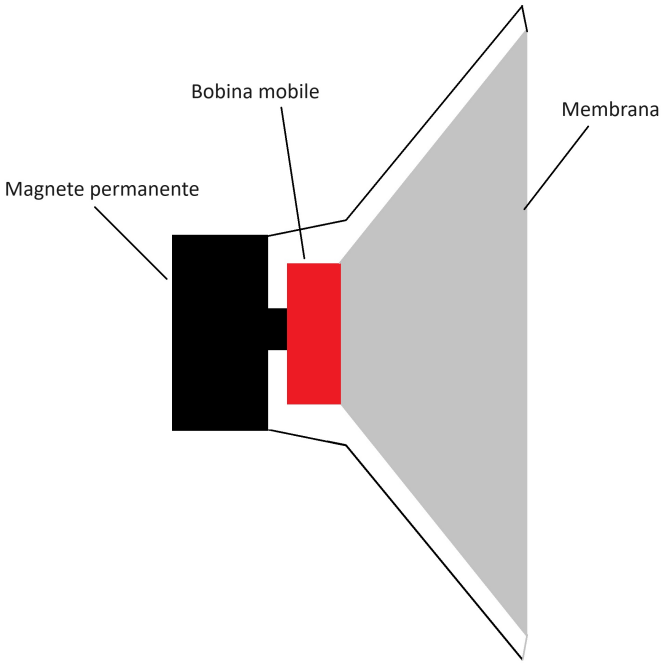


Figura 6.7: Vista laterale di un altoparlante con indicati i principali componenti

Per convalidare questa ipotesi, è stata condotta una prova sperimentale utilizzando un altoparlante standard con le seguenti caratteristiche: diametro di 40 mm, potenza massima di 250 mW e impedenza di 20 Ω. L'altoparlante è stato posizionato a una distanza di circa 5 cm dal DUT, orientato in modo che la membrana vibrasse perpendicolarmente all'antenna del modulo a microonde. Questa configurazione consente di massimizzare la sensibilità di ricezione, dato che la frequenza Doppler è proporzionale al coseno dell'angolo α, dove α rappresenta l'angolo formato tra la direzione del movimento del target e la linea di congiunzione tra il target e il sensore a microonde.

$$f_{\text{doppler}} = 2 f_{mw} \frac{v}{c} \cos \alpha \tag{6.1}$$

$$f_{mw} = 24.125 \times 10^9 \text{ Hz}$$
$$v = \text{velocità del corpo in movimento in m/s}$$
$$c = \text{velocità della luce } \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Nella prova sperimentale, l'altoparlante è stato pilotato da un generatore di funzioni per studiarne gli effetti tramite un oscilloscopio. L'oscilloscopio è stato configurato per visualizzare simultaneamente il segnale di pilotaggio dell'altoparlante e il segnale in ingresso all'ADC del microcontrollore del DUT. Questa configurazione ha permesso di analizzare l'impatto del movimento dell'altoparlante sul segnale generato dal modulo a microonde e di valutare la risposta complessiva del sistema, comprendente la rete di amplificazione e filtraggio del segnale, come illustrato in Figura 6.8.

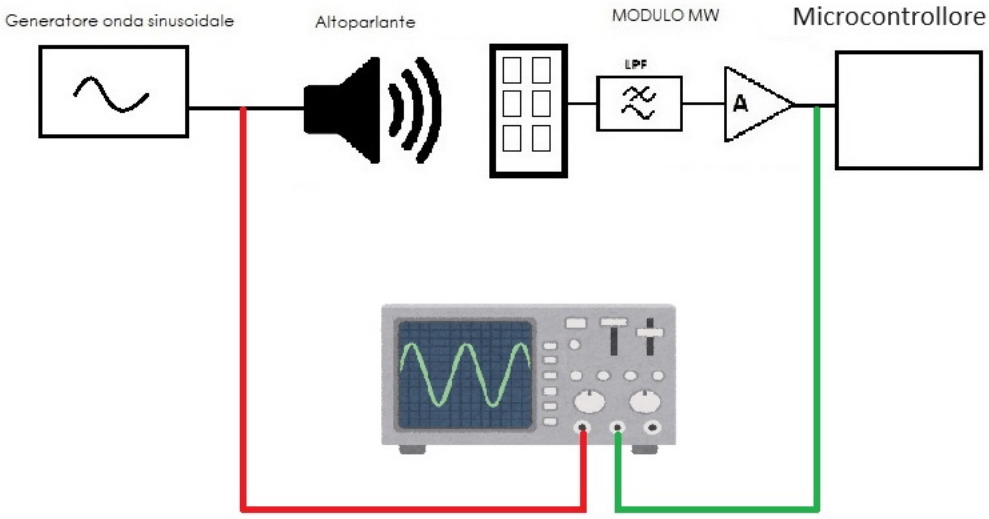


Figura 6.8: Diagramma a blocchi test modulo MW realizzato tramite altoparlante

In questo test sono state effettuate molteplici prove per vedere gli effetti che ha lo stimolo dell'altoparlante sul sensore MW. Per pilotare l'altoparlante si è utilizzato un segnale sinusoidale la cui frequenza rientrasse nel range di frequenze di funzionamento del DUT, che è dichiarato essere suscettibile agli stimoli con frequenza compresa tra 20 Hz e 60 Hz, con un picco di guadagno a 40 Hz. La prima prova effettuata consiste nel verificare la reazione del sensore MW allo stimolo generato dall'altoparlante e tarare l'ampiezza del segnale in ingresso all'altoparlante per ottenere la massima dinamica senza però eccedere e mandare in saturazione il sistema. Il generatore d'onda è stato dunque impostato per generare una sinusoide

con frequenza 40 Hz e di ampiezza ricavata per tentativi per avere una risposta del DUT appena al di sotto della dinamica dei 3.3 V. Il risultato della taratura si può analizzare in Figura 6.9. Come si evince dalla Figura 6.9 il segnale da applicare all'altoparlante per generare la massima risposta del DUT ha ampiezza 290 mV e frequenza pari a 40 Hz. Andando a modificare le frequenze del segnale, si può ricavare sperimentalmente la banda passante del DUT, andando ad aumentare e diminuire la frequenza del segnale sino a ottenere in uscita un segnale di ampiezza pari al 70% circa di 3 V, ovvero circa 2,1 V. Dalle Figure 6.11 e 6.10 si evince che la banda passante a -3 dB è costituita dalle frequenze $f_{\min} = 19$ Hz ed $f_{\max} = 65$ Hz.

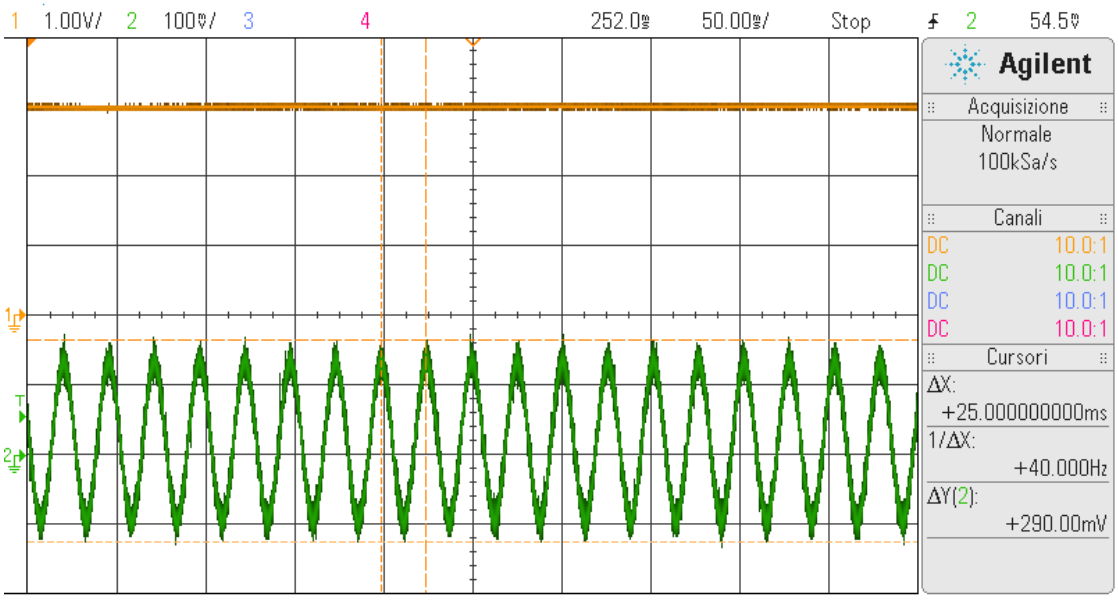


Figura 6.9: Acquisizione con oscilloscopio, in verde il segnale di stimolo dell'altoparlante in giallo il segnale in ingresso all'ADC del microcontrollore

Per comprendere meglio la risposta del DUT allo stimolo dell'altoparlante, si è effettuata un'acquisizione con l'oscilloscopio del segnale generato dal DUT in risposta a un segnale di stimolo dell'altoparlante modulato in frequenza. In particolare, impostando il generatore d'onda in modalità swipe, viene generata un'onda sinusoidale con la frequenza che varia da 15 Hz a 100 Hz circa. Il risultato è apprezzabile in Figura 6.12.

I risultati del test effettuato sono riassunti nella Tabella 6.1. Ciò che si evince da questo test è che stimolando l'altoparlante con un segnale di ampiezza 290 mV si ottiene una risposta del sensore MW costituita da un segnale continuo, la cui ampiezza varia a seconda della frequenza.

Eseguendo il test di collaudo descritto sopra si può dunque effettuare una valutazione più approfondita e automatizzata del funzionamento del sensore MW.

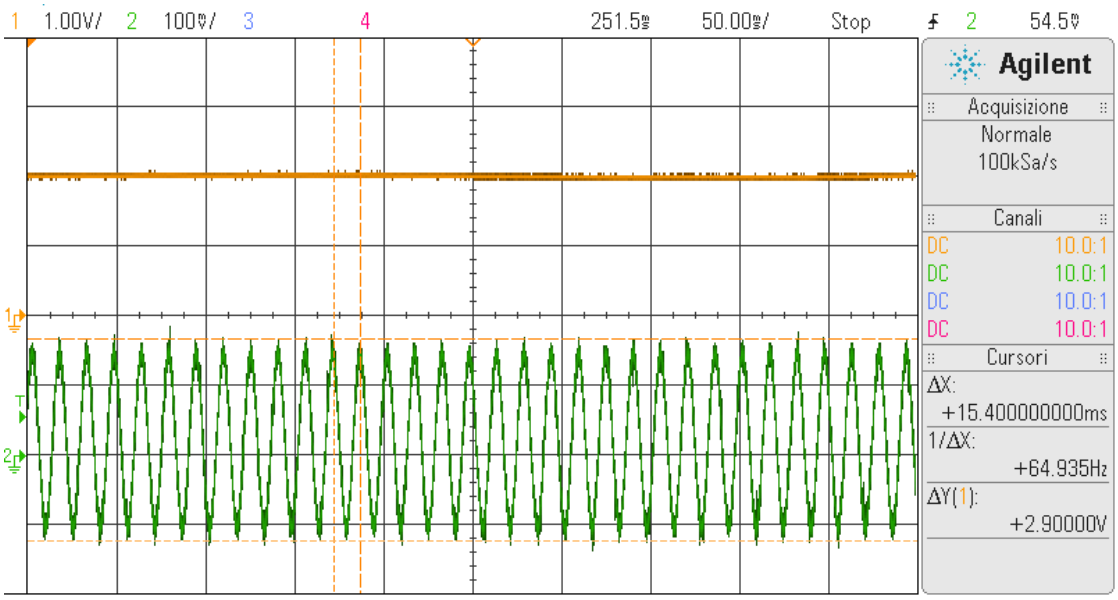


Figura 6.10: Acquisizione all'oscilloscopio della risposta del DUT allo stimolo con frequenza fmax= 65Hz

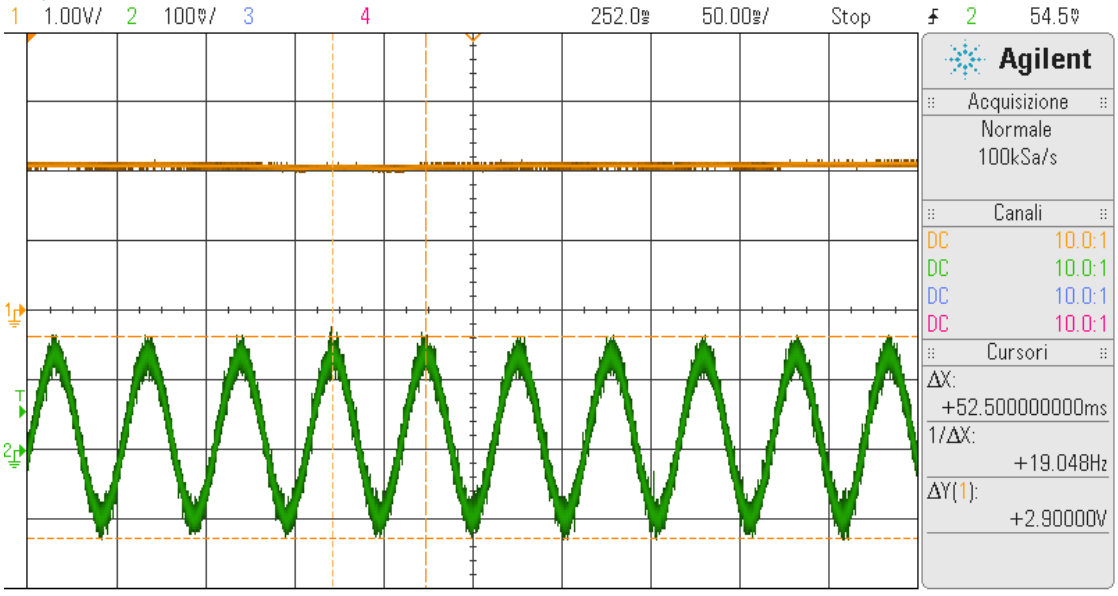


Figura 6.11: Acquisizione all'oscilloscopio della risposta del DUT allo stimolo con frequenza fmin= 19Hz

In assenza di stimolazione, infatti, con la cella anecoica realizzata si ottiene un isolamento efficace del sensore; questo consente di valutare se il rumore del sensore

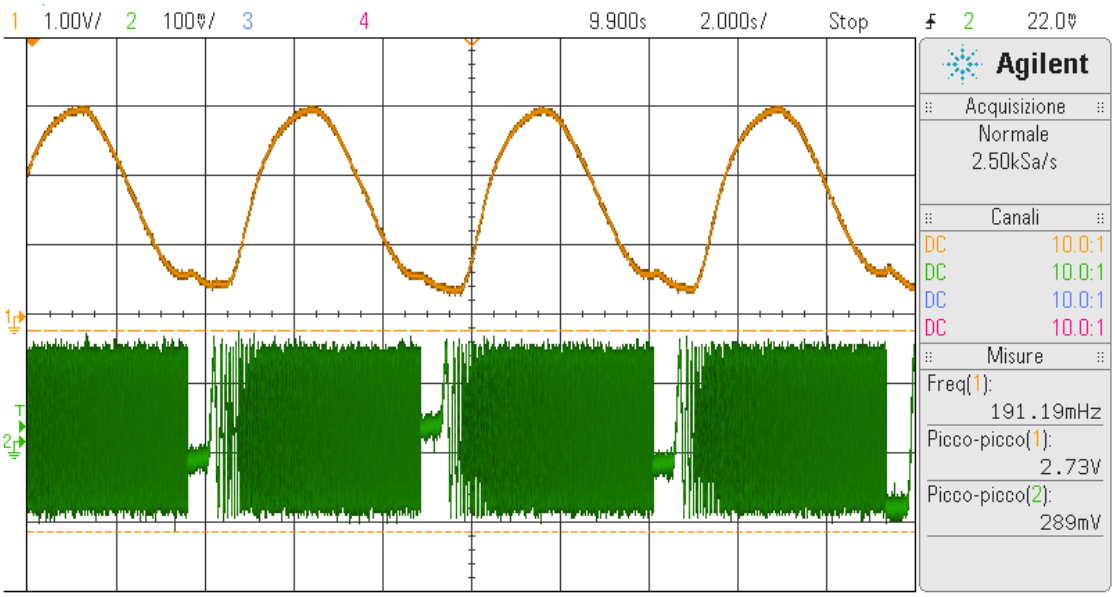


Figura 6.12: Risposta del DUT allo SWIPE da 15Hz a 100Hz

Ampiezza segnale	Frequenza segnale	Tensione di risposta della MW
0 V	-	200 mV_{pp}
290 mV	19 Hz	2 V
290 mV	40 Hz	3 V
290 mV	65 Hz	2 V

Tabella 6.1: Confronto della risposta della MW al variare della frequenza di stimolo dell'altoparlante

MW e della catena di amplificazione del segnale rientri all'interno di una soglia di sicurezza. Sollecitando l'altoparlante con un segnale sinusoidale di ampiezza 290 mV è possibile verificare che la catena di amplificazione presenti guadagno e banda corretti. Questo implica che i valori delle resistenze di polarizzazione e di guadagno degli amplificatori siano corretti. Andando a variare la frequenza del segnale di stimolo dell'altoparlante è possibile, inoltre, effettuare una valutazione sul corretto filtraggio del segnale MW.

Il test di collaudo che si intende realizzare è pertanto costituito da quattro test eseguiti successivamente:

1. **Analisi del rumore in assenza di segnale:** in assenza di stimoli il sensore MW genera un segnale il cui valore massimo deve essere inferiore a 300 mV.

2. **Analisi dell'amplificazione del DUT:** stimolando il sistema con un segnale

di 290 mV e frequenza pari a 40 Hz si analizza la risposta a massimo guadagno del sensore MW. Il segnale generato dal DUT deve essere pari a circa 3 V.

3. **Analisi frequenza di taglio inferiore del DUT:** stimolando il sistema con un segnale di ampiezza 290 mV e frequenza pari a circa 20 Hz il DUT deve fornire in risposta un segnale continuo di ampiezza pari a circa 2 V.

4. **Analisi frequenza di taglio superiore del DUT:** stimolando il sistema con un segnale di ampiezza 290 mV e frequenza pari a circa 65 Hz il DUT deve fornire in risposta un segnale continuo di ampiezza pari a circa 2 V.

I dati raccolti da questo test, dunque, consentono di effettuare un collaudo automatico completo sul funzionamento del modulo MW del DUT. Con questi risultati si può procedere con l'implementazione del sistema di collaudo del modulo MW, che consiste nel realizzare un circuito di condizionamento del segnale di stimolo dell'altoparlante, partendo da un'uscita digitale del microprocessore della mainboard di collaudo.

6.4 Banco di Test per Stimolazione Sensore Microonda

Partendo dall'analisi effettuata nel capitolo precedente si può ideare un test setup che sia in grado di analizzare in modo automatico il corretto funzionamento e assemblaggio del circuito MW. Lo schema a blocchi del sistema di collaudo che si intende realizzare è rappresentato in Figura 6.13.

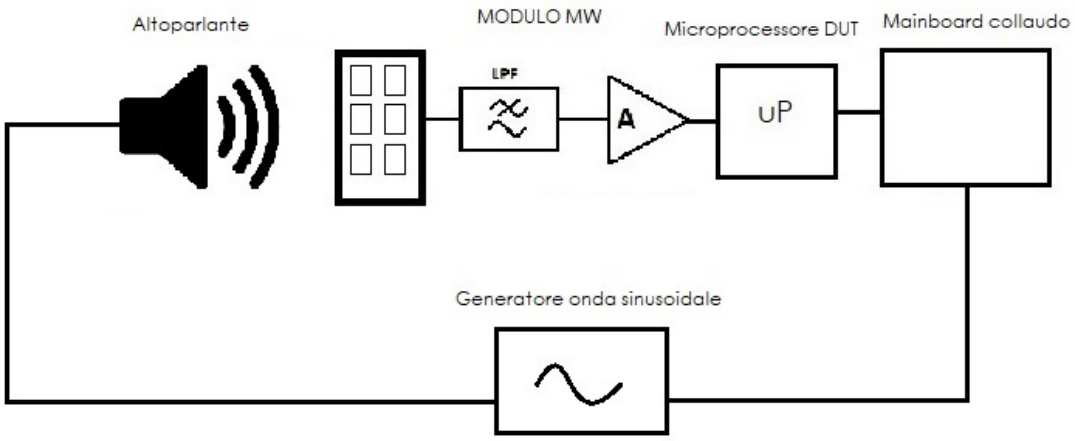


Figura 6.13: Test setup sistema di collaudo modulo MW

Il principio di funzionamento del sistema di collaudo è il seguente: la mainboard di collaudo controlla un generatore di forme d'onda sinusoidali, il quale pilota a sua volta un altoparlante. Il movimento dell'altoparlante simula il movimento di un oggetto target, fornendo così uno stimolo al sensore a microonde in fase di test. In risposta a tale stimolo, il sensore a microonde genera un segnale. Questo segnale viene amplificato e filtrato per essere poi inviato all'ingresso ADC del microprocessore centrale del DUT. Il microprocessore del DUT trasmette i dati relativi al segnale ricevuto alla mainboard di collaudo tramite una connessione seriale. Infine, la mainboard di collaudo analizza i dati ricevuti dal DUT per determinare se il sensore a microonde funziona entro i parametri specificati.

In particolare, il sistema di test è progettato per valutare i seguenti parametri del sensore a microonde:

1. Rumore in assenza di sollecitazione
2. Guadagno della catena di amplificazione del modulo MW
3. Banda passante della catena di amplificazione del modulo MW

Andando a verificare ognuno di questi parametri si può avere la certezza che il dispositivo che passa il collaudo rilevi correttamente.

Con l'analisi del rumore è possibile verificare che il rumore in uscita dal DUT in assenza di sollecitazione sia al di sotto di una soglia di sicurezza. Il rumore può essere intrinseco nel sensore IPM-365, dovuto alla difettosità del sensore, può essere dovuto a un componente elettronico presente nella catena di amplificazione guasto, oppure può essere dovuto a una saldatura mal eseguita. È di fondamentale importanza che questo parametro sia al di sotto del valore stabilito in quanto, siccome il sensore è amplificato per rilevare movimenti a una distanza di 15 m, il rumore viene amplificato dalla catena di amplificazione. Da specifiche, il rumore della MW in assenza di sollecitazioni deve essere al di sotto di 300 mV. Per effettuare questa misura è sufficiente che il microprocessore del DUT comunichi al microprocessore della mainboard di collaudo i valori che riceve dalla MW in assenza di sollecitazione. In questa fase del test, la mainboard di collaudo non stimola l'altoparlante e il DUT comunica i valori rilevati dal sensore MW. La mainboard di collaudo riceve un dato digitale che è proporzionale all'ampiezza del segnale in uscita dal sistema MW.

Per verificare che il sensore sia in grado di rilevare in tutta la dinamica è necessario verificare che il valore del guadagno sia corretto. Il guadagno può essere calcolato stimolando il sensore con un segnale sinusoidale di ampiezza 290 mV e frequenza 40 Hz. Come da rilevazioni effettuate, il microprocessore del DUT deve ricevere in ingresso un valore che sia di circa 3 V. Da specifica di progetto è accettabile una tolleranza del 5 % dovuta alle tolleranze dei componenti. La mainboard di collaudo deve generare un segnale di stimolo del sistema composto dall'altoparlante; nel frattempo, il microprocessore del DUT deve comunicare alla mainboard di collaudo il segnale in uscita dal modulo MW. Il segnale del modulo MW deve essere compreso tra 2.85 V a 3,15 V. Se il segnale in uscita dal modulo MW è compreso in questo range di valori si può affermare con certezza che il modulo IPM 365 sia funzionante e che la catena di amplificazione abbia valori e componenti corretti. Come mostrato nelle figure precedenti, per ottenere la massima sollecitazione del sensore MW è necessario pilotare l'altoparlante con un segnale sinusoidale di ampiezza pari a 290 mV e frequenza pari a 40 Hz. Per verificare la banda passante del sistema è sufficiente variare la frequenza del segnale sinusoidale che pilota l'altoparlante. La banda passante a -3 dB è stata ricavata nei test precedenti ed è compresa tra 19 Hz ed 65 Hz. Analogamente a quanto effettuato nei test precedenti, stimolando l'altoparlante con le due frequenze indicate, il sensore, per passare il collaudo, deve rispondere alla sollecitazione con un segnale di ampiezza compresa tra 2 V e 2.2 V. Come di consueto si considera valida una tolleranza del 5%.

6.5 Realizzazione circuito di stimolo dell'altoparlante

La sorgente del segnale di stimolo dell'altoparlante è il microprocessore della mainboard di collaudo. Il microprocessore è in grado di generare un'onda quadra di ampiezza pari a 3.3 V e di frequenza e duty cycle a piacere. Il segnale in uscita dal microcontrollore deve essere trasformato in un segnale sinusoidale di ampiezza pari a 290 mV e frequenza pari a 20 Hz per analizzare la frequenza di taglio inferiore, frequenza pari a 40 Hz per analizzare la risposta a massimo guadagno e, infine, frequenza pari a 65 Hz per analizzare la frequenza di taglio superiore.

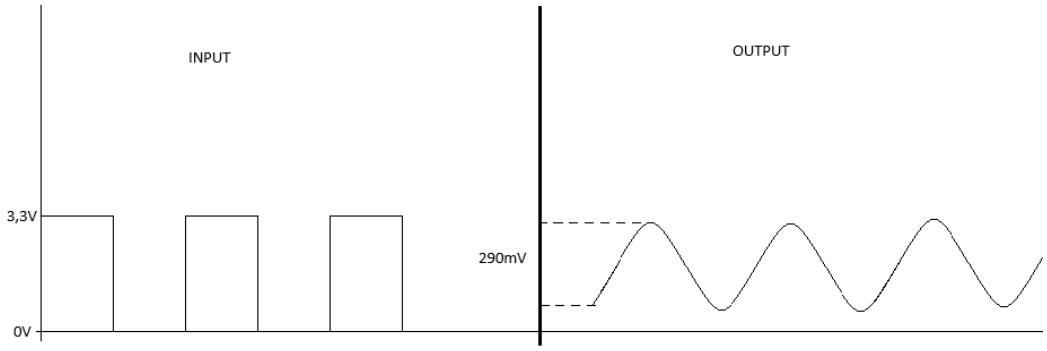


Figura 6.14: A sinistra si può vedere il segnale in uscita dal microcontrollore, a destra il segnale di pilotaggio dell'altoparlante

In Figura 6.14 è rappresentato a sinistra il segnale in uscita dal microcontrollore e a destra il segnale necessario per pilotare l'altoparlante. Il microcontrollore non dispone di sufficiente potenza per pilotare direttamente l'altoparlante; infatti, nel datasheet è specificato che la massima corrente che ogni singolo OUTPUT è in grado di erogare è pari a 16 mA. L'altoparlante da pilotare ha impedenza pari a 20 Ω.

$$\frac{V}{R} = \frac{3{,}3\,\mathrm{V}}{20\,\Omega} = 165\,\mathrm{mA} \tag{6.2}$$

Pertanto, per pilotare correttamente l'altoparlante sono necessari fino a 165 mA di corrente. Il diagramma a blocchi rappresentato in Figura 6.15 raffigura il circuito da implementare per il corretto pilotaggio dell'altoparlante.

Il primo stadio è implementato mediante un filtro passa basso RC, con l'obiettivo di trasformare l'onda quadra in una sinusoide. Al fine di ottenere un filtraggio più efficace, è stato implementato un filtro RC passivo a tre stadi. Per garantire un buon risultato è necessario realizzare un filtro dedicato ad ogni frequenza e

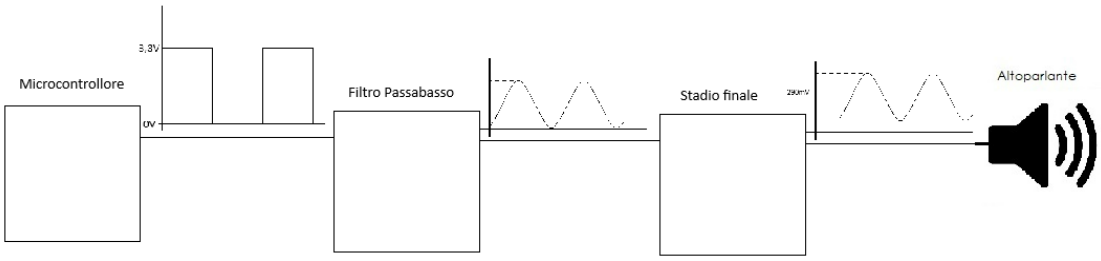


Figura 6.15: Diagramma a blocchi del circuito di pilotaggio dell'altoparlante

selezionare il filtro con un banco di switch digitali. Pertanto, verrà realizzato un filtro per la frequenza di segnale 20 Hz, un filtro per il 40 Hz e un filtro per il 65 Hz. Per simulare i circuiti da implementare è stato utilizzato il tool spice della TI (Texas Instruments) Tina.

Il primo circuito realizzato è dimensionato per il segnale a 20 Hz, utilizzando condensatori di valore 100 nF e resistenze di valore 68 kΩ, il risultato ottenuto è rappresentato in Figura 6.16.

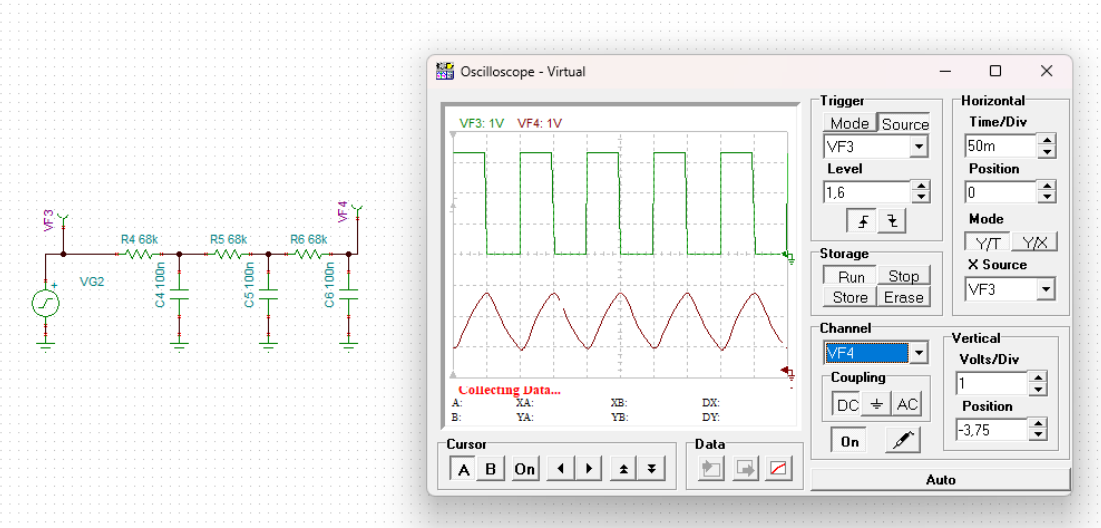


Figura 6.16: Simulazione del filtro da implementare tramite tool TINA.

Per completezza è stato anche tracciato il diagramma di Bode del circuito, dal quale si evince che alla frequenza di 20 Hz si ha un'attenuazione del segnale di circa −14 dB. Il diagramma di Bode è rappresentato in Figura 6.17.

Il circuito così dimensionato presenta frequenza di taglio pari a

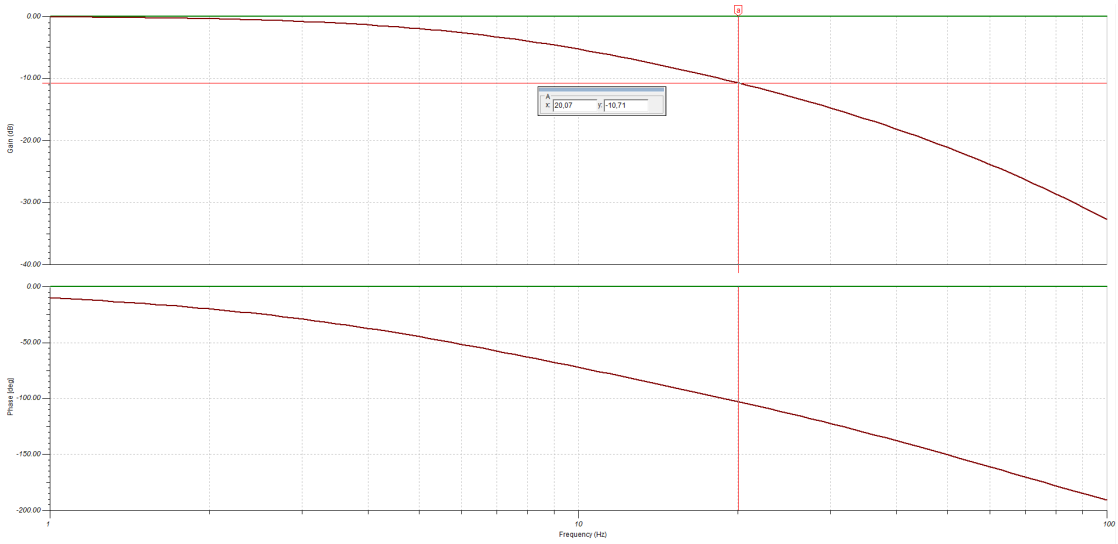


Figura 6.17: Diagramma di BODE del filtro simulato

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 47\,\mathrm{k\Omega} \times 100\,\mathrm{nF}} = 33{,}86\,\mathrm{Hz} \tag{6.3}$$

Il circuito è stato realizzato su millefori e testato a banco. In Figura 6.18 si può analizzare l'acquisizione del segnale in ingresso e del segnale in uscita del filtro precedentemente dimensionato.

Il segnale in verde (canale 2 dell'oscilloscopio) è l'onda quadra in uscita dal generatore di funzioni, il segnale in giallo (canale 1 dell'oscilloscopio) è il segnale in uscita dal filtro.

Per la frequenza pari a 40 Hz è stato abbassato il valore delle resistenze del filtro. Usando resistenze di valore 33 kΩ si ottiene una frequenza di taglio pari a

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 33\,\mathrm{k\Omega} \times 100\,\mathrm{nF}} = 48.22\,\mathrm{Hz} \tag{6.4}$$

Il diagramma di Bode che si ottiene dalla simulazione SPICE è rappresentato in Figura 6.19.

L'attenuazione che si ottiene alla frequenza di 40 Hz è anche in questo caso di circa -14 dB.

Il circuito è stato implementato su millefori e testato a banco. Le acquisizioni del segnale di ingresso e di uscita al filtro sono rappresentate in Figura 6.20.

Come si evince dalla Figura 6.20 il segnale in uscita presenta circa la stessa ampiezza del segnale a 20 Hz.

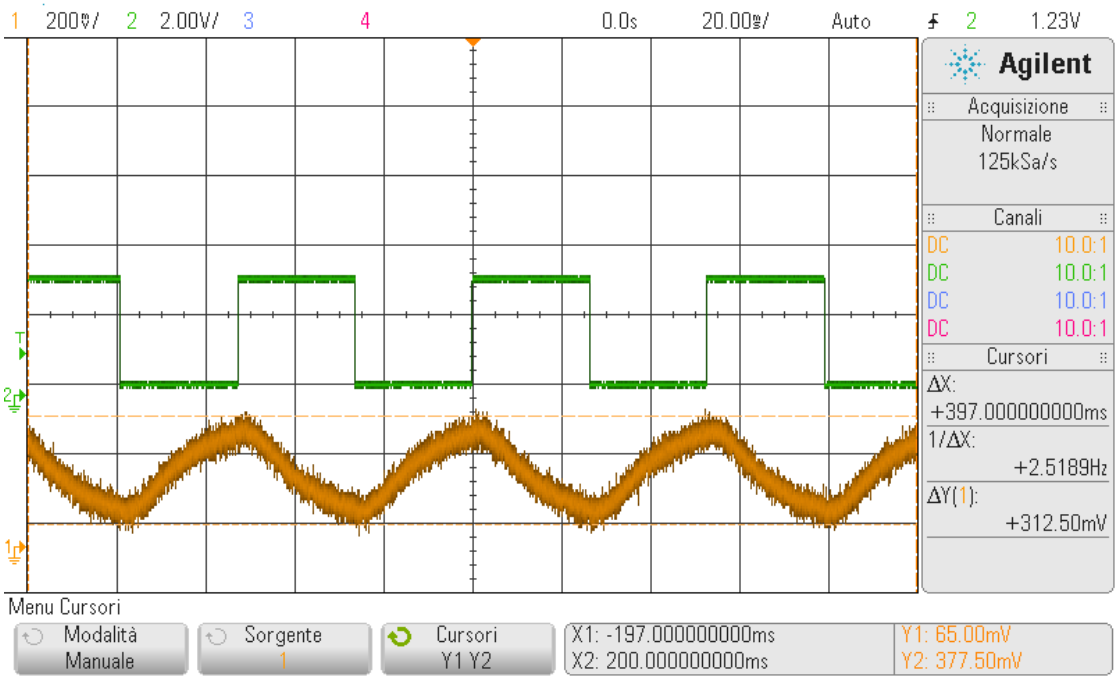


Figura 6.18: Acquisizione dei segnali di ingresso e di uscita dal filtro RC. In verde è rappresentato il segnale in ingresso del filtro in giallo è rappresentato il segnale in uscita dal filtro

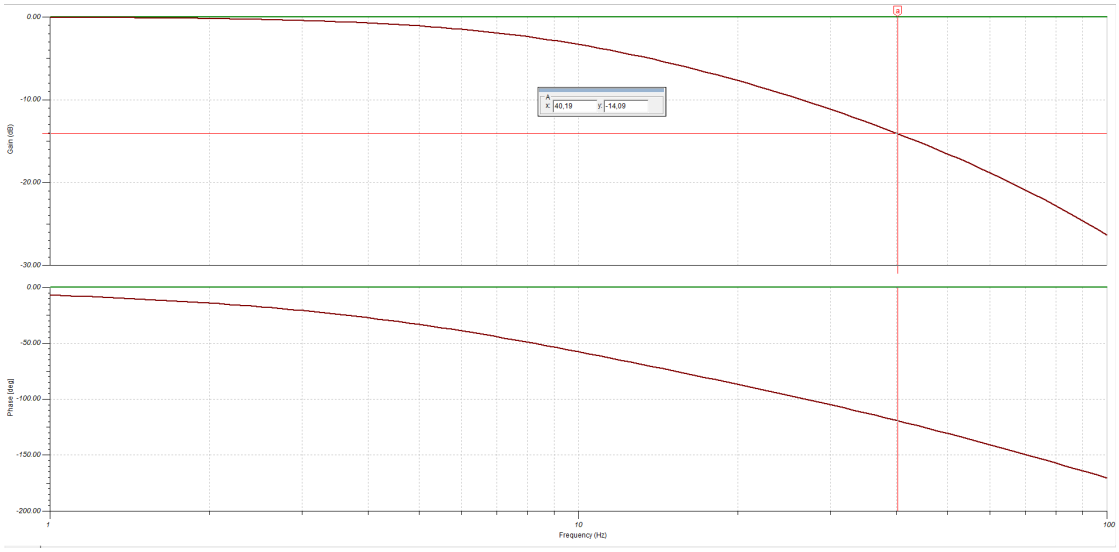


Figura 6.19: Diagramma di BODE del filtro dimensionato per la frequenza di 40Hz

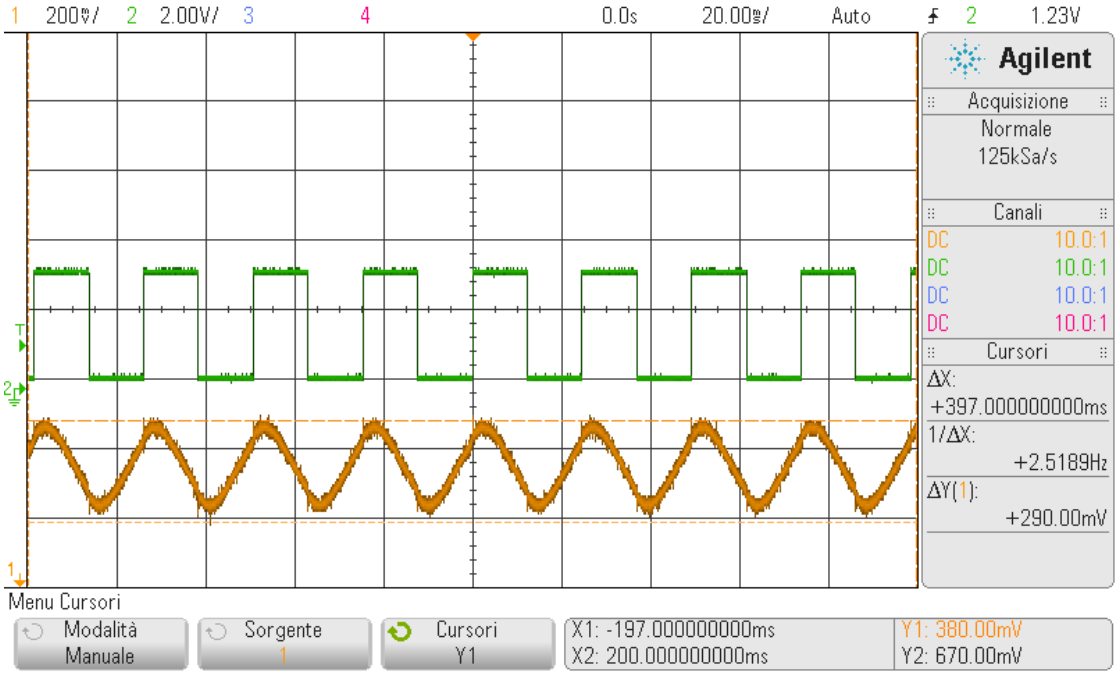


Figura 6.20: Segnale in ingresso e in uscita del filtro dimensionato per la frequenza di 40Hz. In verde è rappresentato il segnale in ingresso del filtro in giallo è rappresentato il segnale in uscita dal filtro

L'ultimo filtro è stato realizzato per lavorare ad una frequenza di circa 65 Hz. Il valore di resistenza utilizzato in questo caso è di 22 kΩ, che porta la frequenza di taglio del filtro a

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 22\,\mathrm{k\Omega} \times 100\,\mathrm{nF}} = 72.34\,\mathrm{Hz} \tag{6.5}$$

Il risultato da simulazione è rappresentato in Figura 6.21.

Anche in questo caso l'attenuazione che si ottiene alla frequenza di lavoro è di circa −14 dB.

Il circuito è stato implementato e testato a banco e sono state effettuate le acquisizioni tramite oscilloscopio presenti in Figura 6.22.

A questo punto è necessario progettare lo stadio finale per pilotare l'altoparlante. Lo schema elettrico realizzato è rappresentato in Figura 6.23.

Il circuito illustrato è progettato per pilotare un altoparlante da 20 Ω e si basa sull'integrato L272 della STMicroelectronics, un amplificatore operazionale di potenza capace di dissipare fino a 1.2 W. La scelta di questo componente è stata dettata dalla sua pregressa utilizzazione in applicazioni simili e dalla sua disponibilità tra i componenti forniti, rendendo superflua la ricerca di un nuovo

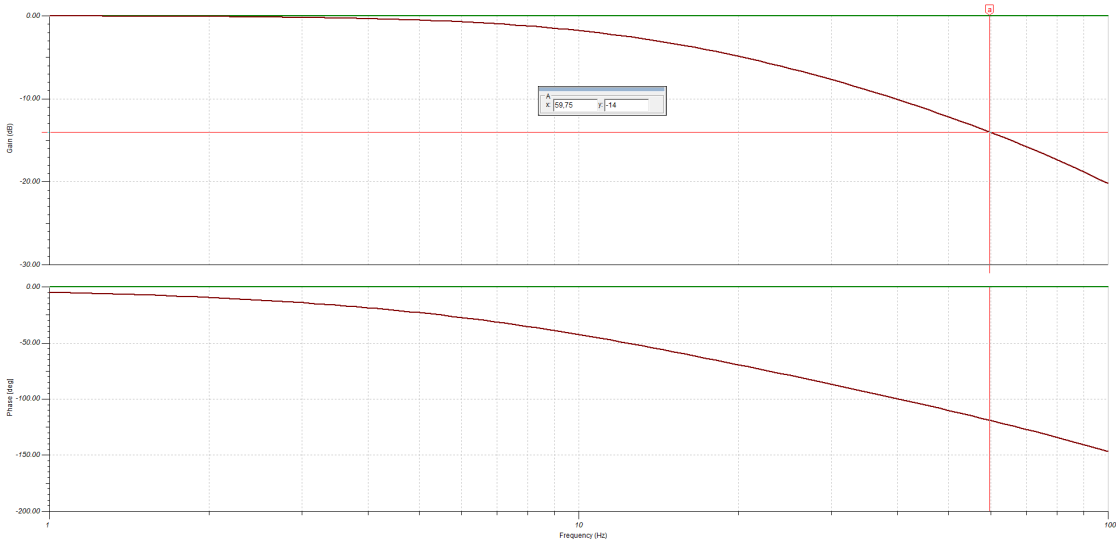


Figura 6.21: Diagramma di BODE del filtro dimensionato per la frequenza di 60Hz

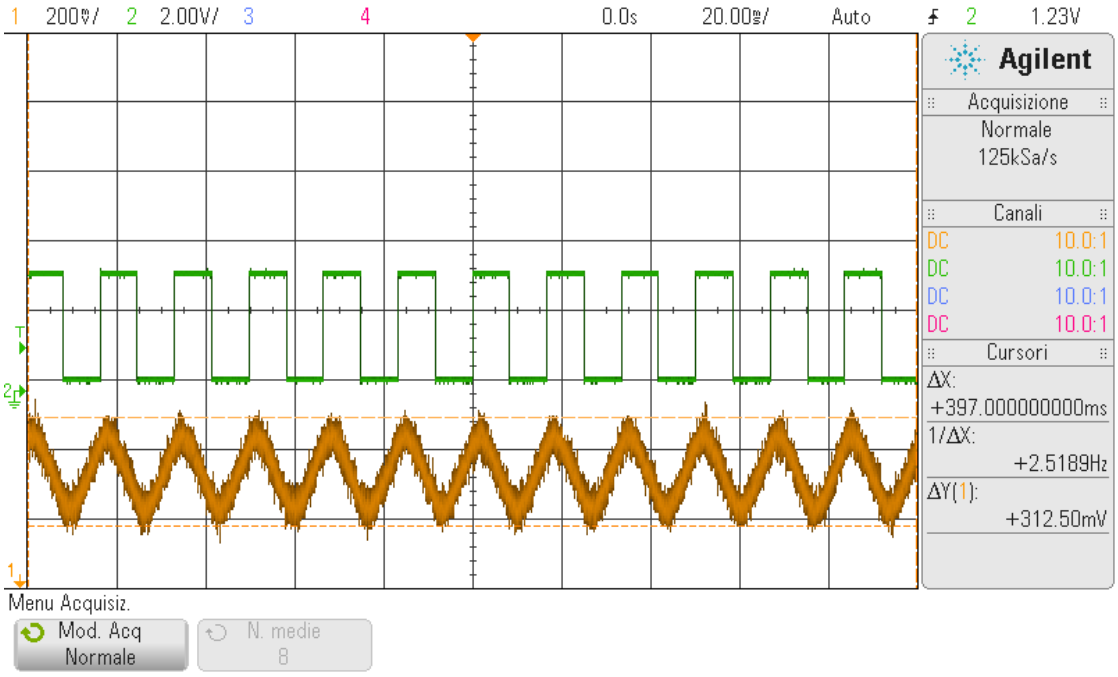


Figura 6.22: Acquisizione da oscilloscopio del segnale in ingresso e in uscita del filtro dimensionato per la frequenza di 65Hz. In verde è rappresentato il segnale in ingresso del filtro in giallo è rappresentato il segnale in uscita dal filtro

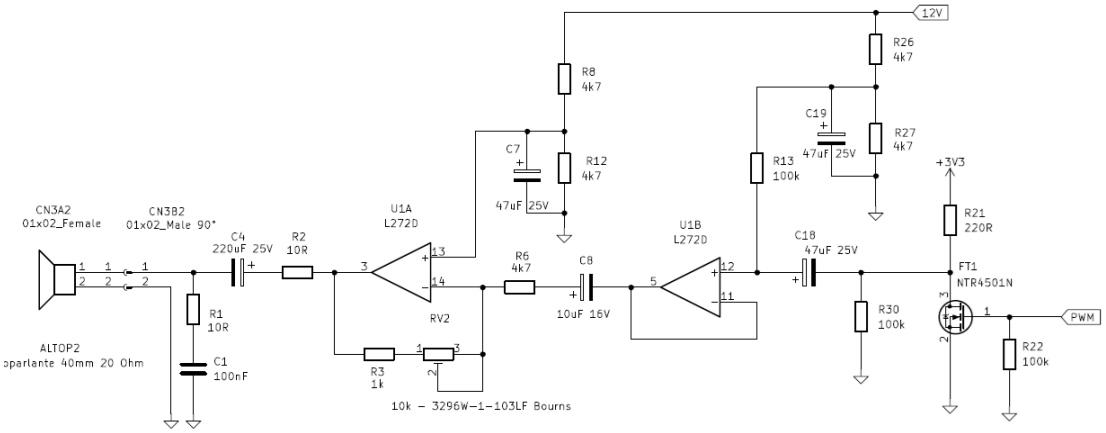


Figura 6.23: Schema elettrico del circuito di pilotaggio dell'altoparlante

integrato per la prototipazione. Tuttavia, è stata preliminarmente verificata la conformità dei suoi parametri operativi con i requisiti dell'applicazione tramite il datasheet. La validazione funzionale del circuito avverrà in una fase successiva mediante test a banco.

Il percorso del segnale inizia con il condensatore di disaccoppiamento C18 (47 μF), il cui scopo primario è bloccare la componente continua proveniente dallo stadio precedente, permettendo il transito della sola componente alternata.

Il primo stadio di amplificazione è configurato come un voltage follower, implementato con l'operazionale U1B (L272). Questa configurazione svolge due funzioni cruciali:

1. Disaccoppiamento di impedenza: isola l'uscita del filtro (non mostrato nel dettaglio) dal carico rappresentato dal secondo stadio di amplificazione, prevenendo potenziali effetti di caricamento che potrebbero alterare la risposta del filtro.

2. Traslazione del livello DC: il segnale viene traslato a una tensione di offset di +6 V. Questa polarizzazione è ottenuta tramite il partitore resistivo formato da R26 e R27 (entrambe di valore 4.7 kΩ) connesso all'alimentazione a +12 V. Il punto medio di questo partitore stabilisce la tensione di riferimento non invertente dell'operazionale.

Il secondo stadio di amplificazione, basato sull'operazionale U1A (L272), è configurato come amplificatore non invertente con guadagno variabile. Questo stadio ha la funzione di regolare l'ampiezza del segnale per pilotare adeguatamente l'altoparlante. Data l'ampiezza del segnale in ingresso a questo stadio (circa

300 mV), non è richiesta una significativa amplificazione in tensione. La presenza del trimmer RV2 (1 kΩ) nel circuito di feedback consente una taratura precisa del guadagno e, di conseguenza, dell'ampiezza del segnale in uscita durante i test a banco.

La rete R1 (10 Ω) e C1 (100 nF) posta in parallelo all'altoparlante costituisce uno snubber circuit (circuito di smorzamento). Questa rete ha lo scopo di ridurre le oscillazioni e la risonanza dovute alla componente reattiva (induttiva) dell'altoparlante alle alte frequenze, migliorando la stabilità dell'amplificatore e la qualità del suono riprodotto.

Infine, il condensatore C4 (220 μF), posto in serie all'altoparlante, è un condensatore di accoppiamento AC. La sua funzione è quella di bloccare qualsiasi componente continua residua presente nel segnale amplificato, garantendo che all'altoparlante venga fornita esclusivamente la componente alternata del segnale audio, prevenendo il flusso di corrente continua attraverso la bobina mobile che potrebbe danneggiarlo o ridurne l'efficienza.

Il circuito completo di filtri è rappresentato in Figura 6.24

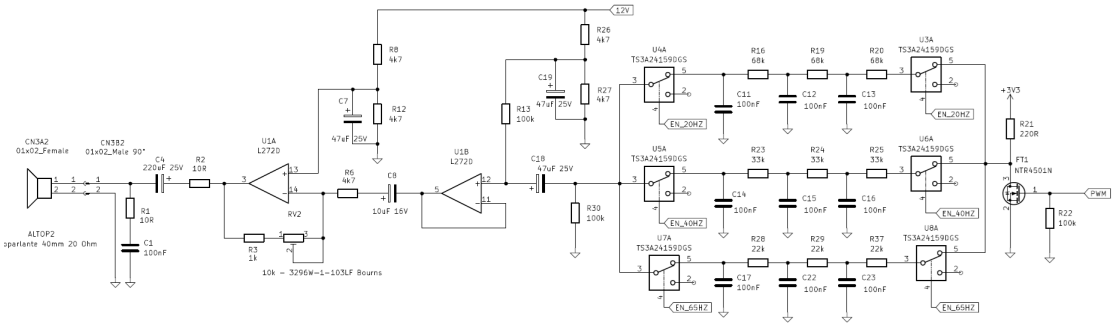


Figura 6.24: Schema elettrico del circuito di pilotaggio dell'altoparlante realizzato

Il segnale di uscita dal microcontrollore è identificato con la label 'PWM'. Per disaccoppiare l'uscita del micro dal resto del circuito è stato inserito un transistor nMOS, NTR4501N; questo consente di disaccoppiare l'impedenza, quindi rende l'uscita del micro insensibile al carico, in quanto il MOSFET è caratterizzato da una resistenza di GATE e di DRAIN molto elevate. Quando il segnale PWM è 0 V, FT2 è interdetto, pertanto la tensione in uscita è pari a 3.3 V. Quando il segnale PWM è pari a 3.3 V, FT2 è in saturazione e la tensione in uscita è pari a circa 0 V. FT2 è un transistor con massima corrente di drain pari a $I_d = 3.2$ A, ed è in grado di dissipare fino a $P_D = 1.2$ W, correttamente dimensionato per l'applicazione.

Il circuito realizzato su millefori è rappresentato in Figura 6.25

Infine, il circuito è stato testato a banco, utilizzando come segnale di input un'onda quadra con ampiezza 3.3 V con frequenza 20 Hz, 40 Hz e 60 Hz, analizzando

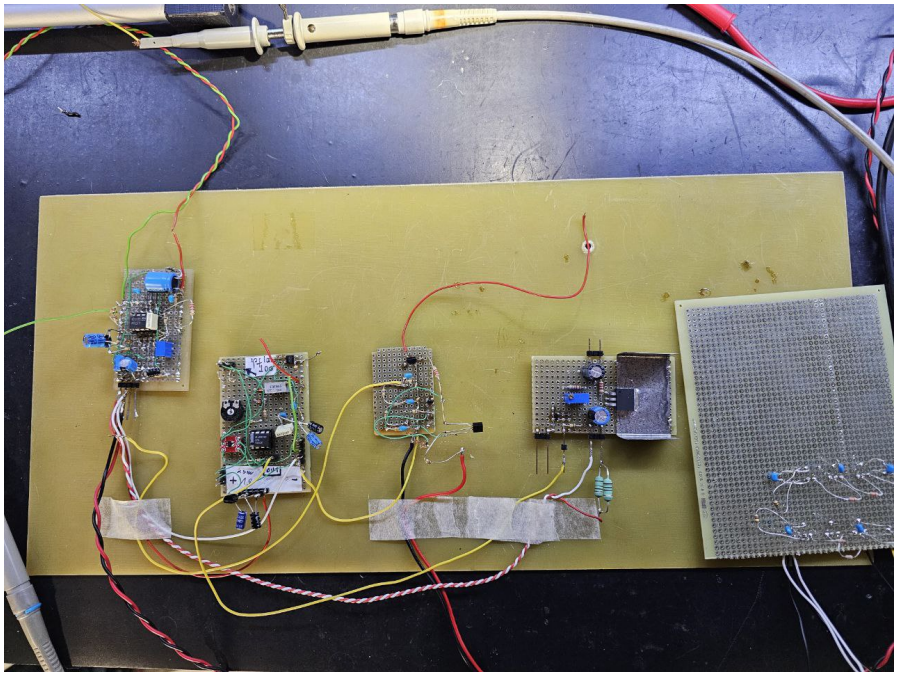


Figura 6.25: Prototipo del circuito di pilotaggio altoparlante realizzato su millefori

la risposta del DUT alla sollecitazione. I risultati delle acquisizioni sono mostrati in Figura 6.26, Figura 6.27 e Figura 6.28.

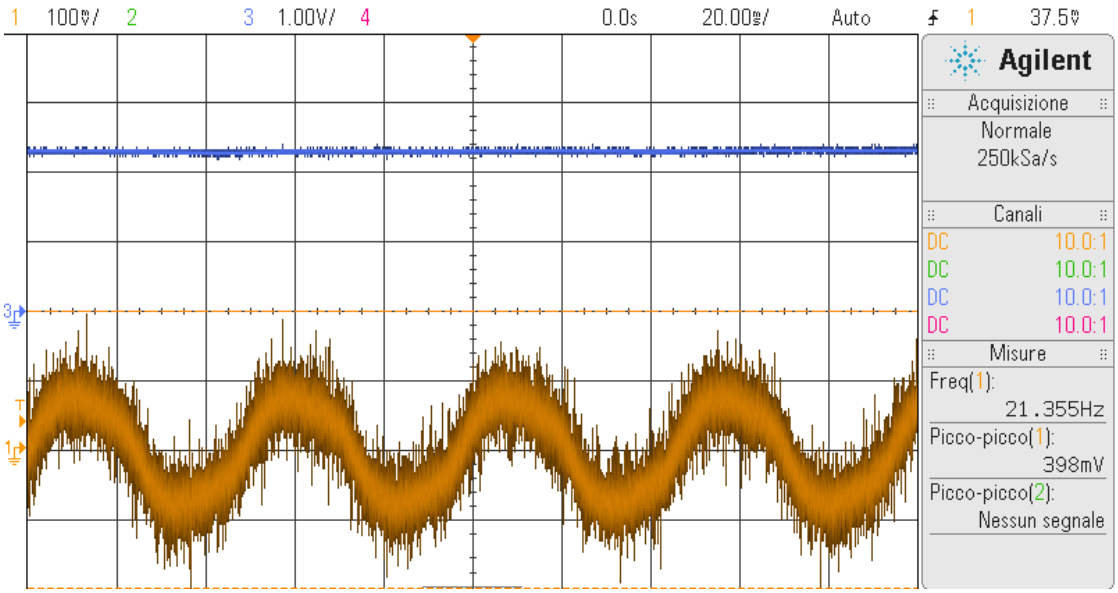


Figura 6.26: Risposta del DUT alla sollecitazione a 20Hz

Come si può vedere in Figura 6.26 il DUT viene sollecitato dall'altoparlante pilotato con un segnale di ampiezza pari a circa 300 mV e la risposta del DUT rientra nei parametri; infatti, in uscita si può vedere un segnale costante pari a circa 2.1 V. In Figura 6.27 è rappresentata la risposta del DUT alla sollecitazione

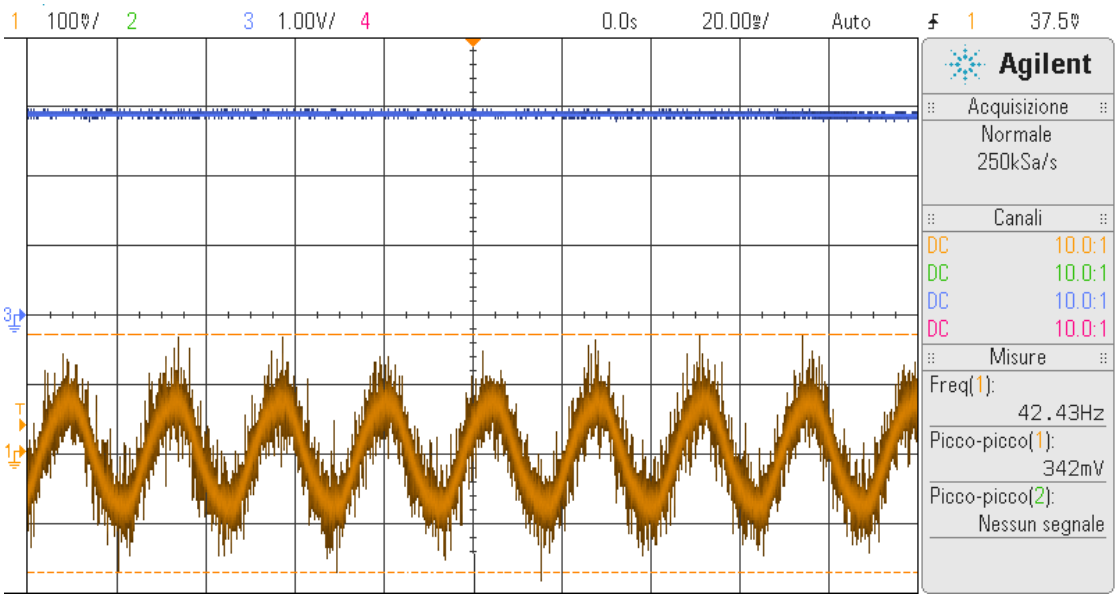


Figura 6.27: Risposta del DUT alla sollecitazione a 40Hz

con frequenza pari a 40 Hz. Si tratta della frequenza con massima risposta del DUT. Infatti si può notare dall'acquisizione riportata che l'ampiezza del segnale in uscita dal DUT è pari a circa 3 V. In Figura 6.28 è rappresentata la risposta del DUT alla sollecitazione con frequenza pari a 65 Hz.

I risultati delle acquisizioni effettuate sono riassunti nella Tabella 6.2.

Frequenza segnale di testa	Tensione di risposta della MW
21 Hz	2.1 V
42 Hz	2.9 V
63 Hz	2.1 V

Tabella 6.2: Risposta della MW al variare della frequenza di stimolo dell'altoparlante

Ciò che si evince dalle acquisizioni effettuate è che il segnale di stimolo dell'altoparlante generato dal circuito progettato presenta una lieve differenza in frequenza rispetto a quella ricavata nei test precedenti, ma non influisce in modo significativo sulla risposta del modulo MW alla sollecitazione dell'altoparlante. Infatti,

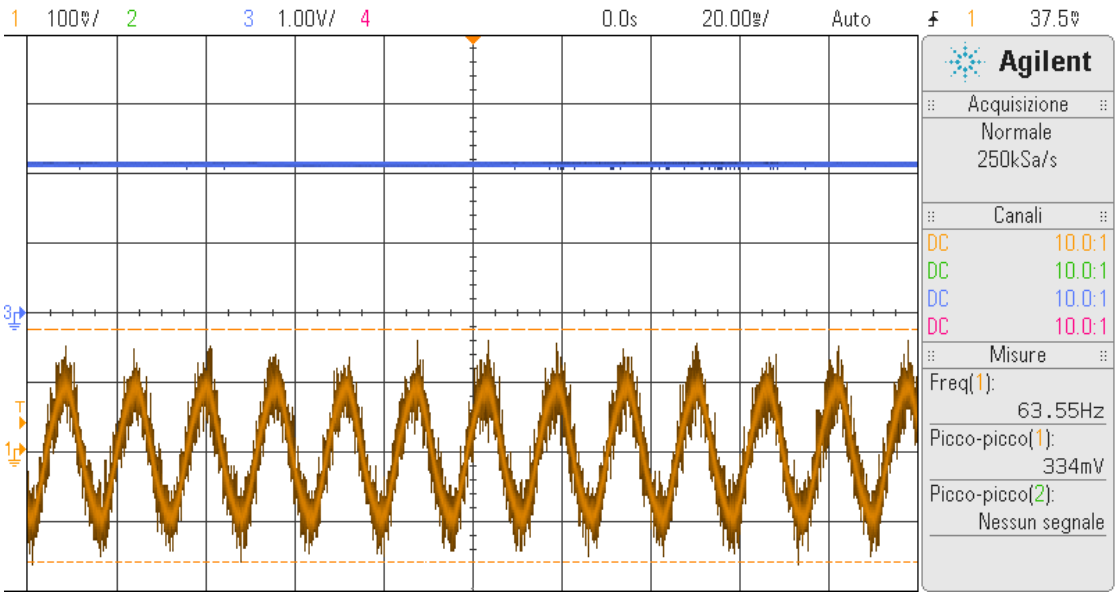


Figura 6.28: Risposta del DUT alla sollecitazione a 65Hz

si può notare una significativa differenza della risposta in base alla frequenza di stimolo, che consente di effettuare un'analisi sufficientemente accurata sul corretto funzionamento del DUT. Un possibile miglioramento del circuito potrebbe essere l'inserimento di un filtro attivo per ciascuna frequenza operativa del circuito di stimolo dell'altoparlante. Questa soluzione migliorerebbe le prestazioni del filtraggio dell'onda quadra, ma al contempo aumenterebbe la complessità del circuito, richiedendo un'alimentazione aggiuntiva e un partitore di tensione. L'efficacia di questa soluzione potrà essere valutata in lavori futuri.

Capitolo 7

Conclusioni

Il percorso intrapreso in questo lavoro di tesi ha avuto come punto di partenza l'analisi del processo di collaudo impiegato per sensori volumetrici che integrano le tecnologie PIR e MW. L'esame del sistema di collaudo manuale preesistente ha fatto emergere con chiarezza diverse criticità: in particolare, una forte dipendenza dall'interpretazione dell'operatore specializzato, una limitata ripetibilità dei test dovuta all'applicazione manuale degli stimoli e una notevole sensibilità del processo alle interferenze ambientali. Questi fattori, nel loro insieme, incidevano negativamente sull'affidabilità generale del controllo qualità e sull'efficienza produttiva.

Di fronte a questo quadro, si è delineata la necessità di sviluppare un banco di prova funzionale che potesse superare tali limiti attraverso l'automazione. Sebbene in una fase preliminare si potessero ipotizzare obiettivi più ampi, magari orientati verso sistemi complessi di raccolta ed elaborazione dati, è apparso evidente che la priorità inderogabile fosse risolvere le problematiche basilari legate alla generazione di stimoli controllati e ripetibili per i sensori PIR ed MW e alla creazione di un ambiente di misura adeguatamente isolato. Pertanto, il nucleo centrale di questa tesi si è focalizzato proprio sulla progettazione e l'implementazione delle soluzioni hardware e metodologiche necessarie per automatizzare e rendere affidabili queste fasi fondamentali del collaudo, gettando le basi essenziali per qualsiasi sviluppo futuro. Il lavoro sperimentale e di prototipazione svolto ha quindi permesso di dimostrare la validità pratica di un approccio HW-in-the-loop per questo specifico contesto.

7.1 Risultati Importanti

L'implementazione del sistema di collaudo automatizzato ha portato a conseguire risultati di rilievo, quantificabili in miglioramenti tangibili rispetto alla metodologia manuale. Un primo dato significativo riguarda la riduzione del tempo di collaudo per unità, sceso da 20 a 7 secondi, il che si traduce in un aumento di efficienza del 70% e in una maggiore capacità produttiva oraria. Altrettanto importante è stata l'eliminazione degli errori umani nell'interpretazione dei risultati, portando la loro incidenza dal 5-10% stimato allo 0%, a tutto vantaggio dell'accuratezza del collaudo.

Un progresso determinante è stato ottenuto sul fronte della ripetibilità dei test. In particolare, per il sensore PIR, si è riusciti a ridurre la variabilità del test da circa il 15-20% a meno del 2%. Questo passo avanti è stato possibile grazie all'adozione di un eccitatore PIR basato su lampadina a incandescenza, la cui stabilità termica si è dimostrata nettamente superiore a quella delle resistenze, rendendo la misura sostanzialmente indipendente dalla temperatura ambiente (come verificato tra $20°C$ e $33°C$) e garantendo una ripetibilità superiore al 99.5%. Progressi analoghi sono stati compiuti per il sensore MW: la costruzione di una piccola cella anecoica ha permesso di isolare efficacemente il sensore, abbattendo il rumore di fondo di oltre il 90%. L'utilizzo di un altoparlante come sorgente di stimolo Doppler controllata ha poi consentito l'automazione completa del test e la verifica ripetibile di parametri funzionali come il guadagno e la banda passante. Considerati nel loro insieme, questi avanzamenti tecnologici si sono tradotti in una riduzione dei costi operativi stimata attorno al 60%. I risultati quantitativi confermano quindi come l'aver affrontato con successo le sfide implementative del collaudo PIR ed MW abbia generato benefici concreti, in linea con le logiche dell'Industria 4.0.

7.2 Limiti del Lavoro

È corretto riconoscere che il presente studio, data anche la sua natura prototipale e il focus specifico adottato, presenta alcuni limiti. La validazione sperimentale si è basata su un numero definito di sensori, e per generalizzare i risultati sarebbe opportuno estendere le prove ad altri modelli o lotti di produzione. Le dimensioni della cella anecoica, seppur funzionali allo scopo, potrebbero rappresentare un vincolo per sensori fisicamente più grandi. Per quanto riguarda l'analisi dei dati, ci si è concentrati sulla verifica del superamento di soglie predefinite; non si è approfondita in questa sede l'implementazione di algoritmi di analisi più evoluti, che potrebbero estrarre informazioni aggiuntive. Infine, la prototipazione si è avvalsa di componentistica standard disponibile: una successiva fase di ingegnerizzazione

permetterebbe certamente ottimizzazioni in termini di costi, dimensioni e integrazione dei circuiti. Questi aspetti rappresentano naturali aree di miglioramento per il futuro, ma non diminuiscono la validità del lavoro svolto nel risolvere le problematiche fondamentali identificate all'inizio.

7.3 Prospettive Future

Il lavoro di tesi qui presentato e i risultati ottenuti aprono la strada a diverse prospettive di sviluppo futuro. Un primo passo naturale sarà quello di estendere la validazione del sistema a una varietà più ampia di sensori e dispositivi. Avendo ora a disposizione metodi affidabili per la stimolazione e la misura, diventa realistico considerare l'integrazione di sistemi più avanzati per l'analisi dei dati, sfruttando le potenzialità dell'intelligenza artificiale e del machine learning. Questo potrebbe portare a un'interpretazione ancora più fine dei risultati, all'identificazione automatica di anomalie complesse e forse anche a capacità predittive sulle prestazioni dei sensori o sulla manutenzione del banco stesso.

Altre direzioni di sviluppo potrebbero riguardare l'impiego di tecniche di simulazione numerica per ottimizzare ulteriormente i parametri di test, l'esplorazione di materiali o tecniche costruttive innovative (come la stampa 3D con materiali specifici) per la realizzazione di celle anecoiche più performanti o versatili, e il perfezionamento dell'interfaccia utente per renderla ancora più funzionale. Un'evoluzione significativa sarebbe poi l'integrazione del banco di collaudo all'interno dei sistemi informativi di fabbrica (MES), permettendo un flusso continuo di dati sulla qualità e un feedback diretto sul processo produttivo. Queste prospettive future, che poggiano sul lavoro di base effettuato in questa tesi sull'automazione del collaudo PIR ed MW, tracciano un percorso verso sistemi di verifica sempre più efficienti, intelligenti e integrati, in grado di supportare l'industria elettronica nel garantire prodotti affidabili e di alta qualità.

Bibliografia

[1] Yun, Jaeseok e Lee, Sang-Shin. «Human Movement Detection and Identification Using Pyroelectric Infrared Sensors». In: *Sensors* 14.5 (2014), pp. 8057–8081 (cit. a p. 8).

[2] Fraden, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 4th Edition. New York: Springer, 2010 (cit. a p. 9).

[3] Vishay Semiconductors. *Physics and Technology*. Documento Numero: 80086, Revisione 1.2. Accesso da: www.vishay.com/doc?80086. 2014 (cit. a p. 13).

[4] Vishay Semiconductors. *Applicazione dei Sensori Ottici*. Numero del Documento: 81449, Revisione 1.0. Accesso da: www.vishay.com/doc?81449. 2006 (cit. a p. 13).

[5] Vishay Semiconductors. *VCNL3020: Sensore di Prossimità Completamente Integrato con Emettitore Infrarosso, Interfaccia I2C e Funzione di Interruzione*. Numero Documento: 84150, Revisione 1.2. Accesso da: www.vishay.com/doc?84150. 2018 (cit. a p. 13).

[6] Vishay Semiconductors. *Designing the VCNL3020 Into an Application*. Nota Applicativa, Numero del Documento: 84139, Revisione: 29-May-2020. Accesso da: www.vishay.com/doc?84139. 2020 (cit. a p. 13).

[7] Radartutorial. *Radar Basics*. Book 1 of the Internet representation Radar Basics. Accesso da: www.radartutorial.eu (cit. a p. 17).

[8] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. 4th Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012 (cit. a p. 18).

[9] Maxim Integrated. *Accelerometer and Gyroscope Sensors: Operation, Sensing, and Applications*. Application Note 5830. Accesso da: www.maximintegrated.com. 2014 (cit. a p. 20).

[10] Andrejašič, Matej. *MEMS Accelerometers*. Seminar, University of Ljubljana, Faculty for Mathematics and Physics, Department of Physics. 2008 (cit. a p. 20).

[11] Everett Companies LLC. *Physics of Electro-Optic Detectors*. Company Publication. Making Technology Work for You. Phoenix, Arizona, USA, 1998-2009. URL: email@everettinfrared.com (cit. a p. 47).

[12] Jürgen Schilz. «THERMOELECTRIC INFRARED SENSORS (THERMOPILES) FOR REMOTE TEMPERATURE MEASUREMENTS; PYROMETRY». In: *thermophysica minima* 1 (lug. 2000). PerkinElmer Optoelectronics GmbH, pp. 1–12 (cit. a p. 47).

[13] Zilog. *ZMOTION® Pyroelectric Sensors Product Specification*. Product Specification PS033601-1214. Zilog, Inc. (An IXYS Company), dic. 2014 (cit. a p. 50).

[14] PG. *Il corpo nero e l'ipotesi di Planck*. Dispensa interna. luglio 2010 (cit. a p. 50).

[15] ELTEC INSTRUMENTS, INC. *Introduction To Infrared Pyroelectric Detectors*. ELTECdata 100. Mar. 2006. URL: www.eltecinstruments.com (cit. alle pp. 54, 57).

[16] InnoSenT GmbH. *Application Note III - IPM-165-a universal Low Cost K-Band Transceiver for Motion Detection in various Applications*. www.innosent.de (cit. a p. 64).

[17] Wolfgang Weidmann. *IPM-165-a universal Low Cost K-Band Transceiver for Motion Detection in various Applications*. InnoSenT Innovative Sensor Technology. Application Note AN 03. Nov. 2006 (cit. a p. 68).