







UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELL'INGEGNERIA  
CURRICULUM IN INGEGNERIA BIOMEDICA, ELETTRONICA E DELLE  
TELECOMUNICAZIONI

---

# **Sviluppo e implementazione di soluzioni innovative di Wireless Sensor Network per IoT e use cases in ambito Smart Environment**

Tesi di Dottorato di:  
**Sara Raggiunto**

Tutor:  
**Prof.ssa Ing. Paola Pierleoni**

Coordinatore del Curriculum:  
**Prof. Francesco Piazza**

XVIII ciclo - nuova serie





UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELL'INGEGNERIA  
CURRICULUM IN INGEGNERIA BIOMEDICA, ELETTRONICA E DELLE  
TELECOMUNICAZIONI

---

# **Sviluppo e implementazione di soluzioni innovative di Wireless Sensor Network per IoT e use cases in ambito Smart Environment**

Tesi di Dottorato di:  
**Sara Raggiunto**

Tutor:  
**Prof.ssa Ing. Paola Pierleoni**

Coordinatore del Curriculum:  
**Prof. Francesco Piazza**

XVIII ciclo - nuova serie

---

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELL'INGEGNERIA  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
Via Brecce Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

*“Durante questi momenti di riposo, dopo un’intensa attività intellettuale, la mente intuitiva sembra subentrare a quella razionale e può produrre improvvise visioni chiarificatrici, dalle quali derivano la grande gioia e la soddisfazione che il lavoro di ricerca scientifica può offrire.”*

*F. Capra*





# Sommario

La presente tesi si focalizza sullo sviluppo di innovative Wireless Sensor Network finalizzate all'erogazione di un insieme di servizi che consentono la costruzione, secondo il paradigma SOA (Service-Oriented Architecture), di applicazioni di tipo context-aware, necessarie a rendere smart l'ambiente circostante. Nello specifico ci si è concentrati su due ambiti: Wireless Sensor Network (WSN) per il controllo di un sistema di illuminazione e reti diffuse di sensori low-cost per il monitoraggio sismico. In relazione al primo ambito si è realizzato un sistema intelligente capace di monitorare da remoto ed in tempo reale i corpi illuminanti. I principali elementi dell'architettura realizzata sono il sistema di controllo dell'impianto di illuminazione, il sistema di rilevamento, il sistema di gestione e il sistema di illuminazione. I primi due elementi consentono l'acquisizione di informazioni relative al livello di illuminamento e alla temperatura colore (CCT) nel sito di analisi, il sistema di gestione integra funzioni di monitoraggio locale e remoto dei parametri illuminotecnici per il controllo, mentre il sistema di illuminazione è composto dai corpi illuminanti.

Per quanto riguarda il secondo ambito applicativo si è sviluppata un'unità di sensing low-cost, composta da accelerometri che, attraverso i dati rilevati è in grado di registrare terremoti, rilevando sia eventi di bassa magnitudo che significativi. Dai risultati ottenuti nelle prove effettuate sul campo, il sistema assicura prestazioni analoghe rispetto a quelle della rete sismica nazionale dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Vista l'ottima precisione ottenuta dall'unità di sensing, il dispositivo può essere utilizzato per incrementare e creare una rete diffusa per il monitoraggio di edifici strategici, come scuole e ospedali, per la realizzazione di mappe di scuotimento e per la creazione di sistemi intelligenti di Earthquake Early Warning (EEW) per l'allerta precoce, basati sulle architetture di Internet of Things.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Wireless Sensor Network per l'Internet of Things</b>	<b>3</b>
2.1	Reti di Sensori Wireless . . . . .	4
2.2	Scenari Applicativi . . . . .	5
2.3	Wireless Sensor Network per Applicazioni di Environmental Monitoring . . . . .	6
2.4	Architettura di rete di riferimento . . . . .	7
2.5	Casi d'uso . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Un Sistema IoT Innovativo per la Cappella degli Scrovegni</b>	<b>13</b>
3.1	Argomento di studio: Cappella degli Scrovegni . . . . .	15
3.1.1	La problematica delle condizioni di illuminazione . . . . .	16
3.1.2	L'impianto di illuminazione . . . . .	16
3.2	Light Emitting Diodes e l'influenza della luce emessa . . . . .	17
3.3	Soluzione IoL sviluppata . . . . .	19
3.3.1	Sistema di rilevamento . . . . .	20
3.3.2	Il sistema di illuminazione . . . . .	23
3.3.3	Il sistema di controllo . . . . .	24
3.3.4	Il sistema di gestione . . . . .	24
3.4	Gestione dell'impianto attraverso l'applicazione smartphone realizzata . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Studio e valutazione della qualità della luce</b>	<b>31</b>
4.1	Algoritmo per la valutazione dell'illuminamento e temperatura colore . . . . .	31
4.1.1	Calcolo della matrice di trasformazione . . . . .	33
4.1.2	Fase di test della calibrazione . . . . .	35
4.2	Monitoraggio della luce . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Un modello per la caratterizzazione delle sorgenti luminose a LED</b>	<b>43</b>
5.1	Setup di misura . . . . .	47
5.1.1	Fase di Training . . . . .	48
5.1.2	Sviluppo del Modello Matematico . . . . .	49
5.1.3	Fase di Test . . . . .	53

*Indice*

5.2	L'analisi delle performance del modello sviluppato . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Implementazione della rete wireless per applicazioni di rischio ambientale</b>	<b>59</b>
6.1	Una rete Low-Cost per il Monitoraggio Sismico . . . . .	60
6.2	Parametri di studio . . . . .	61
6.3	Sensore Low-Cost sviluppato . . . . .	64
6.4	Test su campo e confronto tra le unità accelerometriche . . . . .	67
6.4.1	Unità accelerometrica di riferimento . . . . .	67
6.4.2	Eventi sismici rilevati . . . . .	68
6.5	Performances raggiunte dall'unità di sensing sviluppata . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>85</b>
	<b>Pubblicazioni</b>	<b>87</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>88</b>

## Elenco delle figure

2.1	Architettura di rete. . . . .	8
2.2	Stack protocollare. . . . .	10
3.1	Diffusione irregolare della luce causata dalla distribuzione asimmetrica delle finestre all'interno della Cappella degli Scrovegni. . . . .	17
3.2	Soluzione IoL realizzata. . . . .	20
3.3	Dislocazione di ciascun nodo sensore. . . . .	21
3.4	Componenti hardware del sistema di rilevamento: unità di rilevamento (a sinistra) e unità principale (a destra). . . . .	21
3.5	Diagramma a blocchi del sistema di rilevamento. . . . .	23
3.6	Diagramma a blocchi del nodo di controllo. . . . .	25
3.7	Interfacce dell'applicazione. . . . .	27
3.8	Stack di Activity. . . . .	28
3.9	Diagramma delle componenti. . . . .	29
4.1	Diagramma a blocchi dell'algoritmo. . . . .	32
4.2	Monitoraggio del Nodo Sensore 2 su una finestra temporale di 10 giorni: (a) l'illuminamento (in rosso); (b) temperatura colore (in nero). . . . .	37
4.3	Monitoraggio del Nodo Sensore 2 in una giornata tipica: (a) l'illuminamento (in rosso); (b) temperatura colore (in nero). . . . .	38
4.4	Acquisizione della temperatura colore (in nero) del Nodo Sensore 4: (a) in una finestra temporale di un mese; (b) e (c) zoom di due giornate della finestra mensile. . . . .	39
4.5	Monitoraggio dell'illuminamento (in rosso) su una finestra temporale di un giorno: (a) Nodo Sensore 2 posizionato sulla facciata con finestre; (b) Nodo Sensore 4 posizionato sulla facciata senza finestre. . . . .	40
4.6	Monitoraggi del Nodo Sensore 2 durante una finestra temporale di un giorno: (a) l'illuminamento (in rosso) in una giornata d'autunno; (b) la temperatura colore (in nero) durante una giornata d'autunno; (c) l'illuminamento (in rosso) durante una giornata d'inverno; (d) la temperatura colore (in nero) in una giornata d'inverno tipica. . . . .	42

*Elenco delle figure*

5.1	Andamento esponenziale della curva di dimmerazione del segnale luminoso nel LED delle sorgenti luminose, necessario per avere una percezione lineare dell'aumento dell'intensità della luce a partire da un andamento logaritmico della sensibilità dell'occhio umano; in blu è rappresentato il segnale dell'illuminamento. . .	45
5.2	Andamento dell'illuminamento (in blu) lineare nel controller del LED ed esponenziale nei LED driver, necessarie per avere una risposta esponenziale nel LED. . . . .	45
5.3	I valori medi della temperatura di giunzione del canale freddo (indicato con Cool, blu) e del canale caldo (indicato con Warm, rosso) delle sorgenti luminose a LED, in funzione del tempo in minuti. . . . .	46
5.4	Setup di misura: (a) architettura realizzata; (b) sfera usata per le misure. . . . .	48
5.5	Curva di superficie media della CCT in funzione della percentuale di alimentazione, rappresentativa dell'intera famiglia di sorgenti luminose a LED, con le rispettive curve di livello. . . .	50
5.6	Curva di superficie media dell'illuminamento in funzione della percentuale di alimentazione, rappresentativa dell'intera famiglia di sorgenti luminose a LED, con le rispettive curve di livello. . .	51
5.7	Superficie polinomiale rappresentante l'illuminamento. . . . .	51
5.8	Superficie polinomiale rappresentante la CCT; in basso l'approssimazione effettuata nel range $50 < P_c \leq 100$ , $50 < P_w \leq 100$ . . . . .	52
5.9	Interfaccia sviluppata per ricavare la potenza dei canali (freddo e caldo) in funzione della temperatura colore e dell'illuminamento richiesti. . . . .	53
5.10	Distribuzione delle differenze relative percentuali della CCT in funzione della potenza di ingresso. . . . .	55
5.11	Istogramma delle differenze relative percentuali della CCT sulle due sorgenti luminose a LED usate per la fase di test. . . . .	55
5.12	Distribuzione delle differenze relative percentuali dell'illuminamento in funzione della potenza di ingresso. . . . .	56
5.13	Istogramma delle differenze relative percentuali dell'illuminamento sulle due sorgenti luminose a LED usate per la fase di test. . . . .	56

6.1	Esempio di una forma d'onda sismica registrata da un accelerometro dell'INGV; le tracce colorate evidenziano le fasi delle onde P (in blu) e S (in arancione), inoltre sono anche indicate le tre finestre di analisi: finestra del rumore (nw), finestra della fase P (pw) e finestra della fase S (sw). . . . .	62
6.2	Schema a blocchi dell'unità accelerometrica sviluppata. . . . .	65
6.3	Foto delle unità MEMS montate ortogonalmente tra loro su un cubo di metallo. . . . .	66
6.4	Posizionamento della stazione TEST (composta dagli accelerometri Colibrys) a pochi centimetri dall'unità accelerometrica della stazione GUMA. . . . .	68
6.5	Posizione della stazione sismica GUMA e degli eventi sismici selezionati per l'analisi. . . . .	69
6.6	Distribuzione dei valori <i>rms</i> delle fasi P in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione GUMA. . . . .	71
6.7	Distribuzione dei valori <i>rms</i> delle fasi P in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione TEST. . . . .	72
6.8	Distribuzione dei valori <i>rms</i> delle fasi S in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione GUMA. . . . .	73
6.9	Distribuzione dei valori <i>rms</i> delle fasi S in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione TEST. . . . .	74
6.10	Distribuzione delle differenze relative percentuali dei parametri PGA, PGV, SIH e AI in funzione della magnitudo. . . . .	76
6.11	Distribuzione delle differenze relative percentuali dei parametri $S_{AT}(0, 1)$ , $S_{AT}(0, 3)$ , $S_{AT}(1)$ e $S_{AT}(3)$ in funzione della magnitudo. . . . .	77
6.12	Forme d'onda accelerometriche dell'evento di magnitudo 2.5 registrate dalla stazione GUMA (arancione) e dalla stazione TEST (verde): (a) componente accelerometrica Z; (b) componente accelerometrica N; (c) componente accelerometrica E. . . . .	79
6.13	Forme d'onda accelerometriche dell'evento di magnitudo 3.0 registrate dalla stazione GUMA (arancione) e dalla stazione TEST (verde): (a) componente accelerometrica Z; (b) componente accelerometrica N; (c) componente accelerometrica E. . . . .	80
6.14	Forme d'onda accelerometriche dell'evento di magnitudo 5.9 registrate dalla stazione GUMA (arancione) e dalla stazione TEST (verde): (a) componente accelerometrica Z; (b) componente accelerometrica N; (c) componente accelerometrica E. . . . .	81
6.15	Le cross-correlazioni tra le corrispondenti componenti (Z, N, E) di GUMA e TEST durante i tre terremoti: (a) $M_L = 2.5$ ; (b) $M_L = 3.0$ ; (c) $M_L = 5.9$ . . . . .	82

*Elenco delle figure*

6.16 Sovrapposizione delle Densità Spettrali di Potenza (PSD) tra le  
corrispondenti componenti (Z, N, E) di GUMA (arancione) e di  
TEST (verde) durante i tre eventi: (a)  $M_L = 2.5$ ; (b)  $M_L = 3.0$ ;  
(c)  $M_L = 5.9$ . . . . . 83



## Elenco delle tabelle

4.1	Acquisizioni ed errori percentuali delle misurazioni di un nodo sensore rispetto allo spettrofotometro Konica Minolta CL-500. . .	36
6.1	Percentuale di eventi per la quale è possibile rilevare le fasi P e S delle forme d'onda registrate dalla stazione TEST. Dei 6764 eventi sismici selezionati, appartenenti al range 16 km÷40 km dalla stazione TEST, sono state classificate in funzione della magnitudo. . . . .	75
6.2	Lista dei 3 eventi sismici selezionati come esempi rappresentativi dei 6764. . . . .	78



# Capitolo 1

## Introduzione

La ricerca, svolta nei tre anni di dottorato, ha condotto ad un'importante attività di sviluppo, prototipazione e test di Wireless Sensor Network con relative applicazioni orientate all'Internet of Things (IoT), innovative sia dal punto di vista della ricerca che della tecnologia. Principalmente l'attività si è focalizzata sul monitoraggio ambientale, con l'obiettivo da un lato di creare una rete IPv6 in grado di controllare l'illuminamento e la temperatura colore, dall'altro di sviluppare e ottimizzare unità di sensing capaci di rilevare fenomeni fisici.

Nell'ambito delle Wireless Sensor Networks per applicazioni di Smart Lighting è stata realizzata un'architettura completa per la gestione dei sistemi di illuminazione, utile per scopi estetici e percettivi, ma non solo, in quanto la luce può interferire con i processi biologici controllati dai ritmi circadiani endogeni, con possibili conseguenze negative sulla salute umana. Tale architettura si basa sull'impiego di una rete mesh IPv6, dove tutti i suoi componenti sono direttamente collegati a Internet e tra loro, creando così in maniera efficace il paradigma dell'Internet of Things. In particolare, nel corso dell'attività di dottorato ci si è focalizzati soprattutto sul sistema di gestione, sviluppando interamente una applicazione per dispositivi mobili, basata sul sistema operativo Android, di seguito descritta. L'applicazione è una soluzione software che consente di controllare da remoto l'intero sistema di illuminazione. In seguito se ne illustrerà in dettaglio il caso d'uso, ossia l'implementazione nel Cultural Heritage. Con l'obiettivo di fornire una soluzione dinamica che regoli in tempo reale la luce, per soddisfare sia le esigenze degli utenti che generare una luce di comfort per gli scenari delicati, è essenziale conoscere come i corpi illuminanti del sistema siano caratterizzati in termini di illuminamento e temperatura colore. A tale scopo verrà descritto il metodo sviluppato con cui si è ricavato un modello matematico rappresentativo dei parametri illuminotecnici dei corpi illuminanti. Il metodo utilizzato è stato progettato in modo da essere efficiente ed innovativo rispetto le classiche metodologie iterative utilizzate oggi e presenti in letteratura. In seguito a una fase di acquisizione dati, rilevati da uno spettrofotometro di illuminamento, si è ottenuto il modello matematico sulla base del metodo dei minimi quadrati. Questo modello matematico garantisce

## *Capitolo 1 Introduzione*

una luce emessa, adatta allo scenario applicativo, con bassi livelli di potenza e di conseguenza con bassi consumi. Il modello matematico è in grado di fornire valori univoci e precisi di alimentazione dei corpi illuminanti, così da ottenere la qualità della luce desiderata. Inoltre, è stata realizzata un'interfaccia in grado di fornire i valori di alimentazione delle sorgenti luminose sulla base dei parametri di illuminamento e temperatura colore impostati dall'utente.

Nell'ambito delle unità di sensing in grado di rilevare fenomeni fisici, è stato sviluppato un dispositivo low-cost per il monitoraggio sismico. Tale unità è composta da sensori accelerometrici a basso costo. Attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti è stato possibile effettuare confronti di prestazione con le acquisizioni delle stazioni sismiche della rete nazionale, da cui si è evinto come le unità di sensing a basso costo realizzate permettono un'accurata precisione nel rilevare gli eventi sismici, dalle basse fino alle elevate magnitudo. Questi risultati garantiscono il loro impiego nella realizzazione di reti capillari di monitoraggio sismico e strutturale, finalizzate alla prevenzione del collasso di strutture strategiche, come scuole e ospedali, la realizzazione di mappe di scuotimento e di sistemi di Earthquake Early Warning (EEW).

## Capitolo 2

# Wireless Sensor Network per l'Internet of Things

Il neologismo Internet of Things (IoT), usato per la prima volta da Kevin Ashton durante una presentazione presso Procter & Gamble nel 1999, sta ad indicare tutti gli oggetti del mondo reale connessi a Internet [1]. Lo sviluppo delle tecnologie ha reso possibile la diffusione dell'IoT, interessando non più solo gli oggetti reali della vita di tutti i giorni, ma anche i luoghi, le persone e gli animali. Questa connessione globale a Internet ha realizzato un mondo intelligente, che consente di controllare, monitorare e rilevare dati da remoto. La principale sfida dell'IoT sta nel raggiungere la standardizzazione tecnologica che ad oggi, nella maggior parte delle aree, risulta ancora frammentata. Oggi esistono solo soluzioni per silos applicativi e non sono disponibili concetti unificanti coerenti. Esistono molte soluzioni insulari, vale a dire illuminazione, domotica, misurazione dell'energia, monitoraggio ambientale, ecc., con scarso riutilizzo intersettoriale della tecnologia e scambio di conoscenze. In sostanza, esistono solo Intranets of Things [2].

L'IoT intravede enormi potenzialità e possibilità in nuovi servizi, stimolando i cambiamenti nelle industrie e incoraggiando iniziative come IPSO Alliance (Internet Protocol for Smart Objects). Esistono molte sfide da affrontare per soddisfare le esigenze specifiche di ciascun settore applicativo. Ad esempio, per le industrie dell'illuminazione che si stanno muovendo verso la direzione dell'Internet of Lights (IoL), un'interessante proposta è l'architettura aperta per sistemi di illuminazione a stato solido intelligente (OpenAIS), che si rileva essere superiore in diversi indicatori di prestazioni chiave (come sicurezza, interoperabilità, estensibilità e apertura) rispetto i sistemi proprietari [3].

Le Wireless Sensor Networks (WSN) sono reti di sensori wireless che concretizzano il significato dell'IoT, creando una rete di nodi diffusa nell'ambiente con l'obiettivo di raccogliere e trasmettere informazioni. Con gli ultimi progressi nell'elettronica e nelle telecomunicazioni, la tecnologia delle WSN sta diventando sempre più importante e diffusa. Attraverso l'IoT ogni nodo ha un proprio indirizzo IPv6 e quindi risulta direttamente accessibile da remoto [4].

Ad oggi le WSN non sono più strutture chiuse, ovvero un insieme di sensori che monitorano determinate grandezze fisiche per inviarle a un nodo collettore [5], il quale elabora e invia le informazioni alla rete internet, ma, grazie all'evoluzione delle tecnologie, le WSN sono diventate strutture interconnesse sia tra loro che con il World Wide Web.

## 2.1 Reti di Sensori Wireless

Le WSN sono reti di nodi sensore intelligenti, quindi dotati di connettività wireless, di dimensioni miniaturizzate e bassa complessità, diffusi nell'ambiente per raccogliere, elaborare e trasmettere informazioni [6]. Perciò sono in grado di effettuare operazioni di sensing, processare localmente le informazioni e comunicare da remoto.

Le salienti caratteristiche di una WSN sono:

- affidabilità;
- versatilità;
- elevato numero di nodi;
- basso costo, scarso peso e piccole dimensioni di ogni nodo;
- basso consumo energetico;
- topologia di rete flessibile;
- protocolli leggeri e poco complessi;
- gestione del traffico in base a criteri di priorità (QoS).

Ciascun nodo della WSN è costituito da un'unità di sensing, un processore per effettuare semplici elaborazioni e/o signal processing, un trasmettitore wireless e un'unità di alimentazione.

Nella realizzazione di una WSN ci sono tre aspetti fondamentali da tenere in considerazione:

- consumo energetico, è necessario ottimizzare i codici e le operazioni di calcolo del processore e limitare il numero di trasmissioni per rendere più lunga la vita di ciascun nodo, di solito alimentato con una batteria e spesso posizionato in luoghi non facilmente raggiungibili;
- dimensione, è necessario miniaturizzare il più possibile ciascun nodo per renderlo meno invasivo, influenzando direttamente le applicazioni possibili;

- costo, è importante che ogni nodo sia low-cost, sia per la scelta dei componenti hardware che per lo sviluppo del software, affinché si possa ottenere una massiccia diffusione della rete.

Le dimensioni di una WSN possono essere enormi, in termini di nodi sensore, di conseguenza la mole di dati e le velocità di trasmissione influenzano in maniera diretta la vita della rete, aspetto che nel caso di alimentazione a batteria risulta ancora più importante. Inoltre miniaturizzando il più possibile ogni nodo si andrà ad impattare sul costo della progettazione. Per questi motivi i tre aspetti elencati precedentemente sono tra loro contrastanti, pertanto in ogni specifica applicazione è necessario trovare un buon compromesso per realizzare la giusta e bilanciata soluzione.

## 2.2 Scenari Applicativi

Le WSN fanno parte di un'area di studio molto attiva dal punto di vista dell'innovazione tecnologica.

Gli oggetti che ci circondano, dotati di una propria intelligenza artificiale, sono in grado di prendere decisioni autonome sulla raccolta, fusione, aggregazione, immagazzinazione dei dati ed eventuale segnalazione di allarmi.

Nelle reti ogni nodo sensore ha un identificativo univoco e raccoglie informazioni in tempo reale. Sulla base delle finalità della rete si può fare una prima suddivisione: monitoraggio; riconoscimento di eventi/allarmi; classificazione di oggetti; tracciamento di oggetti/persone; ecc.

Oltre a questa prima suddivisione si possono descrivere i principali scenari applicativi delle WSN:

- Militar Control, monitoraggio delle forze, sorveglianza di luoghi strategici [7]; è il primo settore in cui sono state usate le reti di sensori.
- Environmental and Structural Monitoring, monitoraggio ambientale, quali acqua, aria, terreno, non di meno rilevazione di catastrofi naturali, come terremoti, incendi, eruzioni vulcaniche, alluvioni, ecc., manutenzione delle infrastrutture e dei materiali e studio dello stato di salute di ponti, dighe, edifici, ecc., sia in situazione di quiete che quando sottoposti a sollecitazioni esterne [8, 9].
- Smart Cities, monitoraggio del traffico stradale, come analisi dell'intensità e velocità del traffico, individuando situazioni anomale e definendo percorsi agevolati e tracciamento dei veicoli [10].
- Infrastructure Control, sorveglianza e sicurezza domestica e di luoghi pubblici [11].

- Smart Home, per applicazioni che ricadono nel settore della domotica [12].
- Health Care, monitoraggio dei parametri fisiologici da remoto, tracciamento dei dottori, pazienti e della strumentazione, assistenza agli anziani e valutazioni diagnostiche [13, 14, 15].
- Agriculture Sensing, per l'agricoltura di precisione, monitoraggio in tempo reale del livello di pesticidi nell'acqua o nei terreni e dell'irrigazione [16].
- Industrial Sensing, controllo dei processi industriali, diagnosi dei macchinari, analisi degli stress meccanici per prevenire guasti e gestione dell'inventario [17].

Le applicazioni su cui possono essere impiegate le WSN sono delle più svariate, quelle elencate sono solo alcuni esempi. Variando l'unità di sensing di ciascun nodo della rete, aggiungendo i sensori più appropriati, una stessa tipologia di rete può essere resa adatta a più contesti applicativi.

## 2.3 **Wireless Sensor Network per Applicazioni di Environmental Monitoring**

Lo scenario applicativo dell'Environmental Monitoring descrive i processi e le attività che devono aver luogo per la conoscenza e la gestione delle problematiche ambientali, a supporto della pianificazione, della valutazione e delle politiche ambientali. La progettazione e la realizzazione delle Wireless Sensor Network per queste applicazioni prevedono:

- la scelta delle aree da monitorare;
- l'individuazione del numero, della tipologia e dell'ubicazione delle stazioni di monitoraggio, in relazione alle caratteristiche del territorio ed agli eventi da investigare;
- creazione di sistemi di gestione e di controllo della rete.

Le principali applicazioni dell'IoT in questo settore riguardano la protezione e il monitoraggio delle risorse naturali, come la rilevazione di incendi boschivi, l'inquinamento atmosferico, la prevenzione di frane e valanghe, la diagnosi precoce dei terremoti, la qualità dell'aria, la qualità della luce, la qualità dell'acqua, le perdite d'acqua, le alluvioni dei fiumi, e molto altro ancora.

Il presente lavoro si focalizzerà principalmente su due applicazioni specifiche delle WSN per il monitoraggio ambientale. Verrà illustrato come un insieme di



sensori che compongono una rete, distribuiti nell'ambiente, hanno lo scopo di cooperare tra loro per rilevare fenomeni fisici, monitorare livelli di temperatura, umidità e illuminamento presenti nell'ambiente, oltre ad acquisire le informazioni relative agli spostamenti provenienti da accelerometri [18]. In quest'ultimo caso, monitorando le accelerazioni del suolo, la rete diffusa di sensori consente di prevenire catastrofi naturali mandando segnali di allerta attraverso sistemi di Earthquake Early Warning.

In dettaglio, verranno descritti gli sviluppi e test delle principali due applicazioni riguardanti il controllo di un impianto di illuminazione e il monitoraggio sismico. Nel primo campo si illustrerà il sistema di gestione e il modello matematico che caratterizza in termini illuminotecnici i corpi illuminanti, per poter sviluppare un possibile algoritmo di controllo in real-time del sistema di illuminazione. Mentre nell'altro si metteranno in evidenza le performance e i limiti dei nodi sensore della WSN, col fine di proporre un sistema in grado di rafforzare e integrare la rete sismica nazionale.

## 2.4 Architettura di rete di riferimento

L'architettura di rete utilizzata per lo sviluppo del progetto e per le verifiche sul campo delle soluzioni implementate, consiste in una rete wireless con topologia mesh formata da nodi sensore molto piccoli e di basso costo che integrano protocolli e applicazioni all'interno di essi (come i protocolli di routing e di rete, protocolli di trasporto, ecc.). La rete è eterogenea in quanto può includere una varietà di nodi, come sensori per il monitoraggio ambientale, attuatori, o sensori indossabili per il monitoraggio dei movimenti dell'individuo.

I nodi possono essere fissi o mobili e possono essere alimentati da batteria o alimentazione principale a seconda dell'applicazione. Per gli studi condotti e qui riportati, si è usato un hardware dei nodi progettato per essere estremamente adattabile ai nostri due casi d'uso di interesse.

L'innovativa Wireless Sensor Network utilizzata in questo lavoro, integra nodi sensore con un proprio indirizzo IPv6 univoco che, li rende direttamente collegati a Internet e accessibili da remoto. Ogni nodo fa parte della stessa rete mesh  $\mu$ IPv6 (micro Internet Protocol version 6) autoinstallante e autoconfigurante [19]. Le principali specifiche dell'architettura della WSN di riferimento sono: il numero estremamente variabile di nodi; la rete dinamica e continuamente riconfigurata; il basso costo; il basso consumo energetico; la connettività Internet; e infine, la gestione remota della rete. L'architettura completa è mostrata in Figura 2.1.

I principali componenti della rete sono:

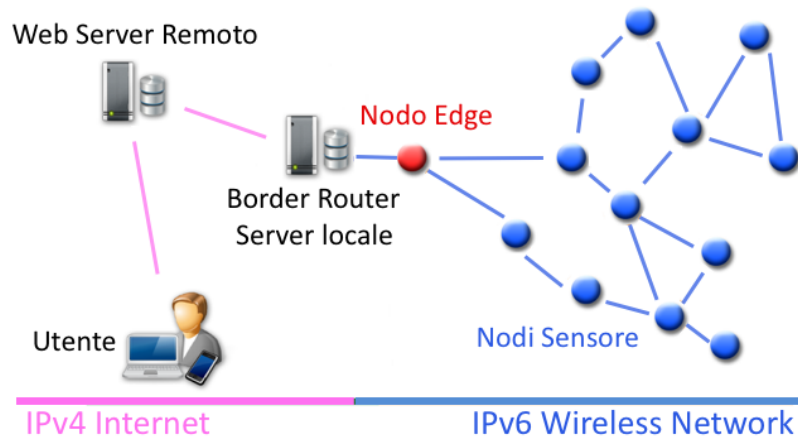


Figura 2.1: Architettura di rete.

- *il nodo sensore*: rappresenta il nucleo dell'architettura di rete implementata; nodi che appartengono alla rete possono essere di diversi tipi: sensori, attuatori, ecc. Attraverso le capacità di elaborazione integrate, a bordo di ogni nodo si eseguono azioni di rilevamento e/o attuazione, come ad esempio l'acquisizione e l'analisi in tempo reale di quantità ambientali. I nodi sensore attraverso il loro indirizzo IPv6 univoco sono direttamente raggiungibili da remoto, diventando parte integrante di Internet. All'accensione, ogni nodo calcola il suo indirizzo IPv6 tramite Stateless Address Autoconfiguration (SLAAC) utilizzando l'identificatore univoco di proprietà del microcontrollore equipaggiato dal dispositivo, la rete si autoconfigura grazie al protocollo Neighbor Discovery (ND) creato per IPv6 e basato su ICMPv6 (Internet Control Message Protocol version 6) [20]. ND e Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (RPL) lavorano in sinergia per creare e mantenere la rete e la raggiungibilità dei nodi, anche in presenza di perdita o movimento dei sensori. In ciascun nodo sensore è stato implementato un server CoAP (Constrained Application Protocol) ed è possibile accedere a qualsiasi risorsa specifica con i metodi CoAP / REST (Representational State Transfer);

## 2.4 Architettura di rete di riferimento

- *il nodo Edge*: è il coordinatore della WSN e instrada anche i dati tra una rete IP esterna e la WSN. Come mostrato in Figura 2.1, il nodo Edge è collegato al Border Router che fornisce la connessione a Internet globale. Tramite questa connessione Internet fornita dal Border Router, il nodo perimetrale funge da punto di accesso per i nodi sensore appartenenti alla WSN;
- *il Border Router*: è il punto di accesso a Internet tramite una pluralità di interfacce di rete cablata / wireless come WiFi, Ethernet, GSM / 3G / 4G, ecc. Stabilisce la connessione tra il nodo perimetrale e Internet globale. Collegando la WSN a Internet, il Border Router è responsabile della conversione degli indirizzi IPv4-IPv6. Integra funzionalità aggiuntive come un Web Server locale e un database locale (utile in caso di mancanza di connessione a Internet), ma per incorporare un Web Server locale personalizzato, il Border Router deve essere dotato di capacità di calcolo e archiviazione adeguate;
- *il Web Server Remoto*: consente all'utente di monitorare, controllare e gestire la rete utilizzando un semplice browser Web; incorpora funzionalità che vanno dalle operazioni di navigazione Web più semplici a quelle di gestione più complesse e utilizza contenuti forniti dai nodi della WSN nella creazione di servizi in base all'applicazione e alle specifiche desiderate. Consente la comunicazione remota e bidirezionale con i nodi sensore e, inoltre, è altamente scalabile e compatibile con qualsiasi tipo e formato di dati. La piattaforma prevede la creazione di profili di accesso personalizzati e l'accessibilità da qualsiasi piattaforma, garantendo così l'interoperabilità con la pluralità di sistemi sul mercato.

Un sistema operativo è essenziale nelle applicazioni delle WSN, pur esistendo svariate tipologie come ad esempio FreeRTOS, TinyOS, Contiki OS, per il nostro sistema ci si è basati proprio su quest'ultimo. Contiki OS è stato scelto per la sua modularità, leggerezza e adattabilità ai dispositivi con basse capacità di elaborazione e memoria. Inoltre, il sistema operativo consente all'utente di realizzare applicazioni personalizzate che possono essere caricate in fase di esecuzione.

Per la parte firmware, il gruppo di ricerca, con l'obiettivo di sviluppare applicazioni IoT e quindi soddisfare tutti i requisiti derivanti, ha studiato i migliori protocolli di comunicazione più adatti per le WSN portando all'implementazione della soluzione mostrata in Figura 2.2, presentando ulteriori valori aggiunti, come la versatilità e scalabilità della rete.

Lo stack protocollare della pila ISO-OSI è illustrato in Figura 2.2. Su ciascun livello troviamo:

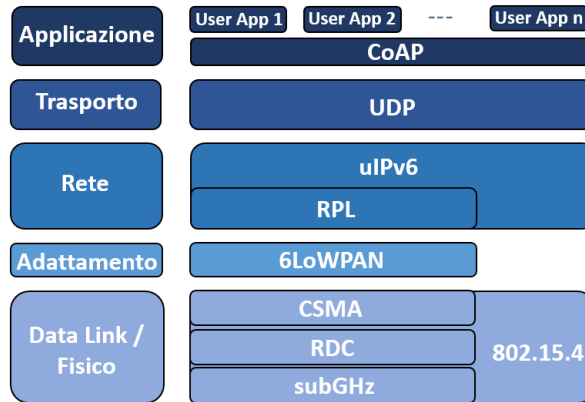


Figura 2.2: Stack protocollare.

- Livello fisico e Data Link: basato sullo standard 802.15.4. Il protocollo CSMA viene utilizzato al MAC Layer e un ulteriore livello di Radio Duty Cycle viene utilizzato per le funzioni di risparmio energetico e framing.
- Livello di adattamento: il protocollo 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) garantisce i meccanismi di frammentazione e riassettaggio, la compressione dell'intestazione e la mappatura degli indirizzi da IPv6 a IPv4.
- Livello di rete: la compatibilità con il protocollo IP è garantita grazie all'implementazione di uIP. L'indirizzamento è con lo standard IPv6, e per soddisfare i requisiti tipici delle reti di sensori wireless, viene utilizzato il protocollo RPL per raggiungere un elevato grado di vita della rete e un tempo di configurazione basso anche in presenza di nodi in mobilità o morti [21]. Questo protocollo è utilizzato per una gestione automatica ed efficiente delle rotte.
- Livello di trasporto: il protocollo di comunicazione si basa su UDP (User Datagram Protocol).
- Livello di applicazione: è implementato un protocollo orientato, per dispositivi integrati e progettato per una facile traduzione dell'Hypertext Transfer Protocol (HTTP), cioè il CoAP (Constrained Application Protocol). Questo protocollo consente di costruire le applicazioni WSN in cima all'architettura REST (Representational State Transfer) e permette agli utenti di interagire con i nodi mediante un comune browser Web [22]. Le applicazioni personalizzate dell'utente si trovano al livello superiore del firmware e possono fare riferimento all'API rese disponibili dai livelli sottostanti.

L'architettura di rete presentata può essere opportunamente personalizzata, in effetti ciascun nodo, ospitante l'intero stack protocollare, può integrare diverse funzioni di rilevamento e controllo per adattarsi a scenari applicativi differenti rendendo cooperative, su un'unica infrastruttura di rete, diverse aree operative. Questo è possibile andando a modificare e/o integrare in ogni nodo l'unità di sensing.

## 2.5 Casi d'uso

L'innovativa architettura di rete, presentata precedentemente, può essere implementata in diversi scenari applicativi. In particolare, prendendo in considerazione la prima delle due applicazioni che andremo a illustrare, i nodi sensore possono essere customizzati al fine di monitorare e controllare in modo efficiente i sistemi di illuminazione in scenari complessi, come quello dei beni culturali, ma non solo. La realizzazione crea efficacemente il paradigma dell'Internet of Things, poiché tutti i suoi componenti sono direttamente collegati a Internet e tra loro grazie agli indirizzi IPv6 globali. Il nuovo sistema di illuminazione IoT rappresenta un progetto di "ripristino della percezione" perché i corpi illuminanti possono essere controllati in intensità e temperatura colore in base alla luce naturale e al rendering desiderato. Nella fase iniziale, i sensori appositamente progettati misurano le variazioni di illuminazione interna estendendo questo monitoraggio per un tempo sufficiente a determinare le azioni di controllo appropriate. La disposizione di sensori consente un rilevamento continuo così da elaborare un modello più completo dell'apporto di luce naturale che tiene conto anche delle variazioni dovute alle condizioni meteorologiche. I sensori misurano sia la quantità di luce (lux) che la temperatura colore (CCT) della luce. Le informazioni raccolte sulla variazione della luce (naturale) sono alla base della determinazione delle configurazioni che permetteranno al sistema di illuminazione di autoregolarsi al variare delle condizioni luminose (l'applicazione reale, nonché di studio, è stata installata presso la Cappella degli Scrovegni, a Padova, Italia). Oggi grazie alla combinazione delle tecnologie Tunable White e IoT si può sviluppare una soluzione in cui la luce artificiale si relaziona e integra alla luce naturale. Il sistema, oltre a regolare l'illuminamento e la temperatura colore per scopi estetici e percettivi, può anche monitorare e controllare in tempo reale una vasta varietà di parametri ambientali, fondamentali per la conservazione del patrimonio culturale. Il controllo dell'esposizione alla luce artificiale è importante anche in altri contesti poiché la luce può interferire con i processi biologici controllati da ritmi circadiani endogeni, con possibili conseguenze negative per i risultati sulla salute.

Infine, questa soluzione architettonica può essere estesa a un sistema Smart City completo che integra il patrimonio culturale come uno degli innumere-

## *Capitolo 2 Wireless Sensor Network per l'Internet of Things*

voli elementi da monitorare e controllare in città [23]. Tale prospettiva può migliorare gli scenari attuali e nello stesso tempo può consentire nuovi servizi offerti ai cittadini, con una serie di vantaggi in termini di riduzione dei costi operativi e semplificazione delle operazioni di gestione. Proprio in quest'ottica rientra anche il secondo caso d'uso, che verrà presentato successivamente, il quale, offrendo un sistema per il monitoraggio sismico e strutturale, permette di rafforzare i sistemi di sicurezza e salvaguardia degli individui.

## Capitolo 3

# Un Sistema IoT Innovativo per la Cappella degli Scrovegni

In questo capitolo descriveremo il sistema IoT realizzato per il monitoraggio e la regolazione dell'illuminazione all'interno della Cappella degli Scrovegni a Padova [24]. Se ne illustrerà la sua effettiva applicazione a un settore particolarmente interessante come quello del Cultural Heritage (CH), in particolare, come vedremo anche nei successivi capitoli, ci focalizzeremo sullo studio della qualità della luce, tematica cruciale e delicata nell'ambito della conservazione e manutenzione dei patrimoni artistici.

In edifici storici, nei musei o nelle gallerie d'arte la questione della progettazione dell'illuminazione è complessa e influenzata da più problematiche, come ad esempio:

- illuminazione naturale;
- parametri ambientali (temperatura ambiente, umidità, polveri, agenti inquinanti, ecc.);
- flusso di visitatori;
- correlazione tra efficienza e resa cromatica.

Pertanto, la realizzazione del nuovo impianto deve seguire uno studio a lungo termine, in grado di relazionare il sistema di illuminazione con il gran numero di variabili che possono sussistere all'interno di quello scenario. Per intraprendere azioni correttive immediate, volte a salvaguardare gli aspetti puramente estetici e conservativi del bene culturale, è molto importante la disponibilità di strumenti che effettuano controlli in tempo reale delle variabili ambientali.

Lo stato dell'arte propone, nei siti culturali mondiali, applicazioni limitate solo al monitoraggio di un sottoinsieme dei parametri di interesse precedentemente elencati, senza fornire una correlazione e un controllo di essi. Le soluzioni implementate in letteratura, ricorrono a sistemi proprietari, che utilizzano svariate architetture complesse con diversi protocolli di comunicazione.

Altri lavori di ricerca sono incentrati sul controllo dell'illuminazione in diversi scenari applicativi, tutti con lo scopo principale del risparmio energetico, attenuazione dell'illuminazione o comfort visivo, ma nessuno di questi studi si focalizzano sulla qualità della luce in termini di spettro luminoso, interessandosi solo dell'intensità luminosa [25, 26, 27].

Nel campo del patrimonio culturale, sono state proposte soluzioni IoT, ma non inerenti al monitoraggio e al controllo in tempo reale della qualità della luce attraverso sensori e attuatori, perciò non sono state proposte applicazioni finalizzate al restauro percettivo delle opere d'arte e alla loro conservazione [28].

Inoltre, le soluzioni proposte prevedono: o raccolte di dati estemporanee in offline in schede SD senza fornire alcuna infrastruttura di acquisizione e comunicazione in tempo reale [29]; o, laddove sia installata l'infrastruttura di comunicazione, vengono utilizzate soluzioni proprietarie senza includere nei sistemi proposti le azioni correttive [30, 31].

Per questo motivo, tali sistemi [32]:

- mancano in termini di replicabilità ed espandibilità del numero di unità di rilevamento;
- comportano una realizzazione complessa delle relative funzioni di controllo e una difficile implementazione del sistema di gestione generale;
- consentono una comunicazione ad Internet attraverso l'uso di un gateway multiprotocollo;
- sono finalizzati a un'unica applicazione, limitati a specifici sistemi di monitoraggio di determinate quantità particolari;
- sono volti a non fornire funzioni di controllo per la prevenzione dei problemi di natura conservativa e per la risoluzione in tempo reale delle condizioni critiche;
- non affrontano il problema nella corretta prospettiva IoT, ovvero la proposta di una rete di oggetti intelligenti eterogenei, capaci di adempiere a diverse funzioni di monitoraggio e controllo, direttamente connessi a Internet attraverso protocolli aperti.

Alla luce di queste considerazioni la soluzione IoT sviluppata e di seguito illustrata, ha l'obiettivo di unificare e mettere insieme i concetti elencati per creare un'architettura completa che, attraverso sensori e attuatori, permetta il monitoraggio e il controllo dell'illuminazione nel campo del patrimonio culturale.

Il nostro studio cerca di colmare le carenze, con un'architettura IoT che incorpora unità di illuminazione e rilevamento del colore, appositamente testate



### 3.1 Argomento di studio: Cappella degli Scrovegni

e calibrate, mostrando sensibilità e accuratezza elevate, adeguate alla gestione del flusso di illuminazione.

## 3.1 Argomento di studio: Cappella degli Scrovegni

La Cappella degli Scrovegni è un sito di culto cattolico situato nel centro storico di Padova, in Italia, contenente un ciclo di affreschi di Giotto dell'inizio del XIV Secolo. La Cappella è anche conosciuta con il nome Cappella dell'Arena perché fu costruita su un terreno acquistato da Enrico Scrovegni che confinava con un anfiteatro romano, noto come l'Arena. La Cappella, dedicata a Santa Maria della Carità e affrescata tra il 1303 e il 1305 da Giotto, è considerata uno dei più grandi capolavori dell'arte occidentale. La navata è lunga 20,88 m, larga 8,41 m e alta 12,65 m (ha le dimensioni 20,88x8,41x12,65 m), mentre l'area absidale è composta da una prima area quadrata (4,49 m di profondità e 4,31 m di larghezza) ed una seconda pentagonale (2,57 m di profondità). Gli affreschi ricoprono tutte le superfici interne della Cappella, donando al sito un'enorme profondità, che lo fa percepire più grande di quello che è, oltre a regalare al visitatore la sensazione di essere totalmente immerso nella scena. Il dipinto prosegue anche sul soffitto dove si può ammirare un cielo blu tempestato di stelle con figure Sante. Lungo le pareti nord e sud della Cappella, si sviluppano i cicli incentrati sulla vita di Cristo e della Vergine Maria, che celebra il suo ruolo nella salvezza umana. I dipinti sono organizzati in modo molto rigoroso secondo tre registri che iniziano dall'alto e si spostano verso il basso. È come una specie di spirale che racconta una storia continua. La riproduzione comincia dai nonni di Cristo, continuando con la nascita di Maria, seguita dal suo matrimonio, per concludersi, nel secondo registro, con la vita di Cristo. Nel registro inferiore troviamo la Passione, i Vizi e le Virtù; in questi affreschi si sono utilizzati anche pannelli in grisaglia, ossia pannelli con tonalità di grigio per imitare l'effetto del rilievo. Sul lato ovest della Cappella si trova il Giudizio Universale, con il quale termina la storia della salvezza umana. Nel Giudizio Universale vediamo Cristo in cima, alla Sua sinistra i dannati e a destra i beati. L'intero ciclo termina all'apice dell'arco trionfale, sul lato est, con Dio che chiama Gabriele per l'Annunciazione.

Gli affreschi della Cappella degli Scrovegni sono sempre stati considerati il primo capolavoro maturo di Giotto e allo stesso tempo un'importante pietra miliare nello sviluppo della pittura occidentale. Per questo motivo, la Cappella degli Scrovegni è stata nominata patrimonio mondiale dell'UNESCO. Dal 1880 la Cappella fu acquisita dalla città di Padova, che ha provveduto nel tempo ad eseguire vari interventi conservativi agli affreschi. Inoltre, essendo oltre 300.000 i visitatori da tutto il mondo che ogni anno scelgono di visitare la Cappella degli Scrovegni per apprezzare il capolavoro di Giotto, per non compromettere la

conservazione degli affreschi, il forte flusso di visitatori è gestito da una nuova modalità di accesso, molto più controllata, e dall'installazione di un nuovo impianto di trattamento dell'aria. Non di meno, a far parte del programma volto a valorizzare il patrimonio culturale e architettonico di Padova e a migliorare l'efficienza energetica della città, c'è anche la progettazione di un nuovo impianto illuminotecnico della Cappella degli Scrovegni.

Con l'obiettivo di creare un'esperienza emotiva e coinvolgente, valorizzando i magnifici colori dell'arte di Giotto, il progetto illuminotecnico coinvolge il Comune di Padova, sotto la supervisione della Commissione interdisciplinare per la conservazione e il restauro della Cappella degli Scrovegni e la stretta collaborazione con la sezione Fotometria dell'Alto Istituto per la Conservazione e il Restauro.

### **3.1.1 La problematica delle condizioni di illuminazione**

La Cappella degli Scrovegni, essendo originariamente addossata al Palazzo Scrovegni, presenta una struttura asimmetrica, con la disposizione di sei finestre sulla sola facciata sud. La dislocazione di queste finestre provoca una distribuzione irregolare della luce solare, generando effetti di controllo, accentuati nelle ore centrali e pomeridiane del giorno, lasciando così la parete con le finestre con meno luce naturale di quella opposta (Figura 3.1). Questo fenomeno, oltre a impedire una corretta visione delle opere, costringe a sbilanciare l'illuminazione artificiale, per rendere uniforme la luce presente nella Cappella e per rispettare i limiti stabiliti per la conservazione degli affreschi. Su quest'ultimo aspetto si focalizza il presente lavoro di tesi, dato che la luce naturale contribuisce a illuminare la parete nord, bisogna ridurre il flusso di luce su di essa, con meno luce artificiale per rientrare nei limiti normativi.

Per rimediare a questa problematica, data dalle caratteristiche intrinseche del sito, si è sviluppata una rete di sensori che consente di monitorare costantemente il livello dell'illuminazione. La soluzione più efficace è il monitoraggio e il controllo diffusi del sistema che tiene conto dell'illuminazione naturale. Ciò che si vuole raggiungere è l'eliminazione del dislivello di luce, più accentuato in determinate zone piuttosto che in altre che sono quasi in ombra. Il dispositivo deve consentire la perfetta visione degli affreschi di Giotto, senza far notare agli occhi dei visitatori le difformità di luce, indipendentemente dall'ora e dal periodo dell'anno.

### **3.1.2 L'impianto di illuminazione**

Il sistema di illuminazione preesistente, inaugurato nel Marzo 2002, consisteva in una serie di moduli con riflettori asimmetrici, impiegava sorgenti fluorescenti per l'illuminazione delle pareti, e proiettori ad alogenuri metallici per

### 3.2 Light Emitting Diodes e l'influenza della luce emessa



Figura 3.1: Diffusione irregolare della luce causata dalla distribuzione asimmetrica delle finestre all'interno della Cappella degli Scrovegni.

l'illuminazione della volta. Tali apparecchi richiedevano manutenzione e sostituzione periodica, non soltanto in caso di guasto, ma anche perché nel tempo si modificavano le caratteristiche della luce emessa. Questi moduli erano stati progettati per illuminare la parte superiore e inferiore delle pareti affrescate con una temperatura colore di circa 4180 K. Questo sistema è reso obsoleto dall'evoluzione tecnologica dei corpi illuminanti, in quanto non offre la possibilità di controllare l'illuminazione in relazione ai contributi di luce naturale.

L'installazione di un nuovo sistema di illuminazione di ultima generazione, tra gli innumerevoli vantaggi, ha la possibilità di gestire in maniera automatica l'impianto di illuminazione, adeguando il flusso luminoso in funzione della luce naturale, esaltando i colori dei dipinti murali di Giotto. Perciò nel nuovo sistema di illuminazione, le variazioni di luce saranno rilevate e trasmesse al sistema di controllo che regolerà di conseguenza gli apparecchi di illuminazione, migliorando così l'esperienza visiva del visitatore, nel pieno rispetto delle norme europee in materia di limiti di esposizione per la conservazione delle opere d'arte.

## 3.2 Light Emitting Diodes e l'influenza della luce emessa

Le nuove possibilità applicative offerte dai Light Emitting Diodes (LEDs), unitamente all'evoluzione tecnologica dello stato solido registrata negli ultimi anni, riguardano sia l'illuminazione generale che quella d'accento.

I diodi ad emissione luminosa sono entrati gradualmente nel campo dell'illuminazione e risultano una delle migliori scelte a causa dei loro numerosi

vantaggi, come basso consumo energetico, efficienza luminosa, lunga durata, luminosità regolabile, ecc.

Contestualmente molta attenzione e' stata rivolta all'Internet of Things (IoT) per il suo impatto sulla vita reale. Una delle soluzioni IoT per l'illuminazione è proprio la Smart Lighting. Questo è un sistema di più dispositivi, di illuminazione e sensori, che cooperano formando una rete [33]. La Smart Lighting sfrutta i vantaggi dell'IoT aumentando l'efficienza energetica e il comfort umano, integrando contestualmente più servizi nell'infrastruttura di illuminazione [34]. Un altro potenziale vantaggio della Smart Lighting deriva dalla capacità di modulare rapidamente la potenza di uscita delle sorgenti luminose a LED. Attraverso lo sviluppo dei LED e l'IoT si ha una luce intelligente in grado di rendere l'ambiente il più confortevole possibile [35]. Infatti, grazie alla buona stabilità e all'affidabilità dei LED, questi si prestano bene in questo campo applicativo [36]. La Smart Lighting attraverso i Light Emitting Diodes può applicare facilmente il controllo digitale. L'illuminazione a LED si ottiene quando un cristallo semiconduttore viene attivato in modo tale da produrre direttamente luce visibile in un intervallo di lunghezze d'onda desiderato, regolando così colore e intensità [37]. Pertanto, grazie a questo vantaggio tecnologico, c'è un crescente interesse della comunità di ricerca nell'uso dei LED nei sistemi di illuminazione intelligente.

La realizzazione di un sistema di illuminazione che connette a Internet le nuove sorgenti luminose a LED e nodi sensore ambientali, permette di emozionare e migliorare l'esperienza dell'utente attraverso la sinergia tra luce e Internet of Things (IoT). Gli obiettivi principali di tale sistema sono il risparmio energetico da un lato e l'appagamento visivo dell'utente dall'altro.

Ad oggi molto sviluppata e diffusa è la tecnologia Tunable White in grado di cambiare facilmente la temperatura colore dell'illuminamento. Grazie a questa tecnologia, la qualità della luce può ora essere adattata perfettamente per soddisfare le diverse esigenze del contesto in questione. Tipicamente le sorgenti luminose hanno temperatura colore e resa cromatica fisse, mentre i LEDs Tunable White permettono di miscelare due sorgenti luminose con temperatura colore una fredda (Cool) e una calda (Warm) ricoprendo tutto il range da 3000 K a 6500 K.

Grazie alla Smart Lighting è possibile effettuare un monitoraggio continuo e in tempo reale della luce (sia artificiale che naturale) e un controllo dell'emissione delle sorgenti LED. In base al contributo di luce naturale e alla resa cromatica rilevati dalla rete di sensori, si può intervenire nella regolazione dei parametri illuminotecnici dei corpi illuminanti, quali l'illuminamento e temperatura colore. L'obiettivo di un sistema di illuminazione intelligente è quello di controllare le sorgenti luminose di un qualsiasi ambiente (ad esempio casa, ufficio o museo) in modo che l'illuminazione desiderata sia sempre raggiunta,

compensando la luce naturale presente nel luogo.

Studi dimostrano che una temperatura colore regolabile è vantaggiosa per la salute umana, il benessere e la produttività [38]. In base al luogo e all'ora del giorno l'uomo è abituato a una luce più calda o più fredda in relazione alla luce naturale del sole, per questo motivo è importante adattare la luce artificiale a quella naturale per sincronizzare i ritmi circadiani dell'essere umano [39]. Perciò l'intensità e la temperatura colore della luce hanno forti effetti sulla salute umana e con l'illuminazione a LED Tunable White si vuol garantire una luce corretta in ogni ambiente e in ogni momento della giornata generando effetti positivi e benessere per l'uomo [40].

In altre parole, la luce è un ingrediente cruciale per la vita dell'uomo. Ciascun soggetto, per ogni situazione e ambiente, richiede determinati livelli di intensità della luce. Questi sono necessari non solo per esigenze pratiche, quali lavoro e comodità visiva, ma compongono anche un ruolo di accompagnamento nella sfera emotiva, trasmettendo ed enfatizzando le emozioni con semplici giochi di luce [41]. Per questo motivo, c'è una crescente domanda nei confronti dell'integrazione della tecnologia LED sintonizzabile con l'illuminazione intelligente per una regolazione dinamica e in tempo reale della luce, così da soddisfare le esigenze degli utenti e generare un'elevata luce di comfort in diversi scenari e condizioni. L'illuminazione intelligente può creare vari tipi di atmosfera, come sensazioni romantiche, rilassanti, piacevoli e confortevoli. Tali caratteristiche sono possibili grazie alla realizzazione di LEDs Tunable White. [42]. Quindi l'impatto che un sistema Tunable White può avere all'interno di un ambiente museale è molto importante, in quanto permetterebbe al visitatore di immergersi completamente nell'opera ammirata, diventandone un tutt'uno.

Inoltre, altri studi dicono che a seconda del cultural background di ciascun individuo le preferenze per la qualità di luce variano, queste risultano incrementate quando si guardano oggetti meno familiari [43], evento che rende ancora più importante e delicato il controllo dell'illuminazione in ambito museale.

### 3.3 Soluzione IoL sviluppata

La soluzione progettata è una soluzione di IoT innovativa basata su WSN per il monitoraggio e il controllo in tempo reale del sistema di illuminazione della Cappella degli Scrovegni a Padova, realizzando un vero e proprio sistema di Internet of Light.

L'implementazione del sistema di controllo del nuovo impianto di illuminazione installato nella Cappella degli Scrovegni, ne rappresenta il primo esempio mondiale nell'ambito del patrimonio culturale.

La soluzione personalizzata IoL è costituita da quattro componenti principali interoperabili tra loro: il sistema di rilevamento; il sistema di gestione; il

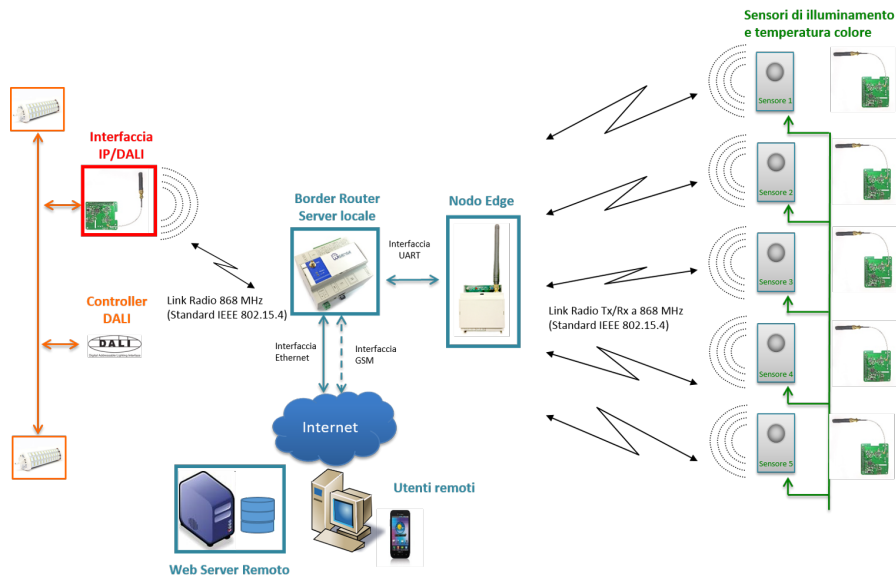


Figura 3.2: Soluzione IoL realizzata.

sistema di controllo; e, infine, il sistema di illuminazione. L'architettura di rete completa e ogni elemento costitutivo, sono illustrati in Figura 3.2 e dettagliati di seguito.

### 3.3.1 Sistema di rilevamento

La rete di nodi sensore consiste in una vera e propria soluzione IoT, con la connessione alla rete Internet globale e la comunicazione tra i singoli elementi di rilevamento.

Il sistema si compone di nodi sensore wireless distribuiti all'interno della Cappella nelle posizioni mostrate in Figura 3.3. Queste unità sono state personalizzate inglobando sensori per acquisire valori di illuminamento e temperatura colore, inoltre sono state ulteriormente personalizzate, ad esempio, integrandole con sensori di temperatura ambiente e umidità (in questo lavoro non trattati in quanto non richiesti per i fini della presente applicazione). In questa prima fase sono state installate e testate cinque unità. Durante questo periodo sono stati analizzati i dati acquisiti, valutando così i contributi congiunti di luce naturale e luce artificiale, sulla base di queste prime valutazioni è possibile individuare nuove posizioni utili in cui installare nuovi sensori e di conseguenza aumentare l'accuratezza dei dati e delle informazioni raccolte.

### 3.3 Soluzione IoL sviluppata

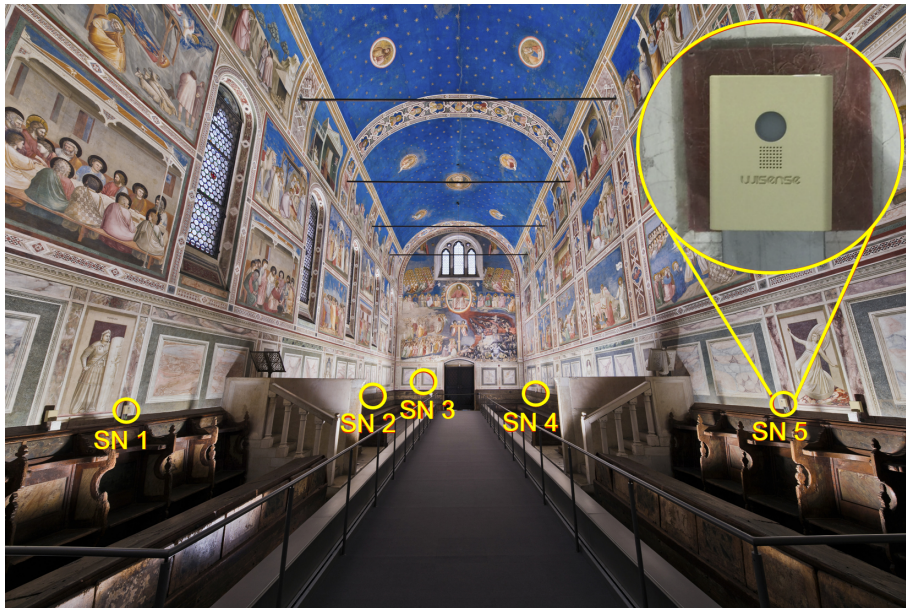


Figura 3.3: Dislocazione di ciascun nodo sensore.

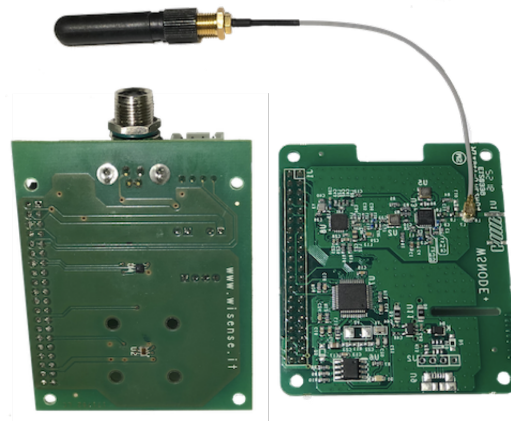


Figura 3.4: Componenti hardware del sistema di rilevamento: unità di rilevamento (a sinistra) e unità principale (a destra).

In ciascun nodo sensore è stato implementato un server CoAP, in cui è possibile accedere alle misurazioni della temperatura colore e dell'illuminamento mediante il metodo GET. Il nodo sensore, come mostrato in Figura 3.4, è composto da due parti fondamentali: l'unità principale e l'unità di rilevamento.

1. Unità principale: è il componente fondamentale dell'intera architettura

di rete sviluppata e ospita l'unità di elaborazione (MCU) e l'unità di comunicazione (ricetrasmittitore). Il ricetrasmittitore dell'unità principale integra un coprocessore di crittografia per il trasferimento sicuro dei dati AES (Advanced Encryption Standard). Viene utilizzato per crittografare la comunicazione RF e fornire sicurezza RF al fine di difendersi dall'accesso non autorizzato ai collegamenti. Il codice sorgente è installato nell'MCU e consente l'acquisizione, l'elaborazione e la trasmissione di informazioni sulle misurazioni effettuate dall'unità di rilevamento o la ricezione di comandi da Internet per variare le impostazioni di misurazione. Al fine di monitorare la luce incidente sulle pareti affrescate della Cappella degli Scrovegni, il firmware implementato nell'unità principale fornisce la temperatura colore e l'illuminamento della luce che colpisce l'unità di rilevamento integrata nel nodo sensore. Secondo l'architettura di sistema precedentemente descritta, le informazioni acquisite da ciascun nodo sensore sono rese disponibili all'utente autenticato tramite il login al database o l'accesso diretto al server CoAP implementato nell'unità principale. La capacità dei nodi sensore di misurare la temperatura colore e l'illuminamento della luce, tramite una connessione in tempo reale ai server CoAP, è una caratteristica unica che, in questo caso d'uso, consente di monitorare la presenza di eventuali zone d'ombra o di cali visivi nelle pareti affrescate. Al fine di garantire elevate prestazioni del sistema e interoperabilità tra il livello dell'applicazione e lo stack protocollare sottostante, il firmware implementato nell'unità principale viene sviluppato utilizzando il sistema operativo Contiki.

2. Unità di rilevamento: incorporano sensori di umidità, temperatura e luce. I primi due sensori non sono abilitati in questo caso d'uso, ma sono stati integrati in quanto le loro misurazioni potrebbero essere particolarmente utili nel CH per sviluppi futuri. Il sensore di luce ci fornisce il ritorno digitale dei valori di rilevamento della luce rossa, verde, blu (RGB) e bianca. Queste misurazioni sono utilizzate per determinare l'illuminamento e la temperatura colore (CCT) della luce percepita. In particolare il sensore è composto da un array di fotodiodi 3x4 e da 4 convertitori analogico-digitale (ADC). L'array di fotodiodi è composto da fotodiodi con filtro rosso (R), filtro verde (G), filtro blu (B) e filtro bianco (C). In aggiunta, tutti i fotodiodi sono dotati di filtro di blocco IR per eliminare la componente infrarossa.

Lo schema a blocchi dei componenti hardware è riportato nella Figura 3.5.



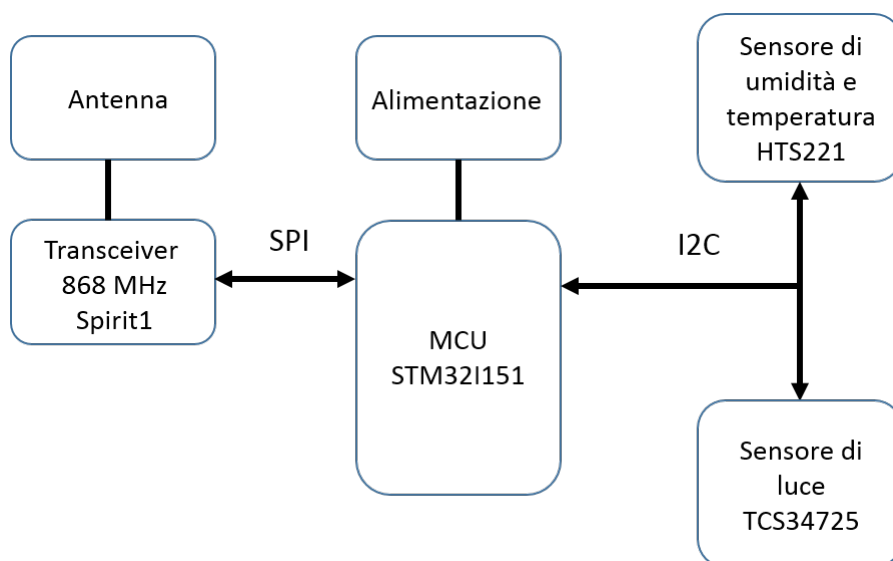


Figura 3.5: Diagramma a blocchi del sistema di rilevamento.

### 3.3.2 Il sistema di illuminazione

Il nuovo sistema di illuminazione nella Cappella degli Scrovegni è una rete cablata di apparecchi a LED, basata sulla tecnologia Tunable White. I corpi illuminanti sono stati sviluppati da iGuzzini Illuminazione S.p.A.

Le pareti lungo la navata della Cappella sono illuminate da 14 Laser Blade Tunable White. Il progetto illuminotecnico è stato studiato con perfezione, per illuminare sia la parte superiore che inferiore delle facciate, attraverso corpi illuminanti con ottiche diverse, rispettivamente 48 gradi e 30 gradi. Tale soluzione garantisce uniformità longitudinale e verticale dell'illuminazione lungo la navata. Ogni dispositivo Laser Blade contiene 15 elementi LED. La variazione della temperatura colore avviene miscelando l'emissione di 8 LEDs a 2700 K e 7 LEDs a 5700 K, con un elevato indice di resa cromatica. Le due serie di LEDs sono dimmerabili singolarmente, offrendo una temperatura colore variabile in base alla regolazione dei due diversi flussi di luce. Attraverso la tecnologia Tunable White si può variare nel tempo da una temperatura più calda a una più fredda senza sostituire le unità di illuminazione, ma semplicemente usando questa tecnologia che consente di variare la temperatura colore.

Il vantaggio di questo nuovo sistema di illuminazione di ultima generazione (basato sulla tecnologia Tunable White), consente di regolare la luce in modo dinamico, sia in termini di illuminamento che di temperatura colore, al variare della luce naturale.

Per implementare la connessione di ciascun corpo di illuminazione a Internet, è stato tenuto conto delle attuali norme di interconnessione nel settore dell'illuminazione. In particolare, gli elementi di illuminazione in questione incorporano interfacce di comunicazione per il controllo indirizzabile digitale conformi al Digital Addressable Lighting Interface (DALI), che è un marchio comunemente adottato per il controllo dell'illuminazione e uno standard internazionale IEC (International Electrotechnical Commission). Secondo le specifiche DALI, l'impianto è composto dal master DALI, con funzionalità di alimentazione del bus e di controllo digitale degli slave DALI, incorporati nelle sorgenti luminose. Questo protocollo, così come la grande moltitudine di protocolli proprietari che sono attualmente sul mercato nei vari campi di applicazione, si presta poco all'interazione con soluzioni IoT aperte. In questo lavoro questo problema è stato efficacemente superato attraverso la progettazione del sistema di controllo, descritto in seguito, appartenente alla WSN e in grado di interagire con i dispositivi DALI.

### **3.3.3 Il sistema di controllo**

Il sistema di controllo è composto da dispositivi wireless appositamente sviluppati per interagire con i dispositivi DALI integrati in ciascun apparecchio dell'impianto di illuminazione. Ogni dispositivo si compone dell'unità principale del sistema di rilevamento, chiamata in questo caso nodo di controllo. Lo schema a blocchi dei suoi componenti hardware è mostrato in Figura 3.6. Il nodo di controllo consiste di un'unità di adattamento bus per inviare comandi conformi al DALI.

Un server CoAP è stato implementato in ciascun nodo di controllo e da cui i comandi DALI possono essere inviati con il metodo POST. Il nodo può anche alimentare il bus DALI senza il master e quindi sostituirlo completamente in tutte le sue funzioni. Oltre a queste caratteristiche, il nodo di controllo svolge funzioni diagnostiche acquisendo e rendendo disponibili su Internet le informazioni e i messaggi di errore inviati da ogni slave DALI (ovvero gli elementi di illuminazione) sul bus.

Nella realizzazione dell'intera architettura, per specifiche standard del DALI, si necessita di tre nodi di controllo per interagire con l'intero sistema di illuminazione.

### **3.3.4 Il sistema di gestione**

Il sistema di gestione è una soluzione software e hardware completa che consente di controllare e monitorare l'intero sistema di illuminazione installato nella Cappella degli Scrovegni. Il Sistema di gestione è composto da Border Router, Nodo Edge e Web Server Remoto secondo l'architettura descritta nella

### 3.4 Gestione dell'impianto attraverso l'applicazione smartphone realizzata

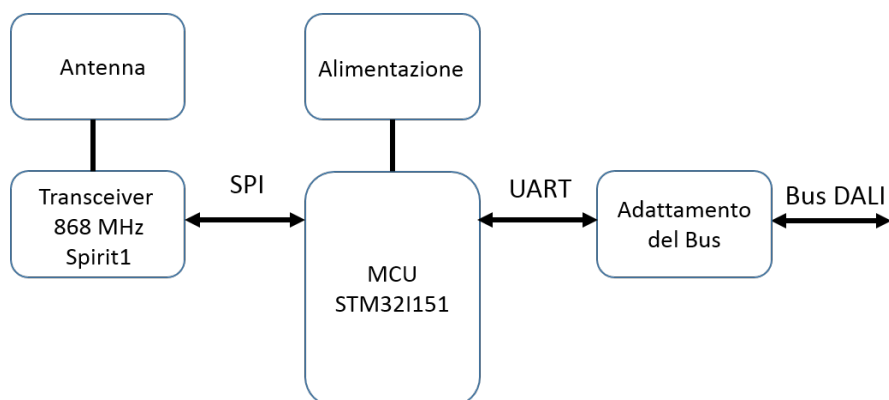


Figura 3.6: Diagramma a blocchi del nodo di controllo.

Sezione 2.4. In dettaglio in questo scenario applicativo il Border Router installato è un PC ed è collegato a Internet tramite un modem 3G standard. Il nodo Edge è collegato tramite l'interfaccia RS232 al Border Router. Sia il Border Router che il nodo Edge sono in grado di trasmettere pacchetti IP attraverso l'interfaccia RS232 utilizzando il protocollo SLIP. Pertanto, il Border Router consente l'interconnessione del sistema di rilevamento e del sistema di controllo a Internet globale. In questo modo, ogni elemento di questi sottosistemi e gli apparecchi DALI del sistema di illuminazione sono diventati parte di Internet e tutti sono indirizzabili e accessibili da utenti debitamente autorizzati.

## 3.4 Gestione dell'impianto attraverso l'applicazione smartphone realizzata

Sviluppare le funzioni necessarie alla rete per svolgere in modo efficiente il proprio lavoro, è importante fornire all'utente uno strumento che consente una gestione facile e rapida del sistema di illuminazione.

A tal proposito è stata sviluppata un'applicazione per dispositivi mobili che dà agli utenti autorizzati la possibilità di gestire, sia in locale che da remoto l'intero impianto di illuminazione. L'applicazione, sulla base dello standard DALI, consente di controllare sia il singolo corpo illuminante, sia gruppi di sorgenti luminose, oltre alle scene che eventualmente possono essere realizzate, interagendo sull'intensità della luce, sull'accensione, sullo spegnimento, sul lampeggio (blink) o sulla temperatura colore.

Per l'applicazione pratica del caso d'uso in questione, l'applicazione sviluppata era necessaria in fase di installazione sia per la creazione dei gruppi/scene,

ma anche per configurare i parametri illuminotecnici desiderati da attribuire a ciascun corpo illuminante o a gruppi di sorgenti luminose.

L'applicazione consente il controllo diretto dei corpi illuminanti attraverso il nodo di controllo (interfaccia IP/DALI). Il modulo Wi-Fi del dispositivo mobile (smartphone/tablet) permette di mandare comandi e ricevere dati in tempo reale per poter modificare lo stato delle sorgenti luminose di interesse.

La Figura 3.7 mostra l'applicazione sviluppata per qualsiasi dispositivo Android, dalla versione 4.4 alla più recente. In fase di installazione del sistema di illuminazione, è possibile realizzare, in base alle richieste ed esigenze, specifiche e personalizzate scene di luce. E' proprio in questa fase che risulta molto pratica la funzione "blink", necessaria per individuare il corpo illuminante da includere nella scena che si sta creando. Per i nostri scopi la formazione di scene è utile per poter creare impostazioni fisse dei parametri illuminotecnici in condizioni riconosciute come standard, ad esempio fissare parametri di illuminamento ben precisi in caso di giornate estive con sole o invernali con nuvole. Inoltre è possibile gestire gruppi di sorgenti luminose, ossia creare un gruppo che controlli tutti i corpi illuminanti che interagiscono nell'illuminazione della stessa facciata o di una zona di essa.

Al primo avvio, l'applicazione manda una richiesta al sistema per valutare se sono intercorse modifiche sui gruppi/scene/singoli corpi illuminanti ed aggiornare, di conseguenza, la memorizzazione dei rispettivi indirizzi. A seguito di ciò si può scegliere se andare a interagire con le singole sorgenti luminose, con i gruppi di luci, o, infine, direttamente con le scene create. Per quanto riguarda il controllo delle singole luci, i comandi che sono stati implementati sono: l'accensione e lo spegnimento; il lampeggio (blink), utile in fase di installazione per individuare le luci durante la creazione di gruppi o scene; il dimmeraggio, per la regolazione dell'intensità luminosa. Mentre per i gruppi si hanno gli stessi comandi ad eccezione del lampeggio. Invece per le scene è possibile selezionare la configurazione creata. Dall'apposito menù in alto a destra sono riportate le impostazioni aggiuntive per la gestione della temperatura colore e la ricerca degli indirizzi. Quest'ultima è necessaria solo quando l'applicazione viene avviata per la prima volta o quando vengono fatte modifiche all'impianto di illuminazione. Una volta trovati gli indirizzi, il menù a tendina viene riadattato, dando così la possibilità di selezionare i nuovi elementi del sistema, ovvero la scena, o il corpo illuminante, o il gruppo, che si vuole accendere, spegnere, far lampeggiare, se si tratta di una sola luce, per regolarne la luminosità o la temperatura colore. Infine, grazie al menù laterale aggiunto all'applicazione, è possibile effettuare la navigazione rapida tra la gestione del controllo delle luci, gruppi o scene.

La composizione dell'applicazione Android ha riguardato la realizzazione di due parti:

### 3.4 Gestione dell'impianto attraverso l'applicazione smartphone realizzata

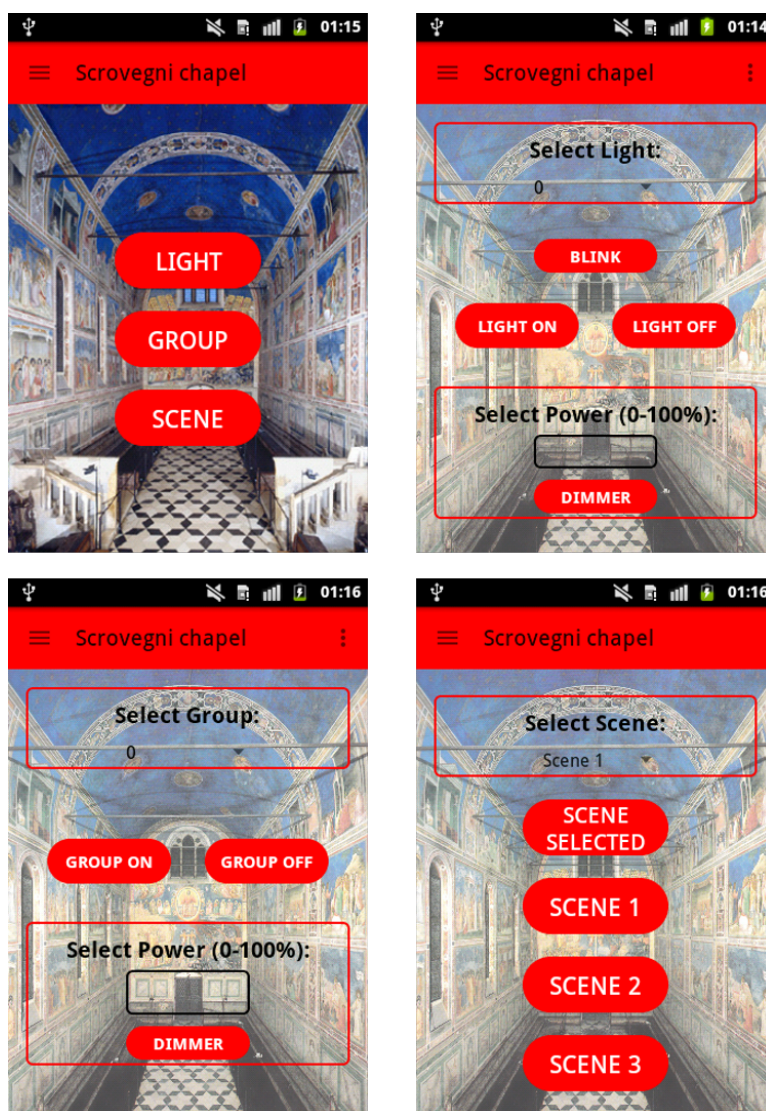


Figura 3.7: Interfacce dell'applicazione.

- la parte comprendente lo sviluppo del codice dinamico, scritto in Java, che si occupa della gestione degli eventi;
- la parte statica, scritta in XML, che definisce le caratteristiche non variabili durante l'esecuzione dell'applicazione.

Alla base di un'applicazione Android scritta in Java abbiamo le Activities, che hanno la responsabilità di descrivere i diversi screen dell'applicazione e gestire le azioni che l'utente compie durante l'uso dell'app. Un'applicazione

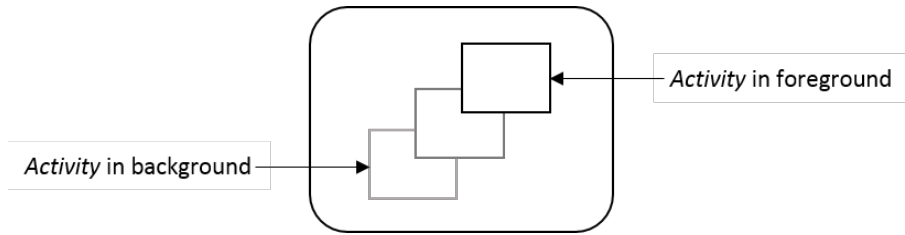


Figura 3.8: Stack di Activity.

è composta quindi da una sequenza di Activity (screen) che si alternano sul display e che tra loro comunicano. Le Activities sono organizzate in uno stack, dove l'attività in primo piano è quella visualizzata in quel momento. La visualizzazione di una nuova screen corrisponde quindi all'avvio di una nuova Activity che viene conseguentemente posta in cima allo stack. L'invocazione di una seconda Activity da parte dell'Activity attiva avviene attraverso la definizione delle istanze Intent, proprio per poter navigare da un'Activity all'altra (Figura 3.8).

L'applicazione consta di varie componenti: una Activity principale che permette all'utente di selezionare le sorgenti luminose da gestire; varie Activity che permettono all'utente di impostare lo stato dei corpi illuminanti, come l'accensione/spengimento, il dimmeraggio e/o il lampeggio. Tale applicazione risponde pienamente alle prerogative di un'applicazione per terminali mobili:

- Utile: gli utenti possono raggiungere i loro obiettivi in un contesto mobile.
- Utilizzabile: gli utenti possono facilmente eseguire operazioni in un contesto mobile.
- Desiderabile: gli utenti hanno emozioni positive circa la loro esperienza app-mobile.

L'applicazione realizzata risponde al meglio a questi obiettivi, costituendo il mezzo attraverso il quale l'utente, in ogni momento e in ogni luogo può gestire il controllo dell'illuminazione per i propri bisogni e il proprio comfort. I metodi più utilizzati in queste Activity sono le GET del protocollo HTTP, mentre il resto del codice è responsabile per lo più ai collegamenti tra le Activity, alla gestione della scelta della sorgente luminosa (attraverso il menù a tendina), al controllo e alla memorizzazione degli indirizzi dei corpi illuminanti. L'Activity di partenza è StartActivity dove viene semplicemente visualizzato per due secondi il logo iniziale, in seguito viene aperta FirstActivity che rende visibile un menù di scelta per l'esecuzione del controllo, o delle singole sorgenti luminose, o dei gruppi o delle scene.

### 3.4 Gestione dell'impianto attraverso l'applicazione smartphone realizzata

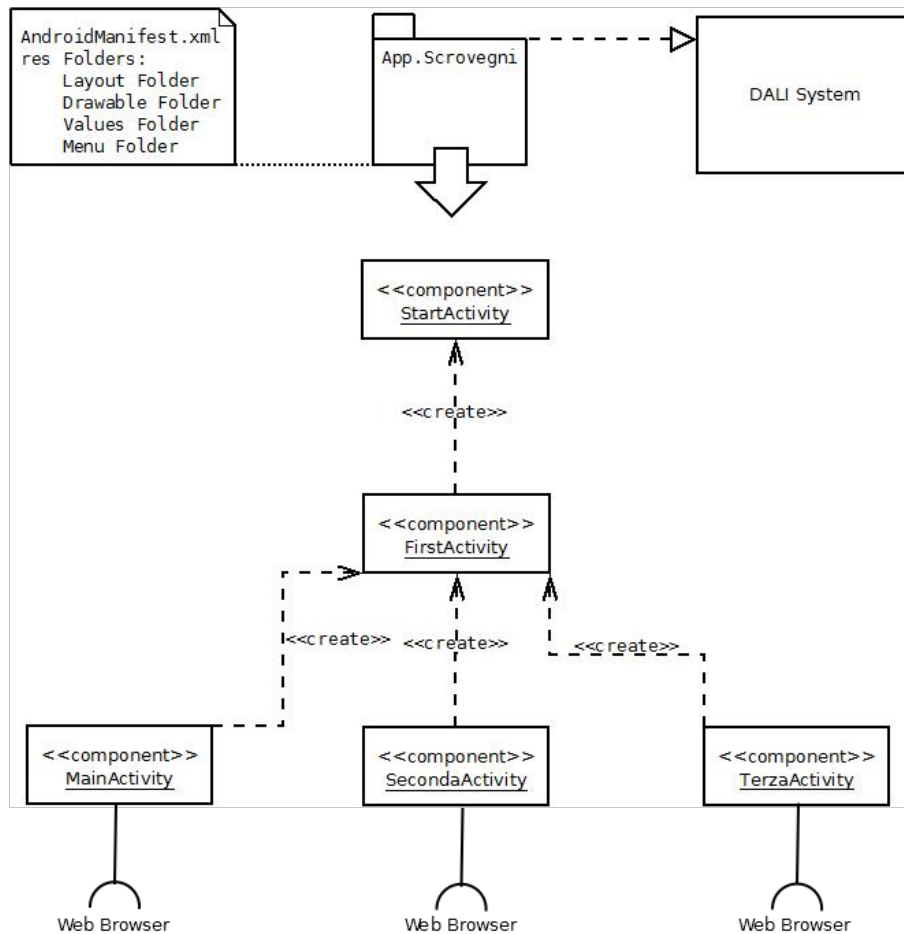


Figura 3.9: Diagramma delle componenti.

In Figura 3.9 è mostrato il diagramma delle componenti dell'applicazione, mentre gli scenari d'uso sono:

- Scenario di controllo singoli corpi illuminanti (MainActivity): lo scenario prevede che l'utente voglia gestire il controllo di una singola luce (accensione/spegnimento, lampeggio e dimmeraggio). Per realizzare la selezione della luce di interesse occorre che l'utente abbia già eseguito la ricerca degli indirizzi. Nel caso contrario il menù a tendina sarà vuoto e solo in seguito alla ricerca, che può essere effettuata col tasto in alto a destra, si potranno eseguire le funzionalità.
- Scenario di controllo dei gruppi (SecondaActivity): lo scenario prevede che l'utente voglia gestire il controllo di gruppi di luce (accensione/spegni-

### *Capitolo 3 Un Sistema IoT Innovativo per la Cappella degli Scrovegni*

mento e dimmeraggio). Per realizzare la selezione della luce di interesse occorre che l'utente abbia già eseguito la ricerca degli indirizzi. Nel caso contrario il menù a tendina sarà vuoto e solo in seguito alla ricerca, che può essere effettuata col tasto in alto a destra, si potranno eseguire le funzionalità.

- Scenario di gestione delle scene (TerzaActivity): lo scenario prevede che l'utente desidera creare una determinata scena per un maggior comfort in quel momento.



## Capitolo 4

# Studio e valutazione della qualità della luce

Per l'analisi della qualità della luce, tra i parametri di illuminazione di interesse per la nostra applicazione ci sono l'illuminamento e la temperatura colore. L'illuminamento è il flusso luminoso incidente su una superficie per unità d'area e può essere caratterizzato come la luminosità percepita della luce visibile ed è misurato in lux (lx) [44]. La temperatura colore (CCT) di una sorgente di luce, misurata in Kelvin (K), è la temperatura associata a un corpo nero ideale che emette una radiazione luminosa cromaticamente simile alla radiazione in esame [42]. La temperatura colore è un parametro fondamentale per caratterizzare il cromatico dei LED, indicando come appare la luce bianca, se più fredda o calda. Le temperature di colore che superano i 5000 K sono chiamate fredde, mentre quelle nell'intervallo 2700-3000 K, sono chiamate calde.

### 4.1 Algoritmo per la valutazione dell'illuminamento e temperatura colore

Lo scopo è sviluppare un algoritmo con il quale ottenere i valori di illuminamento e temperatura colore dai dati acquisiti dall'unità di rilevamento [24].

Il sistema di rilevamento sviluppato incorpora un sensore di luce in grado di monitorare la luce incidente sulle pareti affrescate della Cappella degli Scrovegni. Dal sensore si ottengono informazioni riguardo la luce misurata dai fotodiodi a colori, ricavando così dati sui canali di luce rossa (R), verde (G), blu (B) e bianca (C).

A tal scopo si è realizzato l'algoritmo mostrato in Figura 4.1 con cui si può calcolare l'illuminamento (Lux) e la temperatura colore (CCT) dalle risposte dei canali R, G, B e C del sensore di luce. Di seguito è descritto il funzionamento di ciascun blocco del diagramma illustrato in Figura 4.1.

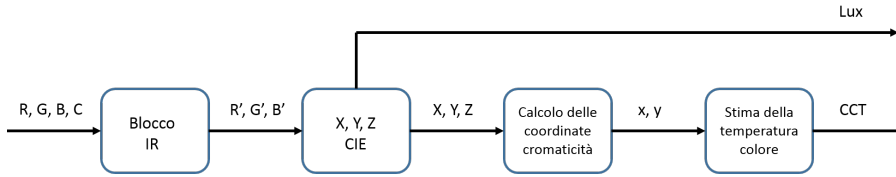


Figura 4.1: Diagramma a blocchi dell'algoritmo.

- Blocco IR: valuta la componente degli infrarossi (IR), necessaria alla corretta stima della luce ambientale, soprattutto in casi applicativi delicati, come quello museale. Per ridurre al minimo il contenuto IR ed evitare un canale aggiuntivo per misurare la componente IR, i sensori RGB integrano un filtro di blocco IR. Tuttavia, questo filtraggio potrebbe risultare imperfetto, pertanto, volendo evitare di compromettere le misurazioni, il contenuto IR viene approssimato con la seguente equazione [45]:

$$IR = \frac{(R + G + B - C)}{2} \quad (4.1)$$

dove  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , e  $C$  sono i canali rosso, verde, blu e bianco acquisiti dal sensore di luce. La rimozione della componente IR dalle misurazioni effettuate dal sensore produce i canali compensati  $R'$ ,  $G'$  e  $B'$ :

$$\begin{aligned} R' &= R - IR \\ G' &= G - IR \\ B' &= B - IR \end{aligned} \quad (4.2)$$

dove  $R'$ ,  $G'$ , e  $B'$  sono i canali  $R$ ,  $G$ ,  $B$  senza la componente IR.

- XYZ CIE: mappa le misure dei singoli canali  $R'$ ,  $G'$ , e  $B'$  nei valori  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  dello spazio colore standardizzato dalla Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Questa mappatura è necessaria per compensare le discrepanze tra la risposta spettrale del sensore e quella relativa ai valori definiti dal CIE. A partire da  $R'$ ,  $G'$ , e  $B'$  moltiplicati per la matrice di trasformazione, denominata  $\mathbf{T}$ , si ottengono i valori XYZ corretti. In questa applicazione la matrice di trasformazione è derivata dall'analisi dei dati empirici ottenuti in test sperimentali che caratterizzano la risposta del sensore durante la sua esposizione a diverse fonti di luce. I test sperimentali che ci hanno permesso di derivare la matrice di trasformazione, a partire dai dati acquisiti durante una campagna di misurazioni effettuate

#### 4.1 Algoritmo per la valutazione dell'illuminamento e temperatura colore

su ciascun nodo sensore, sono descritti nella sottosezione 4.1.1. Una volta calcolata la matrice  $\mathbf{T}$ , può essere utilizzata per trasformare la risposta del sensore nei valori equivalenti  $XYZ$  usando la seguente equazione:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{1,2} & t_{1,3} \\ t_{2,1} & t_{2,2} & t_{2,3} \\ t_{3,1} & t_{3,2} & t_{3,3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

dove  $Y$  fornisce la stima dell'illuminamento misurato dal sensore.

- Calcolo delle coordinate di cromaticità: la cromaticità di un colore viene definita dai due parametri  $x$  e  $y$  ottenuti dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{(X + Y + Z)} \\ y &= \frac{Y}{(X + Y + Z)} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Lo spazio colore derivato da  $x$ ,  $y$  e  $Y$  è noto come lo spazio colore CIE  $xyY$ .

- Stima della temperatura colore: la temperatura colore è calcolata dalle coordinate di cromaticità attraverso la formula di McCamy [46]:

$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33 \quad (4.5)$$

dove

$$n = \frac{(x - 0.3320)}{(0.1858 - y)}. \quad (4.6)$$

McCamy afferma che questa formula, date le coordinate di cromaticità  $x$  e  $y$ , può fornire un errore inferiore a  $\pm 2$  K per temperatura colore compresa tra 2856 e 6500 K.

##### 4.1.1 Calcolo della matrice di trasformazione

La matrice di trasformazione  $\mathbf{T}$ , necessaria per ottenere i valori  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , è ricavata in seguito a una fase di calibrazione.

Per eseguire questa procedura è necessario caratterizzare la risposta del sensore rispetto alle sorgenti luminose a cui viene esposto e confrontare queste misurazioni con quelle rilevate da uno strumento accurato preso come riferimento. In particolare è stato utilizzato lo spettrofotometro Konica Minolta CL-500, che è uno strumento di laboratorio utilizzato per acquisire informazioni precise sullo spettro e sulle componenti  $X$ ,  $Y$ , e  $Z$ , l'irradiazione spettrale, l'illuminamento, l'indice di resa cromatica e la temperatura colore.

Questa procedura è stata eseguita nell'ambiente in cui si è installato l'intero sistema, nelle condizioni di illuminazione effettive a cui il dispositivo si trova e solo dopo aver installato le nuove sorgenti LED.

Il sensore e lo spettrofotometro sono stati collocati uno vicino all'altro in modo tale che, entrambi siano soggetti alle stesse condizioni al variare delle impostazioni delle sorgenti luminose. Ogni sensore e il CL-500 sono stati esposti in sequenza a quattro diverse impostazioni delle sorgenti luminose, producendo quattro scene diverse (a, b, c e d). Per ciascuna scena sono state memorizzate sia le risposte dei sensori che le misurazioni effettuate dallo spettrofotometro. Nelle scene a, b e c le misurazioni sono state effettuate durante la notte, quindi i nodi sensore e il CL-500 sono stati esposti esclusivamente alla luce prodotta dal nuovo sistema di illuminazione installato nella Cappella degli Scrovegni. Nella scena a, i dispositivi di illuminazione sono stati impostati per emettere una luce con una temperatura colore di 2766 K. Nella scena b, i dispositivi di illuminazione sono stati impostati per emettere una luce con una temperatura colore di 3966 K (la temperatura colore selezionata come configurazione ottimale per il rendering visivo della Cappella). Nella scena c, i dispositivi di illuminazione sono stati impostati per emettere una luce con una temperatura colore di 5607 K. In tutte le scene precedenti, il sistema di illuminazione è stato impostato per fornire valori di illuminazione di circa 120 lx sulle pareti della Cappella. Mentre, nella scena d, le misurazioni sono state eseguite durante le ore diurne (verso mezzogiorno) e con il sistema di illuminazione spento. In questa scena, la fonte di luce era quindi solo quella naturale che entrava dalle finestre della Cappella.

Attraverso i dati empirici raccolti, è stato possibile determinare le matrici di trasformazione  $\mathbf{T}$  per calibrare ciascun sensore. Conoscendo la risposta del sensore (le componenti  $R'$ ,  $G'$ , e  $B'$ ) e le misurazioni effettuate dallo spettrofotometro (i valori  $X$ ,  $Y$ , e  $Z$ ) per ogni scena, è stata ottenuta una matrice di trasformazione  $\mathbf{T}$  per ogni nodo sensore. Prendendo in considerazione solo le scene a, b e c, la relativa matrice di trasformazione  $\mathbf{T}_{a,b,c}$  può essere ottenuta moltiplicando la matrice dei valori misurati dallo spettrofotometro  $\mathbf{V}$  per l'inverso della matrice  $\mathbf{S}$  delle risposte del sensore  $R'$ ,  $G'$ , e  $B'$  [47]:

$$\mathbf{T}_{a,b,c} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}^{-1} = \begin{bmatrix} X_a & X_b & X_c \\ Y_a & Y_b & Y_c \\ Z_a & Z_b & Z_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R'_a & R'_b & R'_c \\ G'_a & G'_b & G'_c \\ B'_a & B'_b & B'_c \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.7)$$

All'aumentare del numero di configurazioni delle sorgenti luminose, o semplicemente includendo le misurazioni relative alla scena d, si ottiene un sistema sovradeterminato dal quale scaturisce la soluzione necessaria per trovare la matrice di trasformazione  $\mathbf{T}$ . Sfruttando la matrice pseudo-inversa di Moore-Penrose per ricavare una soluzione del sistema sovradeterminato, minimizzan-

#### 4.1 Algoritmo per la valutazione dell'illuminamento e temperatura colore

do l'errore nel problema descritto, è possibile derivare  $\mathbf{T}$  usando la seguente equazione [48]:

$$\mathbf{T}_{a,b,c,d} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}_{3 \times 4} \cdot \text{pinv} \left( \begin{bmatrix} R' & G' & B' \end{bmatrix}_{3 \times 4} \right) \quad (4.8)$$

dove  $\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}_{3 \times 4}$  rappresenta la matrice costruita con i valori CIE X, Y e Z forniti dallo spettrofotometro e  $\begin{bmatrix} R' & G' & B' \end{bmatrix}_{3 \times 4}$  la matrice costruita con i valori  $R$ ,  $G$  e  $B$  misurati dal sensore, ognuno dei quali ottenuto con riferimento alle quattro scene a, b, c, e d. Una volta determinata la matrice di trasformazione  $\mathbf{T}$ , da questa si possono ottenere valori accurati di illuminazione e temperatura colore.

##### 4.1.2 Fase di test della calibrazione

Al fine di convalidare la procedura di calibrazione sopra descritta e di quantificare l'accuratezza della misurazione dei nodi sensore realizzati, a conclusione della procedura di calibrazione, sono stati effettuati test sperimentali nello stesso ambiente. Per eseguire questo test, lo spettrofotometro CL-500 è stato nuovamente riposizionato vicino a ciascun nodo sensore e sono state confrontate le acquisizioni in corrispondenza di altre scene di luce, diverse da quelle create per la calibrazione.

Sono state utilizzate 5 scene di test: con solo fonti di luce artificiale (scene 1, 2 e 3), con solo luce naturale (scena 4) e un mix delle due (scena 5). Per ogni scena di prova, sia l'illuminamento che la temperatura colore sono stati misurati da ciascun nodo sensore e, contemporaneamente, dal CL-500. Utilizzando questo ultimo dispositivo come riferimento, sono stati calcolati gli errori di misurazione dell'illuminamento e della temperatura colore del nodo sensore. Nella Tabella 4.1 sono riportati i risultati di un nodo sensore di questo test di calibrazione. In essa sono stati messi a confronto i valori di temperatura colore (CCT) e illuminamento (Lux) misurati dal CL-500 e dal nodo sensore calibrato per ciascuna scena, con i relativi errori percentuali.

Si precisa che i test condotti, nella metodologia sopra riportata, hanno interessato tutti i nodi sensore installati nella Cappella. Sulla base dei dati raccolti, sono stati ottenuti valori medi degli errori percentuali relativi di 0,376 % per la CCT e di 0,142 % per l'illuminamento.

Da questa fase di test, si può concludere che gli errori percentuali post-calibrazione, sia della temperatura colore che dell'illuminamento, in queste condizioni ambientali, sono al massimo dell'ordine di qualche decimo percentuale. Dai risultati, è evidente che l'errore di misurazione dei nodi sensore è irrilevante, se riferito ai valori assoluti di temperatura colore e illuminamento, poiché si tratta di variazioni non percepibili dall'occhio umano. Inoltre, qualsiasi errore

Tabella 4.1: Acquisizioni ed errori percentuali delle misurazioni di un nodo sensore rispetto allo spettrofotometro Konica Minolta CL-500.

		Scene				
		1	2	3	4	5
<b>CCT</b>	CL-500 (K)	2888	4260	5380	5477	4774
	Sensore (K)	2890	4291	5388	5508	4812
	Errore (%)	0,069	0,728	0,149	0,566	0,796
<b>Lux</b>	CL-500 (lx)	113	125	117	47	156
	Sensore (lx)	113	125	117	47	155
	Errore (%)	0	0	0	0	0,641

di misurazione del nodo sensore risulta essere dello stesso ordine di grandezza dell'errore nominale e della sensibilità del CL-500 usato come riferimento, attestando così un'accuratezza di misurazione molto elevata dei nodi sensore realizzati, superando di fatto le prestazioni richieste dall'applicazione specifica.

## 4.2 Monitoraggio della luce

Il sistema finora descritto è stato progettato per eseguire un monitoraggio continuo della luce durante tutto l'anno, finalizzato a controllare il contributo della luce naturale, tenendo conto dei suoi cambiamenti dovuti alle condizioni meteorologiche e stagionali.

In particolare i nodi sensore misurano l'illuminamento e la temperatura colore della luce, tenendo conto del contributo combinato della luce naturale e artificiale.

La Figura 4.2 mostra le misure di illuminazione e temperatura colore acquisite dal Nodo Sensore 2 (SN2, la cui posizione la si può vedere in Figura 3.3) su una finestra temporale di 10 giorni. Sono stati stabiliti dei valori "ottimali" di illuminamento e temperatura colore per consentire la miglior lettura degli affreschi con una luce omogeneamente diffusa, in presenza o meno di luce naturale, e nel rispetto delle restrizioni stabilite dalla normativa per la conservazione del patrimonio culturale. I test effettuati con la luce naturale esclusa, hanno condotto a un valore della temperatura colore intorno a 3800 K. Per quanto riguarda i livelli di illuminamento, considerando le indicazioni delle norme di conservazione, è stato identificato un valore limite di 180 lx in media al giorno sugli affreschi che hanno portato a stabilire i livelli di illuminazione della

## 4.2 Monitoraggio della luce

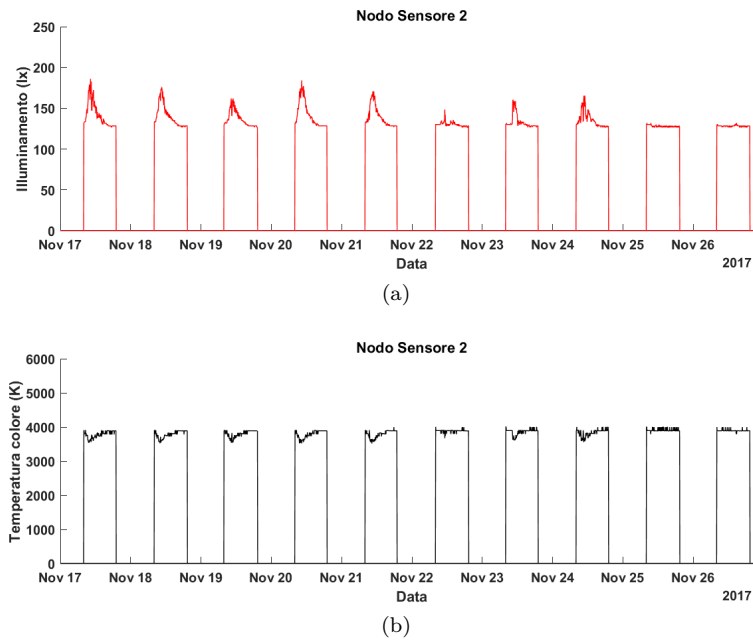


Figura 4.2: Monitoraggio del Nodo Sensore 2 su una finestra temporale di 10 giorni: (a) l'illuminamento (in rosso); (b) temperatura colore (in nero).

luce artificiale a circa 120 lx. La configurazione del sistema di illuminazione artificiale è stata quindi impostata per riprodurre queste condizioni in assenza di luce naturale e rimarrà fissa nella fase di monitoraggio. In Figura 4.3 è riportato il monitoraggio condotto attraverso il Nodo Sensore 2 in una giornata tipica, dalle 8.00 del mattino, accensione dell'illuminazione artificiale, fino alle 19.15, orario di spegnimento, si precisa che l'orario di spegnimento può subire variazioni a seguito di prenotazioni per visite serali che estendono l'orario di funzionamento del sistema di illuminazione sino alle 22.

In Figura 4.3(a) possiamo vedere che l'illuminamento (in rosso) è in media 120 lx, con picchi massimi che raggiungono i 180 lx tra le ore 9.00 e le ore 12.30, conseguenza della massima intensità che la luce naturale raggiunge nell'arco della giornata. Allo stesso tempo, in Figura 4.3(b), la temperatura colore (in nero) in corrispondenza del picco di illuminamento, scende da 3800 K a 3400 K. Proprio analizzando la Figura 4.3, è possibile individuare le potenzialità del sistema realizzato, il quale può permettere di regolare adeguatamente la luce artificiale, compensando quella naturale, abbassando il livello di illuminamento e, allo stesso tempo, aumentando il valore di temperatura colore per una migliore resa nelle ore centrali del mattino. Così facendo si ottengono benefici sia in termini di salvaguardia delle opere, che in efficienza energetica del sistema

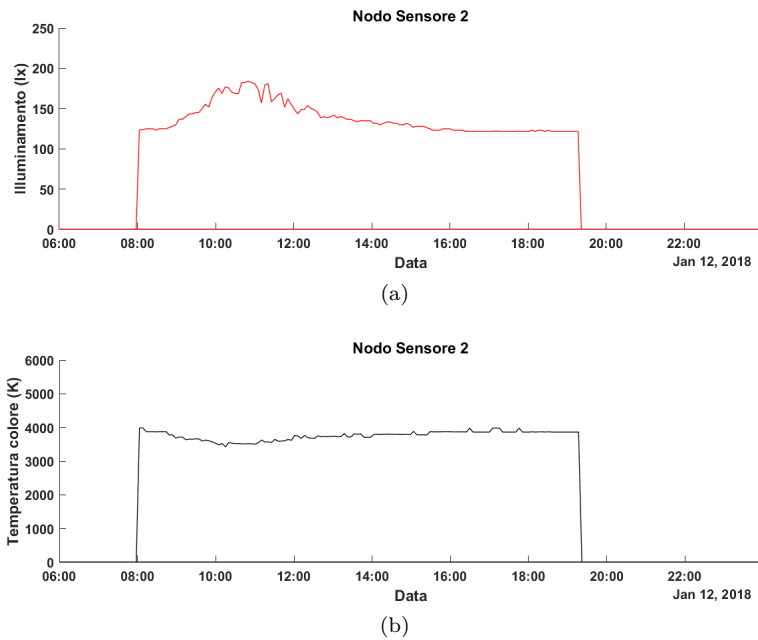


Figura 4.3: Monitoraggio del Nodo Sensore 2 in una giornata tipica: (a) l'illuminamento (in rosso); (b) temperatura colore (in nero).

di illuminazione. Al contrario, con il passare delle ore del giorno, si arriva alla situazione diametralmente opposta, in cui si richiede una graduale sostituzione della luce naturale con quella artificiale, al fine di garantire la migliore qualità sia nella resa cromatica che nel livello di illuminamento.

La necessità di una regolazione della temperatura colore è ancora più evidente in Figura 4.4(a) che si riferisce alle acquisizioni del Nodo Sensore 4 (SN4, la cui posizione la si può vedere in Figura 3.3) su una finestra mensile. Nelle Figure 4.4(b) e Figura 4.4(c) si riportano le registrazioni di due giorni diversi della finestra mensile riportata in Figura 4.4(a). Qui vengono denotate alte escursioni di valori di temperatura colore, da un minimo di 3350 K a un massimo di 4663 K nello stesso giorno (Figura 4.4(b)), o anche situazioni in cui si raggiungono valori minimi pari a 3079 K (Figura 4.4(c)). Pertanto, per ovviare a questo problema, si rendono indispensabili studi approfonditi sulla caratterizzazione dei corpi illuminanti utilizzati, così da compensare le variazioni che affliggono la scena, calibrando la risposta delle sorgenti luminose, in termini di illuminamento e temperatura colore, in funzione di una corretta alimentazione.

È già stato sottolineato che la Cappella degli Scrovegni ha finestre solo sulla facciata sud, quindi è importante che l'uniformità dell'illuminazione sia garantita non solo tra zone specifiche della stessa parete, ma anche sulle due pareti opposte della navata. Infatti, come è possibile notare dalla Figura 4.5, tra due



## 4.2 Monitoraggio della luce

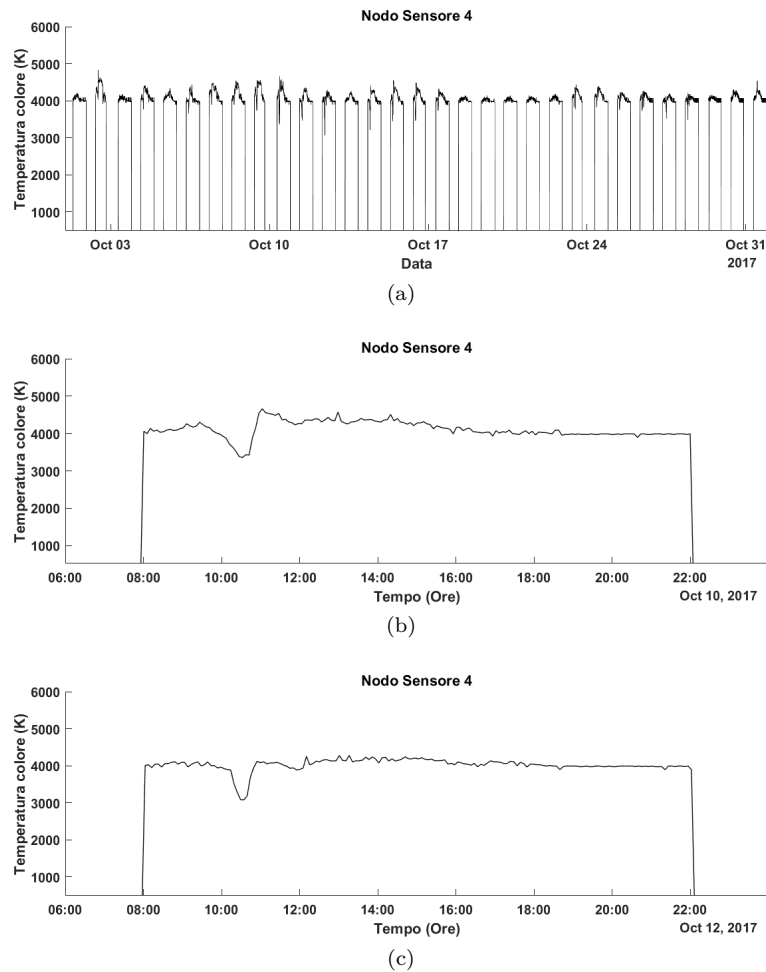


Figura 4.4: Acquisizione della temperatura colore (in nero) del Nodo Sensore 4: (a) in una finestra temporale di un mese; (b) e (c) zoom di due giornate della finestra mensile.

sensori posizionati sulle due facciate opposte (Nodo Sensore 2 della facciata sud in Figura 4.5(a), e Nodo Sensore 4 della facciata nord in Figura 4.5(b)) si hanno andamenti dell'illuminamento diversi per acquisizioni relative allo stesso giorno. Il Nodo Sensore 4 presenta un picco dell'illuminamento in quanto raggiunto dalla luce naturale in maniera diretta, al contrario, il Nodo Sensore 2, installato sulla parete con le finestre, quindi non direttamente esposto alla luce naturale, ha livelli di illuminazione costanti generati quasi esclusivamente dal contributo della luce artificiale (Figura 4.5). Si crea così una situazione di forte contrasto dell'illuminamento, tra la parete sud e la parete nord, compromettendo la visione degli affreschi.

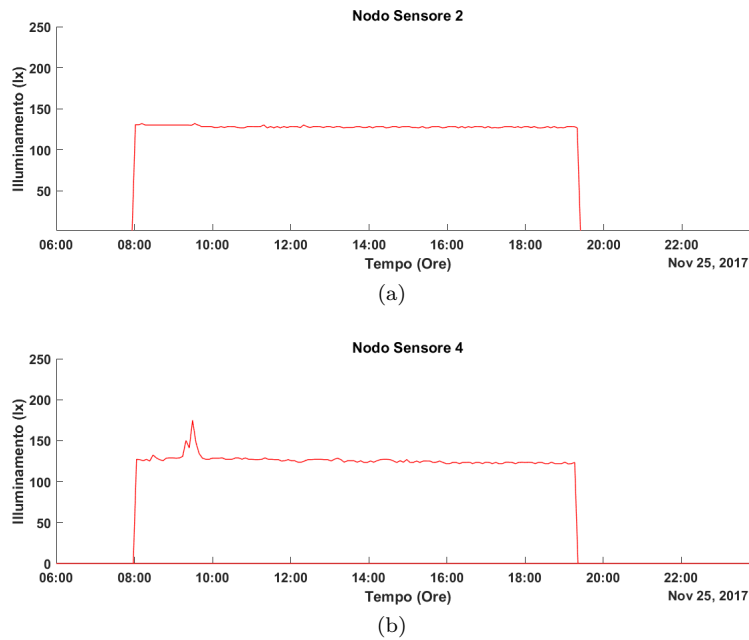


Figura 4.5: Monitoraggio dell'illuminamento (in rosso) su una finestra temporale di un giorno: (a) Nodo Sensore 2 posizionato sulla facciata con finestre; (b) Nodo Sensore 4 posizionato sulla facciata senza finestre.

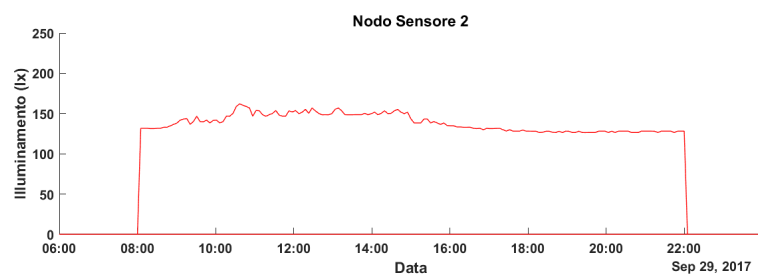
Infine, in Figura 4.6 sono mostrate le acquisizioni del Nodo Sensore 2, posto sotto le finestre della parete sud, in due diversi giorni dell'anno corrispondenti a due diverse stagioni.

Nelle Figure 4.6(a) e 4.6(b) vengono illustrati i monitoraggi durante un giorno d'autunno con cielo sereno, dove l'illuminazione (Figura 4.6(a)) raggiunge un livello medio di circa 162 lx durante le ore centrali della giornata, con una diminuzione dal primo pomeriggio. Mentre la temperatura colore (Figura 4.6(b)) rimane quasi costante per tutto il giorno, condizione dovuta esclusivamente al contributo della luce artificiale. Mentre nelle Figure 4.6(c) e 4.6(d), vengono mostrati i monitoraggi durante una giornata invernale, dove il contributo della luce naturale è concentrato in un periodo di tempo molto più breve e raggiunge livelli più alti di circa 180 lx. Le informazioni raccolte sulle variazioni della luce naturale e la sua interazione con la luce artificiale durante l'intero periodo di monitoraggio, e di cui i casi precedentemente illustrati sono solo alcuni esempi, costituiscono la base per determinare le configurazioni che consentiranno al sistema di illuminazione di autoregolarsi in base alle condizioni di illuminazione nella Cappella. Ciò garantirà un'adeguata integrazione tra le due fonti luminose e la migliore resa cromatica delle tonalità di colore tipica degli affreschi di

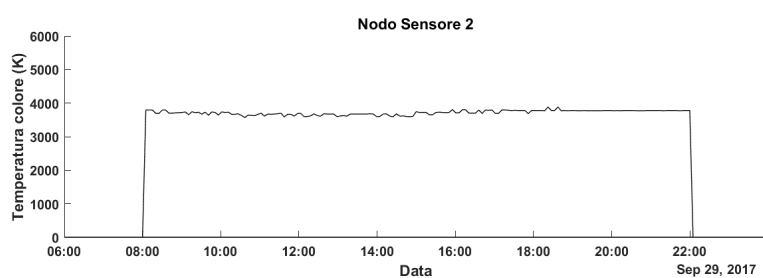
Giotto.

In conclusione, il sistema di controllo dinamico deve fornire la regolazione dell'illuminazione su valori idealmente impostati (definiti in condizioni notturne) e tale da garantire al visitatore il miglior godimento possibile del capolavoro di Giotto, consentendogli di apprezzare ogni dettaglio senza che sia distorto o percettivamente modificato. Tutto questo porta a una regolazione efficiente del sistema di illuminazione grazie alla compensazione dei livelli di luce in tempo reale evitando così fenomeni di abbagliamento e sovraesposizione all'interno della Cappella. Il controllo dell'intero sistema di illuminazione, permette di regolare costantemente l'impianto di illuminazione, tenendo conto dei contributi dati dalle stagioni o dal meteo, per avere sempre i valori desiderati e ottimali della qualità di luce con il minor consumo energetico. Perciò, l'architettura IoT consente di ridurre i consumi energetici e semplifica le operazioni di gestione. L'ottenimento del controllo dei corpi illuminanti è subordinato ad uno studio della risposta illuminotecnica delle luci, così da comprendere il giusto metodo da seguire per ottenere il modello che descrive l'interazione tra i parametri illuminotecnici con i valori di alimentazione, per procedere all'adeguata compensazione dei vari picchi di illuminamento e temperatura colore.

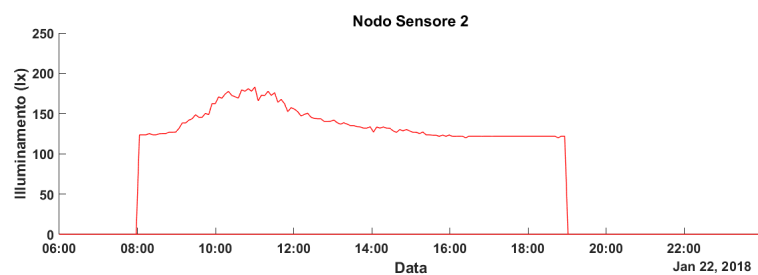
Capitolo 4 Studio e valutazione della qualità della luce



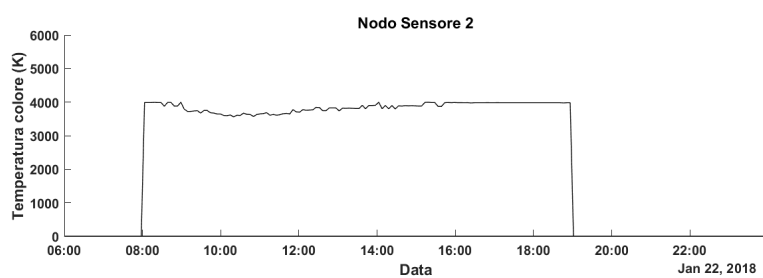
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.6: Monitoraggi del Nodo Sensore 2 durante una finestra temporale di un giorno: (a) l'illuminamento (in rosso) in una giornata d'autunno; (b) la temperatura colore (in nero) durante una giornata d'autunno; (c) l'illuminamento (in rosso) durante una giornata d'inverno; (d) la temperatura colore (in nero) in una giornata d'inverno tipica.

## Capitolo 5

# Un modello per la caratterizzazione delle sorgenti luminose a LED

Nel presente capitolo viene fornito un metodo con cui ottenere un modello efficiente per la caratterizzazione delle sorgenti luminose a LED [49]. Per il suo adeguato sviluppo, in relazione al nostro caso d'interesse, è stato necessario procedere preliminarmente allo studio dei corpi illuminanti del nuovo sistema di illuminazione installato nella Cappella degli Scrovegni. L'implementazione e lo sviluppo del modello sono stati svolti seguendo le stringenti normative del Cultural Heritage, in questo modo si rende di fatto tale modello estendibile e valido per qualsiasi altro tipo di applicazione o sorgente luminosa a LED.

Sulla base del metodo dei minimi quadrati, è stato sviluppato un accurato modello matematico per il controllo dell'illuminazione e della temperatura colore allo scopo di ottenere un efficiente dimmeraggio delle sorgenti luminose a LED. Il dimmeraggio della luce è una caratteristica essenziale per avere il giusto incontro tra le richieste funzionali ed estetiche dello spazio. Inoltre, è stata sviluppata un'interfaccia per settare i valori di alimentazione da dare ai canali caldi e freddi dei LEDs delle sorgenti luminose per ottenere la resa cromatica desiderata. Le alimentazioni fornite sono individuate in modo da impostare i minimi valori di potenza necessari per una determinata qualità di luce, così d'avere il minor consumo energetico possibile. Il lavoro descritto rappresenta il primo esempio di caratterizzazione della sorgente luminosa a LED basata su misurazioni di illuminamento e temperatura colore.

La progettazione di sistemi di illuminazione in edifici storici, musei o gallerie d'arte, è molto delicata per l'impatto che l'illuminazione può avere sugli artefatti in tali ambienti. La specifica tecnica europea CEN/TS 16163: 2014 "Conservazione dei beni culturali - Linee guida e procedure per scegliere l'illuminazione adatta a esposizioni in ambienti interni" tiene conto degli aspetti estetici, espositivi e conservativi, oltre a discutere delle implicazioni della progettazione dell'illuminazione ai fini di salvaguardare i beni culturali. Questa specifica tecnica fornisce raccomandazioni sui livelli minimi e massimi accettabili dell'illuminamento. Nel Cultural Heritage non è sufficiente illuminare gli

oggetti nel modo migliore in termini efficaci o estetici, ma è necessario farlo nel pieno rispetto del problema della conservazione, soprattutto in presenza di superfici fotosensibili o quando l'illuminazione può produrre riscaldamento, accelerare le reazioni chimiche o lo sviluppo di microrganismi. Perciò nel campo dei beni culturali ci sono numerosi aspetti oggettivi da tenere in considerazione: l'aspetto tecnico (come la scelta delle sorgenti luminose), l'aspetto visivo (come l'impatto dell'illuminazione sulla corretta percezione del colore) e l'aspetto conservativo (correlato alla vulnerabilità degli oggetti esposti).

Al fine di studiare e controllare la luce a LED nell'illuminazione di alta qualità, la stabilità spettrale di una sorgente luminosa rappresenta un aspetto critico [50], soprattutto quando il campo di applicazione riguarda il patrimonio culturale. Lo spettro LED non influenza solo l'aspetto cromatico della luce emessa, ma anche la percezione del colore degli oggetti illuminati. Per questo motivo è necessario studiare in dettaglio la risposta della sorgente luminosa a LED al variare della potenza in ingresso, per analizzare come cambiano e come sono correlati tra loro i parametri di illuminazione. Nel dettaglio studiamo la risposta della sorgente luminosa a LED in relazione alla potenza del LED driver, al fine di ottenere un accurato controllo digitale del sistema di illuminazione e un'eccellente prestazione colorimetrica in conformità con gli standard del campo di applicazione.

Per il controllo digitale dell'illuminamento, in un sistema di illuminazione, bisogna settare correttamente le impostazioni dei LED drivers, tenendo presente la percezione dell'occhio umano, definibile da una curva con andamento logaritmico. L'occhio umano è più sensibile alle basse percentuali di illuminamento e meno sensibile alle variazioni man a mano che l'illuminamento aumenta. Perciò, per ottenere una percezione lineare dell'aumento dell'illuminamento, la sorgente luminosa a LED deve avere una curva di questo parametro con andamento esponenziale, così da compensarne l'andamento logaritmico (Figura 5.1). Questo è possibile se il controller e il LED driver sono configurati correttamente, scegliendo per entrambi la curva di attenuazione corretta (Figura 5.2). In genere, i controller digitali dei sistemi di illuminazione disponibili in commercio sono lineari, quindi è necessario che i LED drivers abbiano la possibilità di impostare la curva di dimmerazione con andamento esponenziale. I LED drivers utilizzati in questo studio sono i DC Maxi Jolly US DALI (TCI, Saronno, Italia).

Invece, per quanto riguarda il controllo digitale della temperatura colore, in letteratura la metrica comunemente utilizzata per quantificare la differenza di colore percepibile è l'ellisse di MacAdam. Queste ellissi individuano delle regioni nello spazio colore CIE 1931 definito dalla Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Se due sorgenti luminose sono collocate in due punti diversi dello spazio colore, dove uno dei due cade al di fuori dell'ellisse di MacAdam

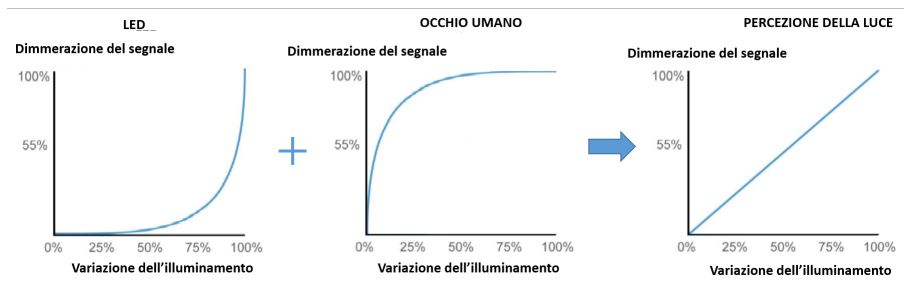


Figura 5.1: Andamento esponenziale della curva di dimmerazione del segnale luminoso nel LED delle sorgenti luminose, necessario per avere una percezione lineare dell'aumento dell'intensità della luce a partire da un andamento logaritmico della sensibilità dell'occhio umano; in blu è rappresentato il segnale dell'illuminamento.

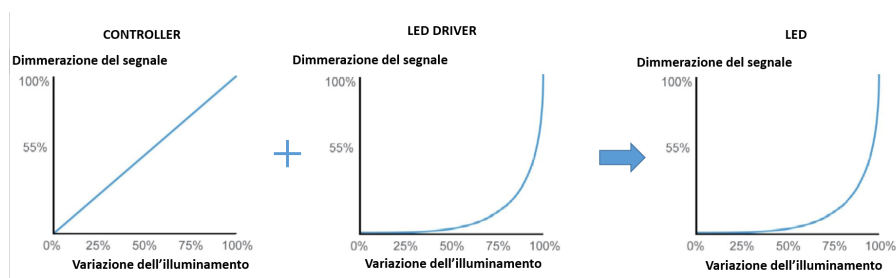


Figura 5.2: Andamento dell'illuminamento (in blu) lineare nel controller del LED ed esponenziale nei LED driver, necessarie per avere una risposta esponenziale nel LED.

dell'altro, allora una differenza di colore tra queste due fonti può essere rilevata dall'occhio umano [42]. Un'altra caratteristica da tenere in considerazione, in quanto influisce sulla qualità della luce dei LEDs, è lo step dell'ellissi di MacAdam, ossia la dimensione dell'ellisse valutata su una scala di 7 steps per definire le deviazioni di colore. Infatti, in funzione della qualità dello strato di fosforo che viene depositato sul chip LED, si è in grado di ottenere una temperatura colore che si avvicina in modo più o meno preciso a quella fornita dal datasheet. A seconda del campo di applicazione di riferimento, ci sono tolleranze accettabili definite dall'American National Standards Institute (ANSI) per stabilire la corrispondenza dei colori tra due fonti. Ad esempio, mentre in alcune applicazioni possono essere ritenute accettabili delle tolleranze di colore elevate, in altri campi, come quello museale, è necessario considerare attentamente la conservazione del colore delle sorgenti luminose a LED, infatti, a seconda delle superfici

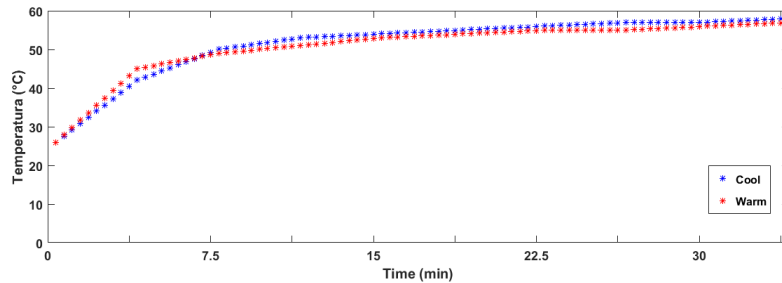


Figura 5.3: I valori medi della temperatura di giunzione del canale freddo (indicato con Cool, blu) e del canale caldo (indicato con Warm, rosso) delle sorgenti luminose a LED, in funzione del tempo in minuti.

da illuminare, la differenza di colore delle luci emesse può essere più o meno percepita dall'occhio umano. Ossia, per rendere impercettibile la differenza di colore è necessario non superare 2-step sulle ellissi di MacAdam in presenza di un muro acromatico (bianco) e, 4-step sulle ellissi di MacAdam su scene o dipinti multicolori [51]. In questo studio, sulla base del datasheet dei LEDs utilizzati, si garantiscono variazioni di 3-step, requisito più stringente rispetto a quanto richiesto da questa applicazione, nella quale si vanno ad illuminare pareti affrescate da Giotto (4-step di MacAdam per scene multicolore).

Ulteriormente le temperature di giunzione dei LEDs vanno ad influire sul controllo sia dell'illuminamento che della temperatura colore. Sulla base dello standard IES LM-79-08 e di altri studi presenti in letteratura, la temperatura di giunzione modifica l'ampiezza e la posizione della lunghezza d'onda di picco dello spettro in modo lineare con il calore [52, 53]. Al fine di valutare la stabilizzazione termica dei LEDs utilizzati in questo studio, è stata effettuata un'analisi dettagliata dell'andamento dello spettro in funzione dell'andamento nel tempo della temperatura di giunzione dei LEDs. Per questa analisi sono state posizionate delle termocoppie sui LEDs caldi e freddi, alimentando alla massima potenza i due canali, in seguito si è misurata la loro temperatura di giunzione attraverso lo strumento Agilent 34970A. Queste misure sono state eseguite su ciascuna sorgente luminosa a LED considerate in questo studio. La temperatura ambiente in cui vengono eseguite le misurazioni è controllata e mantenuta a 25 °C. La Figura 5.3 mostra i valori medi della temperatura di giunzione dei LEDs caldi e freddi. I risultati evidenziano che dopo 25 minuti la stabilizzazione termica è quasi raggiunta, le oscillazioni sono di alcuni gradi, e di conseguenza anche la forma dello spettro si è stabilizzata. Come illustrato in Figura 5.3, dopo 30 minuti di funzionamento si raggiunge definitivamente la stabilità a circa 60 °C sia sui LEDs caldi che freddi.



Tenendo conto dei fattori illustrati fino adesso, nella prossima sezione verrà descritto il protocollo proposto per ottenere un modello efficace che caratterizzi in termini illuminotecnici i corpi illuminanti.

### 5.1 Setup di misura

L'analisi della risposta illuminotecnica delle sorgenti luminose, in funzione della loro alimentazione, è stata eseguita su 12 Laser Blade. Considerando che le sorgenti luminose a LED utilizzate sono di tecnologia Tunable White, aventi due alimentazioni, una per il canale della catena di LEDs a temperatura colore calda e una per il canale della catena di LEDs a temperatura colore fredda, lo spettro emesso dal corpo illuminante può essere regolato mediante la dimmerazione delle due alimentazioni. Il risultato è uno spettro continuamente sintonizzato tra i due limiti di temperatura colore delle due catene di LEDs.

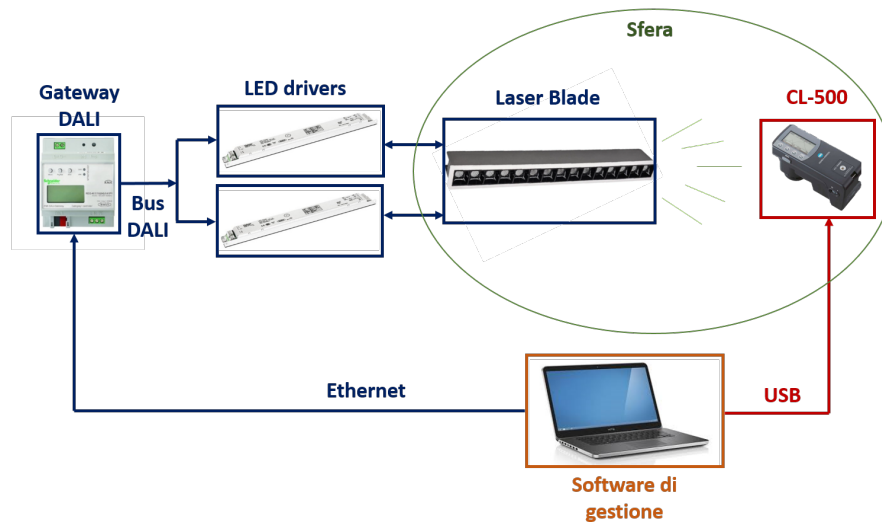
Nella fase di training sono stati usati 10 Laser Blade, dai quali si è ricavato il modello matematico, mentre per la fase di test sono stati presi in esame 2 ulteriori corpi illuminanti con l'obiettivo di validare il modello.

Secondo la norma UNI EN 13032-4, le misurazioni sono state eseguite in una sfera (con un diametro di 195 cm) contenente la sorgente luminosa a LED e uno spettrofotometro di illuminamento, come mostrato in Figura 5.4(b).

Lo spettrofotometro di illuminamento utilizzato (CL-500, Konica Minolta) ci ha permesso di eseguire misurazioni puntuali di parametri di illuminazione, come la CCT, l'illuminamento, il Duv e lo spettro [54]. L'architettura del sistema di acquisizione con i principali componenti sono illustrati nella Figura 5.4(a). In questa figura, ogni componente principale dell'architettura è schematizzato ed evidenziato in diversi colori.

I LED drivers utilizzati in questo studio incorporano interfacce di comunicazione conformi allo standard internazionale IEC Digital Addressable Lighting Interface (DALI). Per il controllo dei corpi illuminanti si è voluto inviare i comandi DALI attraverso il metodo GET, pertanto è stato necessario l'utilizzo di un gateway DALI.

Un software di gestione automatico è stato sviluppato al fine di valutare la risposta della sorgente luminosa a diversi valori di potenza in ingresso. In seguito verrà descritto come sono stati scelti i valori di alimentazione, sia del canale caldo che freddo, che risultano diversi per la fase di training e test. Il processo di misura automatizzato interfaccia il PC con le luci, attraverso l'Ethernet, e con il Minolta attraverso l'USB. Per ciascun comando di ingresso di alimentazione del canale freddo e caldo, i parametri di illuminazione sono stati acquisiti e salvati dopo 30 minuti, questo delay è stato aggiunto per le considerazioni fatte precedentemente, ovvero per rendere l'acquisizione indipendente dalla



(a)



(b)

Figura 5.4: Setup di misura: (a) architettura realizzata; (b) sfera usata per le misure.

temperatura di giunzione dei LEDs, aspettando quindi che la temperatura si sia stabilizzata.

### 5.1.1 Fase di Training

La fase di training è stata eseguita su un numero significativo di campioni rappresentativi della famiglia di prodotti considerati. In particolare, sono state selezionate 10 sorgenti luminose a LED ed è stata eseguita la caratterizzazione di ciascun Laser Blade. In relazione alla percezione dell'occhio umano, per non perdere informazioni in questa analisi, è stata fatta un'attenta scelta dei valori

di alimentazione delle sorgenti luminose a LED, con misure più fitte a bassi valori di alimentazione. Pertanto, all'aumentare della corrente di alimentazione, è stato necessario considerare aumenti percentuali differenti di potenza. In particolare, la potenza di alimentazione viene aumentata di percentuali pari a: 1% tra (0–10)%, 5% tra (10–50)% e 10% tra (50–100)%.

### 5.1.2 Sviluppo del Modello Matematico

Durante la fase di training, sono state eseguite tutte le acquisizioni delle 10 sorgenti luminose a LED. Sono stati ottenuti i valori di CCT e di illuminamento in corrispondenza di tutte le possibili combinazioni di potenza da 0% a 100% tra canale freddo e caldo ( $P_c$  e  $P_w$ ). I LEDs che compongono i Laser Blade sono controllati in corrente, perciò i valori di potenza di alimentazione del canale caldo e freddo sono legati a questo parametro secondo le formule:

$$P_c = V_c \cdot I_c \cdot d_c \quad (5.1)$$

$$P_w = V_w \cdot I_w \cdot d_w \quad (5.2)$$

dove  $V_c$  e  $V_w$  sono le cadute di tensione delle catene di LEDs, fredda e calda, collegate in serie;  $I_c$  e  $I_w$  sono le correnti massime che possono essere fornite dai LED drivers per il canale caldo e freddo; infine,  $d_c$  e  $d_w$  sono i valori percentuali delle correnti di uscita che possono essere impostati sui LED drivers per implementare rispettivamente la funzione di dimmerazione (attenuazione) dei canali freddo e caldo.

I valori medi delle misurazioni su tutti i corpi illuminanti, per ciascuna coppia di potenze di input ( $P_c, P_w$ ), sono stati calcolati e illustrati in Figura 5.5 e in Figura 5.6, sia per la CCT (in Figura 5.5) che per l'illuminamento (in Figura 5.6). In Figura 5.5 è mostrata la curva di superficie della CCT, quando cresce la potenza del canale freddo, mantenendo costante l'alimentazione del canale caldo, la CCT si sposta verso valori elevati e viceversa per il canale caldo. Mentre in Figura 5.6, dove è mostrato l'andamento dell'illuminamento, quando aumenta la potenza, sia del canale caldo che del canale freddo, aumentano anche i lux.

Nelle Figure 5.5 e 5.6 sono mostrate sul piano x-y le curve di livello per la CCT e per l'illuminamento. Queste identificano le coppie di potenze del canale caldo e freddo che mantengono costante la temperatura colore e l'illuminamento. Perciò muovendosi lungo queste linee abbiamo tutti gli input di potenza ( $P_c, P_w$ ) che mantengono costanti la CCT o l'illuminamento. Dall'intersezione tra le curve di livello della CCT e dell'illuminamento è possibile trovare i valori corrispondenti di potenza del canale caldo e freddo che ci consentono

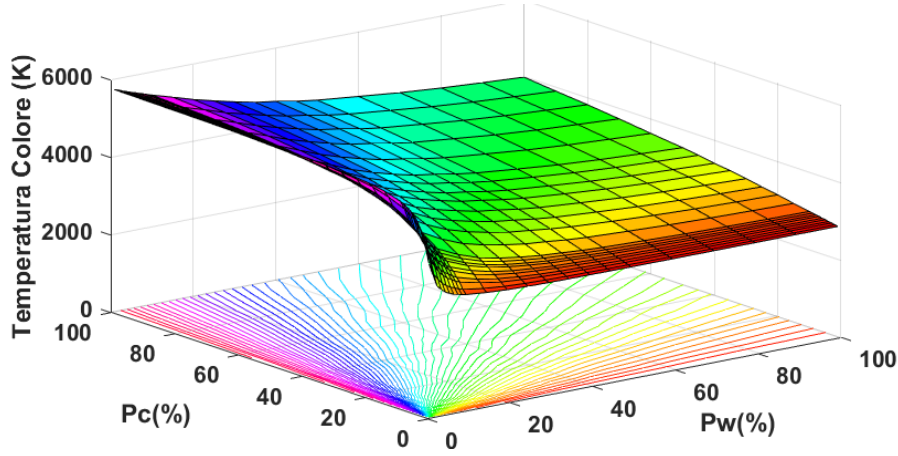


Figura 5.5: Curva di superficie media della CCT in funzione della percentuale di alimentazione, rappresentativa dell'intera famiglia di sorgenti luminose a LED, con le rispettive curve di livello.

di ottenere i valori dei parametri illuminotecnici desiderati. Nella Figura 5.5 viene mostrato come le curve di livello della CCT sono un ventaglio di curve, dove partendo dal centro, in cui si identifica una CCT naturale con la stessa percentuale di alimentazione per il canale caldo e freddo, spostandoci verso le basse potenze del canale caldo domina una CCT fredda, mentre aumentando le potenze del canale caldo si ottiene una CCT più calda. Invece, in Figura 5.6 le curve di livello dell'illuminamento sono un fascio di curve parallele in cui, per mantenere un illuminamento costante, le potenze del canale caldo e freddo devono sempre essere bilanciate.

Per stimare la superficie polinomiale media di tutte le acquisizioni effettuate, è stato prodotto un polinomio che rappresenta l'intera famiglia di sorgenti luminose a LED. A partire dai valori dei punti noti in corrispondenza delle coppie di potenza  $(P_c, P_w)$ , sono state trovate delle funzioni di approssimazione spaziale per descrivere l'andamento di illuminamento e temperatura colore. Di queste sono stati calcolati i coefficienti attraverso il metodo dei minimi quadrati [55].

Per l'illuminamento (Figura 5.7) è stata definita la seguente funzione,  $F_{Lux}(P_c, P_w)$ :

$$F_{Lux}(P_c, P_w) = \sum_{i+j=0}^n a_{ij} \cdot P_c^i \cdot P_w^j \quad (5.3)$$

dove il grado polinomiale  $n$  è pari a 4, attraverso il metodo dei minimi quadrati sono stati trovati i coefficienti  $a_{ij}$  minimizzando la differenza tra la curva media e i punti noti (indicati con i punti blu in Figura 5.7).

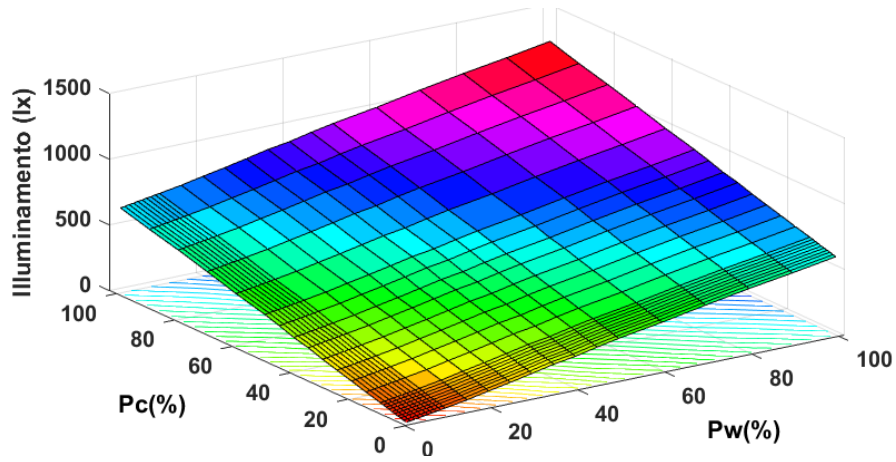


Figura 5.6: Curva di superficie media dell'illuminamento in funzione della percentuale di alimentazione, rappresentativa dell'intera famiglia di sorgenti luminose a LED, con le rispettive curve di livello.

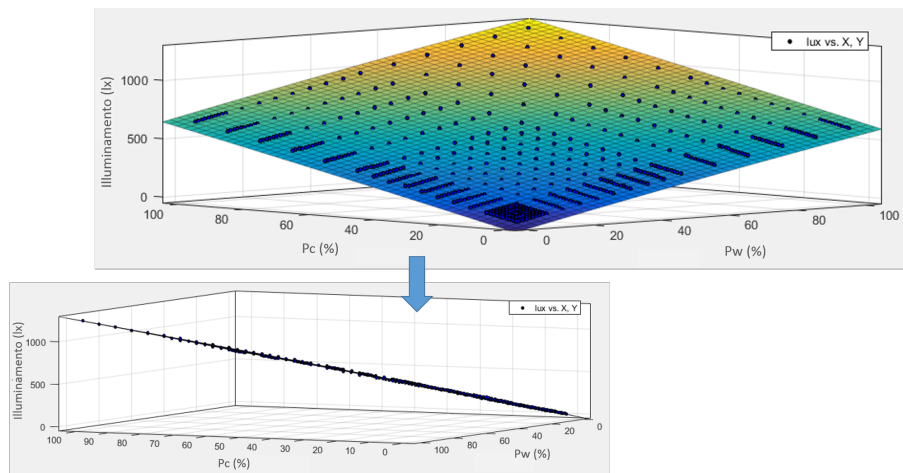


Figura 5.7: Superficie polinomiale rappresentante l'illuminamento.

Mentre per quanto riguarda il calcolo della superficie polinomiale della CCT, come mostrato nella Figura 5.8, è stato più complesso. Infatti per migliorare l'approssimazione e ridurre l'errore, evidenziato in Figura 5.8, sono state calcolate più funzioni per la CCT in domini rappresentati da range di potenza più

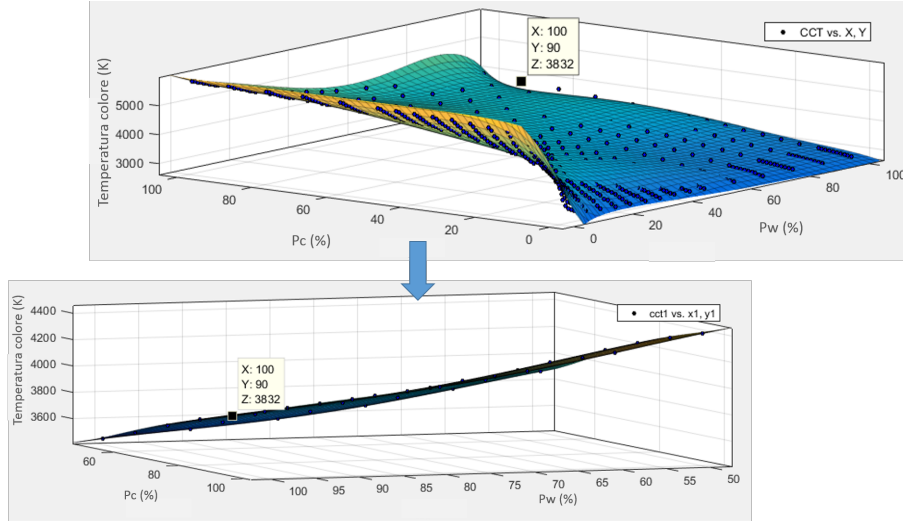


Figura 5.8: Superficie polinomiale rappresentante la CCT; in basso l'approssimazione effettuata nel range  $50 < P_c \leq 100$ ,  $50 < P_w \leq 100$ .

brevi. Perciò, si può descrivere la funzione CCT,  $F_{CCT}(P_c, P_w)$ , come segue:

$$F_{CCT}(P_c, P_w) = \begin{cases} f_{CCT,1}(P_c, P_w) & 0 \leq P_c \leq 10, 0 \leq P_w \leq 10 \\ f_{CCT,2}(P_c, P_w) & 10 < P_c \leq 50, 0 \leq P_w \leq 10 \\ f_{CCT,3}(P_c, P_w) & 50 < P_c \leq 100, 0 \leq P_w \leq 10 \\ f_{CCT,4}(P_c, P_w) & 0 \leq P_c \leq 10, 10 < P_w \leq 50 \\ f_{CCT,5}(P_c, P_w) & 10 < P_c \leq 50, 10 < P_w \leq 50 \\ f_{CCT,6}(P_c, P_w) & 50 < P_c \leq 100, 10 < P_w \leq 50 \\ f_{CCT,7}(P_c, P_w) & 0 \leq P_c \leq 10, 50 < P_w \leq 100 \\ f_{CCT,8}(P_c, P_w) & 10 < P_c \leq 50, 50 < P_w \leq 100 \\ f_{CCT,9}(P_c, P_w) & 50 < P_c \leq 100, 50 < P_w \leq 100 \end{cases} \quad (5.4)$$

dove

$$f_{CCT,l}(P_c, P_w) = \sum_{k+y=0}^m b_{ky} \cdot P_c^k \cdot P_w^y \quad (5.5)$$

con  $1 \leq l \leq 9$ , range di potenze in cui è stata suddivisa la funzione  $F_{CCT}(P_c, P_w)$ . Il grado polinomiale  $m$  è 8 e anche qui è stato usato l'approccio dei minimi quadrati per calcolare i coefficienti  $b_{ky}$ .

Con l'obiettivo di fornire i valori minimi di potenza da dare al canale freddo,  $P_{l_c}$ , e caldo,  $P_{l_w}$ , per ottenere i valori di temperatura colore (CCT) e illumina-

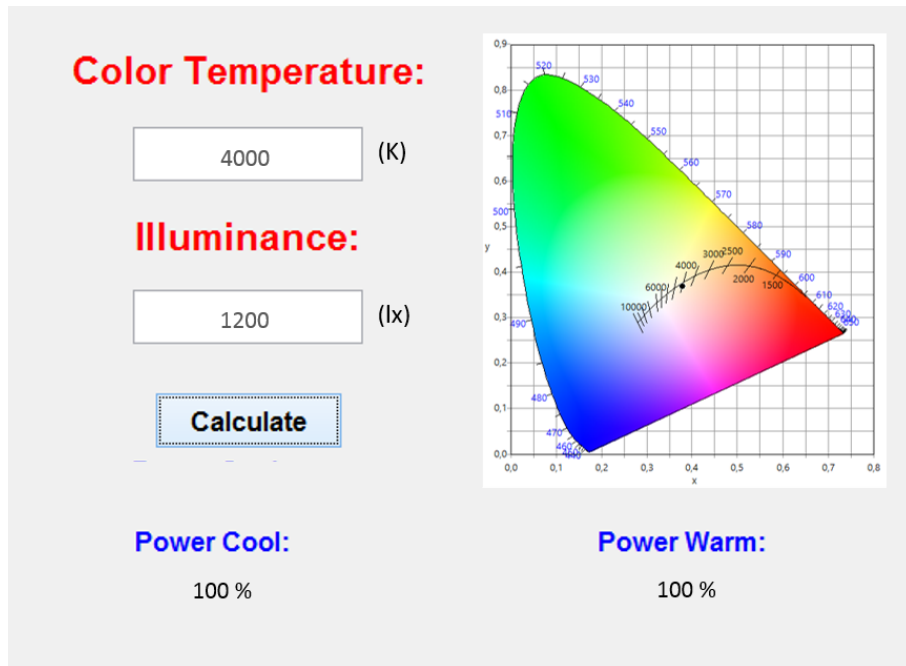


Figura 5.9: Interfaccia sviluppata per ricavare la potenza dei canali (freddo e caldo) in funzione della temperatura colore e dell'illuminamento richiesti.

mento ( $Lux$ ) desiderati per una determinata resa cromatica, bisogna risolvere il seguente sistema, ottenuto dalle funzioni precedenti:

$$(P_{t_c}, P_{t_w}) = \begin{cases} F_{Lux}(P_c, P_w) = Lux \\ F_{CCT}(P_c, P_w) = CCT \end{cases} \quad (5.6)$$

Infine è stata sviluppata un'interfaccia, come strumento d'ausilio, con la quale, una volta impostati i parametri di CCT e illuminamento, si ottengono i valori corretti di alimentazione di un corpo illuminante (Figura 5.9).

### 5.1.3 Fase di Test

Le prestazioni del modello proposto sono state valutate attraverso una fase di test che ha coinvolto ulteriori sorgenti luminose a LED non considerate nella fase di training. Il setup di misura adottato è lo stesso utilizzato nella fase di training e mostrato nella Figura 5.4(a). Ciò che vengono modificati sono i valori di alimentazione dei corpi illuminanti. Infatti, le potenze ( $P_{t_c}$  e  $P_{t_w}$ , per il canale freddo e caldo dei LEDs) usate nella fase di test sono state ottenute

attraverso il sistema 5.6, derivante dal modello matematico. Queste coppie di potenze sono state ricavate risolvendo il sistema per determinati valori di CCT ( $CCT$ ) e illuminamento ( $Lux$ ) scelti, per la prima tra un valore minimo di 2700 K e un valore massimo di 5700 K con un delta di 100 K, mentre per la seconda tra un valore minimo di 20 lx e un massimo di 1200 lx con un delta di 40 lx. I dati acquisiti durante la fase di test sono stati utilizzati per il confronto tra i parametri misurati dallo spettrofotometro e quelli dati in input al sistema 5.6.

## 5.2 L'analisi delle performance del modello sviluppato

L'approccio tradizionale per la caratterizzazione delle sorgenti luminose prevede una lunga procedura comprendente il settaggio dei parametri di alimentazione dei corpi illuminanti e una successiva misurazione manuale dei parametri illuminotecnici, rendendo il processo iterativo fino al raggiungimento della resa cromatica desiderata.

Il nuovo metodo descritto, per ottenere una descrizione della caratterizzazione di una famiglia di corpi illuminanti, permette di avere un modello di riferimento in fase di controllo delle sorgenti luminose.

Il modello matematico descrive le curve medie che legano l'andamento della CCT e dell'illuminamento all'alimentazione delle sorgenti luminose (Figure 5.5, 5.6).

Nella fase di test sono state fatte delle acquisizioni su ulteriori corpi illuminanti, per misurare i parametri illuminotecnici che si hanno a determinati valori di alimentazione, scelti sulla base del modello matematico sviluppato.

Tale fase è stata essenziale per validare il nostro modello attraverso il confronto tra i valori misurati dallo spettrofotometro e i valori attesi che sono stati dati in input al sistema 5.6.

Per un'analisi più accurata, le differenze relative percentuali, sia della CCT che dell'illuminamento, sono state calcolate come segue:

$$\Delta P_{rel}(\%) = [(P_{measured} - P_{expected})/P_{measured}] \cdot 100 \quad (5.7)$$

dove P rappresenta il generico parametro illuminotecnico (ovvero la CCT o l'illuminamento),  $P_{measured}$  è il valore misurato dallo spettrofotometro, mentre  $P_{expected}$  è il valore impostato nel sistema 5.6, cioè il parametro che ci aspettiamo di avere se impostiamo il corpo illuminante a quei valori di alimentazione.

La Figura 5.10 mostra la distribuzione delle differenze relative percentuali della CCT per una sorgente luminosa a LED utilizzata nella fase di test. In questa figura è mantenuto il legame tra l'errore e la potenza di alimentazione del canale caldo e freddo. Mentre la Figura 5.11 perde il legame con la potenza di



## 5.2 L'analisi delle performance del modello sviluppato

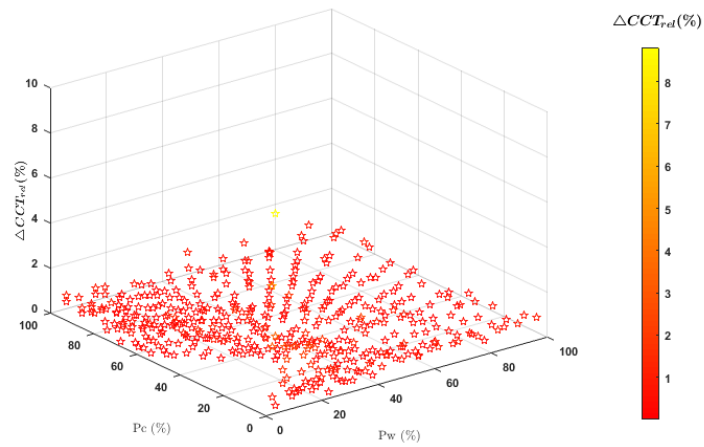


Figura 5.10: Distribuzione delle differenze relative percentuali della CCT in funzione della potenza di ingresso.

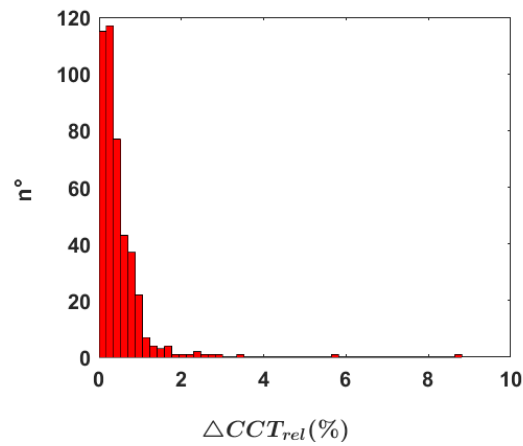


Figura 5.11: Istogramma delle differenze relative percentuali della CCT sulle due sorgenti luminose a LED usate per la fase di test.

ingresso della sorgente luminosa a LED e mostra i risultati ottenuti su entrambe le sorgenti luminose a LED usate nella fase di test. Ad ogni modo, è possibile osservare come la distribuzione converge a 0%, con un errore massimo del 9% per la CCT.

I risultati ottenuti per l'illuminamento sono mostrati nelle Figure 5.12 e 5.13.

La Figura 5.12 mostra la distribuzione spaziale delle differenze relative percentuali dell'illuminamento per una sorgente luminosa a LED, anche qui mo-

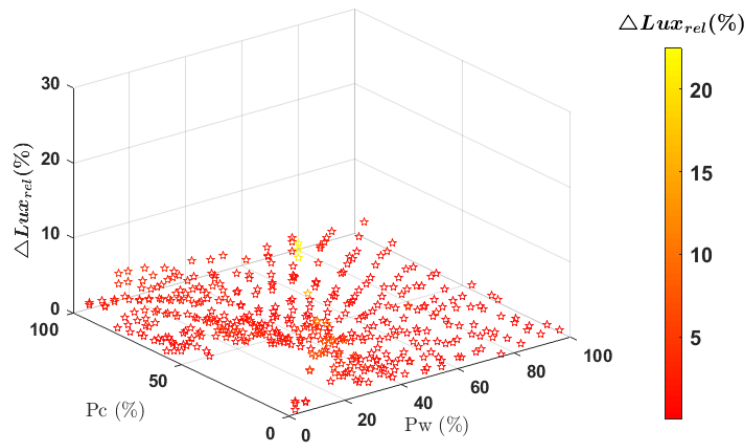


Figura 5.12: Distribuzione delle differenze relative percentuali dell'illuminamento in funzione della potenza di ingresso.

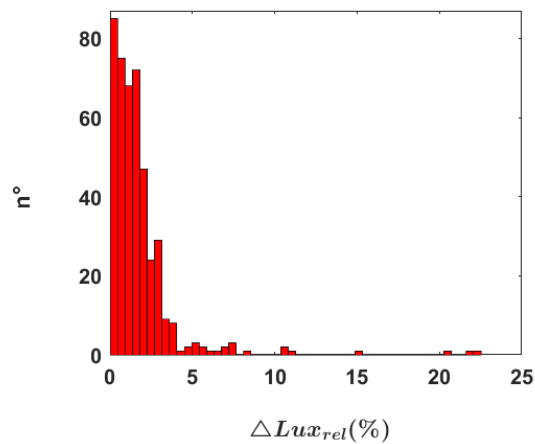


Figura 5.13: Istogramma delle differenze relative percentuali dell'illuminamento sulle due sorgenti luminose a LED usate per la fase di test.

strandando il legame tra l'errore e l'alimentazione. La Figura 5.13, invece, mostra i risultati complessivi di entrambe le sorgenti luminose a LED utilizzate per la validazione del modello nella fase di test. I risultati, anche per l'illuminamento, mostrano una convergenza verso lo zero e un errore massimo del 23%. A differenza della CCT, per l'illuminamento sono stati ottenuti errori maggiori a bassi valori di potenza in input (Figura 5.12).

## 5.2 *L'analisi delle performance del modello sviluppato*

L'errore del 9% per la CCT e del 23% per l'illuminamento si hanno a basse potenze di ingresso, cioè a valori non utilizzabili in applicazioni pratiche e sono dovuti alle basse riflessioni della luce all'interno della sfera. Per valori tipici di alimentazione dei corpi illuminanti, invece si hanno errori del 0.3% per la CCT e del 1.5% per l'illuminamento. In ogni caso questi errori sono inferiori alle soglie di percezione dell'occhio umano corrispondenti a 100 K per la temperatura colore e 40 lx per l'illuminamento.

Infine, considerando che in questa applicazione vengo usati LEDs il cui datasheet garantisce la temperatura colore per una regione dello spazio colore all'interno dell'ellisse di MacAdam di 3-step, vuol dire che l'errore che si può commettere, nella resa cromatica che si ottiene impostando le potenze di alimentazione ricavate dal sistema 5.6, ricade all'interno della MAcAdam di 3-step.



## Capitolo 6

# Implementazione della rete wireless per applicazioni di rischio ambientale

In questo capitolo descriveremo la seconda applicazione implementata che sfrutta la rete diffusa di sensori sviluppati [56].

L'Italia, per la sua particolare posizione geografica, è uno dei paesi più sismici nell'area del Mediterraneo. La frequenza dei terremoti che hanno storicamente colpito il suo territorio e l'intensità che alcuni di essi hanno raggiunto, hanno avuto un significativo impatto sociale ed economico [57]. La più alta sismicità si concentra nella parte centro-meridionale della penisola lungo la dorsale appenninica. Tra il 2016 e il 2017 nell'Italia Centrale si sono verificati numerosi eventi sismici, che hanno causato centinaia di morti, numerosi danni strutturali e il crollo di edifici [58].

L'obiettivo è proporre un dispositivo a basso costo e a basso consumo da utilizzare per il monitoraggio sismico. La finalità è progettare un dispositivo che possa essere distribuito in modo denso e prolifico in aree ad alto rischio, rafforzando così la rete sismica italiana e fornendo una stima più accurata delle mappe di scuotimento. Il sensore è costituito da tre accelerometri ad asse singolo collegati a un registratore di dati con funzionalità di acquisizione, sincronizzazione e trasmissione. Il basso costo e le alte prestazioni di questa unità può consentire la diffusione di sistemi intelligenti finalizzati alla prevenzione del collasso di strutture critiche, come scuole e ospedali, oltre a costituire il nucleo fondante di sistemi di Earthquake Early Warning (EEW) basati su architetture di Internet of Things.

Metteremo in evidenza le prestazioni raggiunte dall'unità di sensing realizzata, dimostrando che può essere comparata a sistemi più sofisticati e costosi.

## 6.1 Una rete Low-Cost per il Monitoraggio Sismico

In Italia l'autorità pubblica responsabile del monitoraggio sismico del territorio nazionale italiano è l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). La Rete Sismica Nazionale italiana (RSN), gestita dall'INGV, consiste in circa 400 stazioni sismiche su siti fissi, dotate di strumenti che rilevano ogni leggero movimento del terreno in tempo reale e rielaborano informazioni accurate in caso di eventi sismici di qualsiasi entità. Dal 1990, l'INGV ha anche una rete sismica mobile (RSM) costituita da stazioni sismiche temporanee che consentono di monitorare esperimenti scientifici sul campo e di far fronte alle emergenze legate al verificarsi di un grave terremoto [59].

L'INGV utilizza una rete mista di sensori costituita da velocimetri e accelerometri al fine di monitorare la sismicità del territorio nazionale e acquisire diversi segnali sismici. I velocimetri, solitamente dedicati alla registrazione di movimenti deboli, vengono utilizzati per migliorare la risoluzione della rete sismica al fine di descrivere accuratamente l'evoluzione spazio-temporale degli eventi. I velocimetri a breve periodo sono utili principalmente per registrare la sismicità locale, mentre i velocimetri a banda molto larga possono anche essere applicati per ricostruire la cinematica delle fonti, le strutture litosferiche e altro. Mentre, gli accelerometri, con elevata gamma dinamica, sono integrati nella rete sismica e vengono utilizzati per registrare elevate magnitudo, ottenendo così l'intera forma d'onda senza saturazione del segnale, in modo che si possa determinare in maniera affidabile le caratteristiche dell'evento e i parametri di movimento di diversi terreni. Le prestazioni e la dinamica, congiuntamente a tutte le specifiche tecniche delle unità di rilevamento, devono essere prese in considerazione quando si esaminano gli strumenti sismici. In effetti, i fattori chiave quali sensibilità, rumore di fondo, fondo scala, larghezza di banda, costi e affidabilità svolgono un ruolo importante nella scelta dei componenti nel campo sismico.

Parallelamente, l'evoluzione tecnologica ha visto i sistemi Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) essere utilizzati in un ampio spettro di settori quali automobilistico, monitoraggio ambientale, applicazioni per smartphone, dispositivi medici indossabili, ecc. [60, 61, 62, 63, 64, 65]. I sensori MEMS standard, costruiti per le applicazioni precedenti, generalmente non soddisfano i requisiti necessari per essere integrati come componenti delle reti sismiche e quindi essere utilizzati in questo particolare ambito di applicazione.

Visto il basso costo e basso consumo dei MEMS c'è il crescente interesse nell'impiegarli nel campo sismico ad integrazione della rete di monitoraggio nazionale, previo rispetto di determinati criteri prestazionali [66], [67]. Ad esempio, devono essere in grado di registrare in maniera affidabile fino a 1 mg (con un rumore massimo dello strumento di alcune decine di  $\mu\text{g}$ ), poichè que-

sto valore rappresenta una stima della soglia di agitazione percepita dalla gente [68]. Questi sensori possono ulteriormente essere utilizzati per generare mappe di scuotimento, monitorare lo scuotimento alla base di edifici strategici, diventare i componenti diffusi dei sistemi di allarme precoce di terremoto (EEW) e contribuire anche alla localizzazione e alla caratterizzazione dei terremoti su scala locale [69], [70], [71].

Il paradigma dell'Internet of Things ha aperto una porta promettente alla risoluzione di molti problemi di sicurezza grazie alle sue caratteristiche interessanti, quali eterogeneità, interoperabilità, leggerezza e flessibilità. Un'unità accelerometrica a basso costo e ad alte prestazioni può diventare un elemento centrale di Smart Objects in grado di eseguire un monitoraggio remoto diffuso, analisi e aggregazione dei dati in tempo reale, generare avvisi tempestivi, notifiche e una migliore conoscenza del territorio [72].

Quello che è stato proposto è un'unità di rilevamento basata solo su accelerometri MEMS, miniaturizzati, a basso costo e a basso consumo energetico, per misurare e analizzare eventi sismici, anche di bassa magnitudo. Il dispositivo è stato posizionato esattamente accanto a una stazione sismica INGV ad alte prestazioni nel centro Italia, da Settembre 2016 a Marzo 2017, allo scopo di confrontare le prestazioni dei due dispositivi. In questo periodo, nell'Italia Centrale, si sono verificati migliaia di eventi sismici, in una gamma di magnitudo estremamente ampia, che ci hanno permesso di convalidare sul campo il dispositivo.

## 6.2 Parametri di studio

Le onde sismiche sono onde di energia causate da movimenti o da esplosioni sotterranee la cui energia viaggia attraverso la Terra propagandosi sotto forma di onde superficiali e di volume. Le prime si muovono lungo gli strati a ridosso della superficie terrestre, propagandosi attraverso la crosta terrestre come increspature sull'acqua, mentre le altre possono attraversare gli strati interni della Terra e propagarsi in profondità. Le onde di volume giungono prima a destinazione e hanno una frequenza superiore di quelle superficiali. Ciò nonostante non sono le principali responsabili dei danni e della distruzione associata ai terremoti, infatti i danni e la forza delle onde sismiche sono inversamente proporzionali alla loro profondità. La misurazione delle onde sismiche e la determinazione delle cosiddette mappe di scuotimento sono strumenti che consentono di approfondire la conoscenza della struttura interna della Terra e di identificare e classificare i piani di faglia.

Le onde di volume sono di due tipologie:

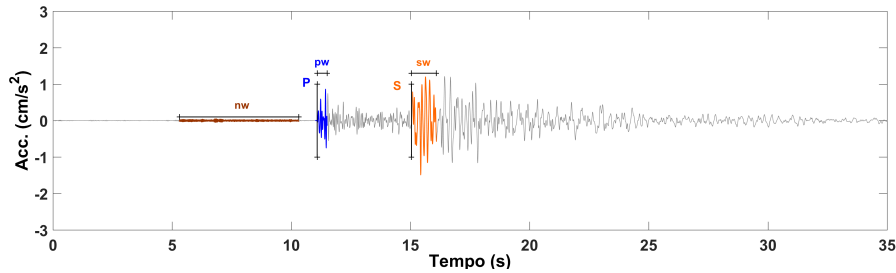


Figura 6.1: Esempio di una forma d'onda sismica registrata da un accelerometro dell'INGV; le tracce colorate evidenziano le fasi delle onde P (in blu) e S (in arancione), inoltre sono anche indicate le tre finestre di analisi: finestra del rumore (nw), finestra della fase P (pw) e finestra della fase S (sw).

- l'onda P (o onda primaria), questa è il tipo di onda sismica più veloce e anche la prima a raggiungere una stazione di rilevamento. L'onda P può muoversi attraverso rocce solide e fluidi, come l'acqua o altri strati liquidi della Terra. Queste sono anche conosciute come onde di compressione, a causa dell'azione di spinta e trazione che svolgono. Le particelle sottoposte a un'onda P si muovono nella stessa direzione dell'onda, che è la direzione lungo la quale viaggia l'energia, ed è chiamata "direzione di propagazione dell'onda";
- l'onda S (o onda secondaria), questa è la seconda onda evidente che viene percepita in un terremoto. Un'onda S è più lenta di un'onda P e può muoversi solo attraverso la roccia solida. Le onde S muovono le particelle di roccia dall'alto verso il basso, perpendicolarmente alla "direzione di propagazione dell'onda".

In Figura 6.1 è riportata un'onda sismica come grafico di accelerazione, in cui sono evidenziate le tre finestre di analisi usate per lo studio dei parametri sismici. Le finestre rappresentate sono, da sinistra verso destra, la finestra del rumore (nw), della fase P (pw) e della fase S (sw). La nw evidenzia il rumore di fondo che è la soglia sotto la quale il segnale di interesse è indistinguibile dal rumore stesso. Il rumore di fondo è un parametro che quantifica il livello di prestazione dell'unità di rilevamento. Le pw e sw rappresentano il contributo delle onde P e S e l'analisi in tali finestre è fondamentale per la classificazione dei terremoti.

Il compito principale di un sensore accelerometrico utilizzato per il monitoraggio sismico è di riprodurre la forma d'onda del movimento del suolo anche in caso di eventi sismici con elevata magnitudo. Dal segnale accelerometrico è possibile estrarre i parametri di Strong Motion che descrivono la gravità di un



terremoto. Da questi parametri è anche possibile stabilire delle relazioni con gli effetti superficiali degli eventi sismici, come danni a edifici, a infrastrutture o alla popolazione esposta.

Il parametro più semplice e ampiamente utilizzato è il Peak Ground Acceleration (PGA), il picco più alto, in valore assoluto, nell'accelerogramma, che caratterizza l'ampiezza dello shock sismico. In particolare, il PGA dell'accelerazione orizzontale è generalmente il parametro più utile e interessante, in quanto è strettamente correlato alle forze dinamiche indotte dal sisma sulle strutture. Tuttavia, questo parametro da solo non può descrivere completamente le complesse funzioni del terremoto. In effetti, il PGA non fornisce informazioni sulla durata dell'evento e sul contenuto in frequenza.

Un altro parametro importante è il Peak Ground Velocity (PGV), ottenuto attraverso l'integrazione dell'accelerazione e costituito dal valore assoluto del picco massimo. Essendo la velocità meno sensibile alle alte frequenze, il PGV è utile per caratterizzare il danno potenziale per quelle strutture sensibili alle frequenze intermedie (edifici alti e flessibili, ponti, ecc.).

Arias Intensity ( $AI$ ) è il parametro che consente di ottenere informazioni sull'ampiezza e la frequenza del movimento [73], [74]. Dalla definizione di A. Arias [75] si ha:

$$AI = \frac{\Pi}{2 * g} \int_0^T [a(t)]^2 dt \quad (6.1)$$

dove  $a(t)$  è una delle tre componenti accelerometriche,  $T$  è la durata totale della registrazione in secondi,  $t$  è il tempo in secondi,  $g$  è l'accelerazione di gravità in  $\text{cm/s}^2$ . Questo parametro è dimensionalmente una velocità ( $\text{cm/s}$ ) e rappresenta l'energia di dissipazione totale per unità di massa di un sistema elasto-plastico.

Come proposto da G. W. Housner [76], la relazione tra la massima energia di deformazione  $E_{e,max}$  immagazzinata in un sistema elastico e la sua risposta di pseudo-velocità  $S_v$  è:

$$E_{e,max} = \frac{m \cdot S_v^2}{2} \quad (6.2)$$

dove  $m$  è la massa del sistema. Questa formula indica che lo spettro pseudo-velocità può essere utilizzato per quantificare la gravità dei terremoti nell'analisi sismica e per valutare l'energia di un terremoto e la sua capacità di danneggiare le strutture.

G. W. Housner ha anche definito l'intensità spettrale ( $SIH$ ) con la stessa unità di misura dello spostamento:

$$SIH(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi, T) dT \quad (6.3)$$

dove l'integrale del tempo si riferisce all'area dello spettro di risposta pseudo-velocità  $S_v$  che varia nel periodo di tempo  $T$  da 0,1 a 2,5 s, dove la maggior parte delle strutture hanno un periodo fondamentale di vibrazione, mentre  $\xi$  è il rapporto di smorzamento di una struttura generalmente pari al 5 %. Pertanto, questo parametro è correlato al potenziale danno atteso dopo un terremoto.

L'accelerazione spettrale  $S_{AT}$  descrive l'ampiezza massima di risposta di un oscillatore lineare a un grado di libertà (SDOF) in funzione del periodo  $T$  e lo smorzamento strutturale  $\xi$  dell'edificio. L'ampiezza massima si ottiene integrando il movimento dell'oscillatore armonico [77]:

$$a_i = -\omega^2 x_i - 2\xi\omega \dot{x}_i \quad (6.4)$$

$$S_{AT}(\omega, \xi) = \max_{i=1,N} [a_i(\omega, \xi)] \quad (6.5)$$

dove  $a_i$  è l'accelerazione assoluta dell'oscillatore al tempo  $t_i$ ,  $x_i$  è lo spostamento dell'oscillatore riferito al suolo,  $\dot{x}_i$  è la velocità e  $\omega = 2\pi/T$  è la frequenza naturale di vibrazione dell'oscillatore.

Tipicamente vengono estratti dagli spettri di risposta  $S_{AT}$ , i valori relativi ai periodi 0,1 s, 0,3 s, 1 s e 3 s, che appartengono all'intervallo di interesse ingegneristico e includono la maggior parte dei periodi di background delle strutture esistenti. Inoltre, alcuni di questi periodi sono i valori selezionati dal software *Shakemap* [78], sviluppato da USGS (United States Geological Survey) e ampiamente utilizzato nella comunità sismologica, seguendo le indicazioni del Uniform Building Code [79]. Lo spettro  $S_{AT}$ , collegato alla frequenza di vibrazione naturale dell'edificio, viene utilizzato nell'ingegneria sismica per fornire una più vicina approssimazione dei movimenti degli edifici durante un terremoto.

### 6.3 Sensore Low-Cost sviluppato

L'unità accelerometrica appositamente sviluppata per applicazioni di monitoraggio sismico include accelerometri MEMS a basso costo e il data logger GAIA2, costruito nei laboratori dell'INGV. La GAIA2 è un sistema modulare costituito da due schede principali, la prima delle quali è una scheda di acquisizione a 24 bit e la seconda incorpora il sistema operativo Linux per consentire la registrazione locale dei dati e la loro trasmissione in tempo reale. Ci siamo serviti della GAIA2 per sincronizzare le acquisizioni del sensore realizzato con quelle dell'INGV che utilizzano l'antenna GPS per sincronizzare le stazioni sismiche. Infatti, è usato il segnale PPS dal ricevitore GPS per sintonizzare un VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator) locale, che garantisce una precisione di temporizzazione di circa 40  $\mu$ s.

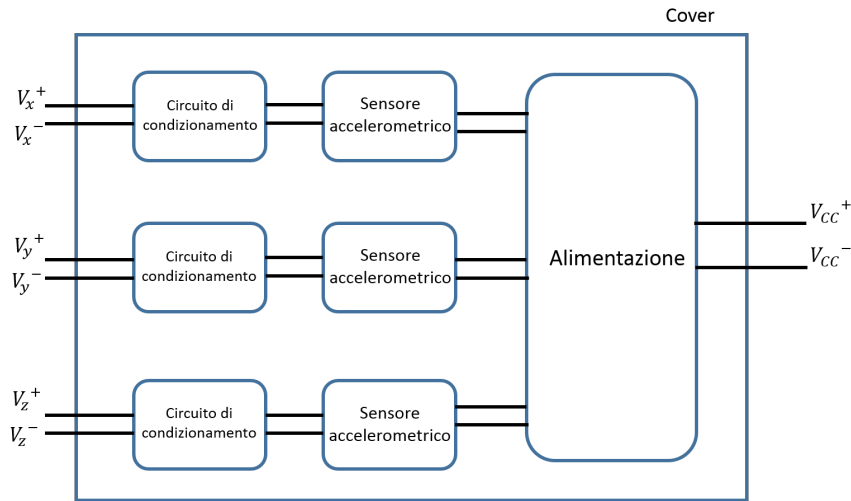


Figura 6.2: Schema a blocchi dell'unità accelerometrica sviluppata.

Le componenti principali dell'unità accelerometrica sono descritte di seguito e lo schema a blocchi è mostrato in Figura 6.2.

- **Sensori accelerometrici:** sono stati utilizzati i MEMS VS1002 (Safran Colibrys), accelerometri analogici monoassiali. Per tale motivo ne sono stati utilizzati tre e posizionati ortogonalmente tra loro per acquisire gli eventi sismici in uno spazio tridimensionale. Questi sensori sono stati appositamente progettati per le misurazioni delle vibrazioni in ambienti difficili, soprattutto possono essere utilizzati anche per le misurazioni accurate in applicazioni sismiche, grazie alle loro caratteristiche come bassa rumorosità, adeguata risposta in frequenza, insensibilità alle variazioni di temperatura e resistenza agli urti. Le specifiche tecniche del VS1002 sono: range di fondo scala  $\pm 2$  g; rumore di  $7 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ; risposta in frequenza piatta ( $\pm 5\%$ ) da DC a 700 Hz; resistenza agli urti ripetitivi.
- **Circuito di condizionamento:** i segnali analogici in uscita dai sensori sono filtrati con un filtro passivo passa-basso con frequenza di taglio di 16 kHz. A valle del filtro sono utilizzati gli inseguitori di tensione al fine di evitare la degradazione dei segnali e la comparsa del rumore. Gli inseguitori di tensione non amplificano o attenuano i segnali accelerometrici, ma agiscono come buffer e presentano un'alta impedenza di ingresso. In particolare sono stati utilizzati gli amplificatori operazionali zero-drift AD8574 (Analog Devices).

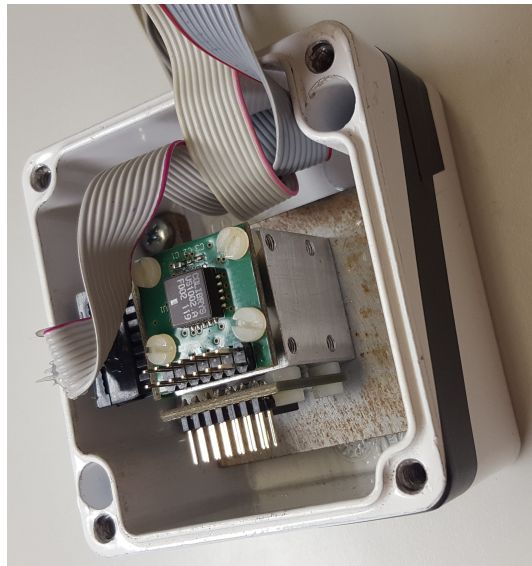


Figura 6.3: Foto delle unità MEMS montate ortogonalmente tra loro su un cubo di metallo.

- Alimentazione: al fine di compensare eventuali variazioni della tensione di alimentazione ed eliminare i disturbi che possono influire sulle misure dell'accelerometro, viene utilizzata un'unità di alimentazione appositamente sviluppata. L'unità integra il convertitore DC/DC TME 1305S (Traco Power) isolato ad alta affidabilità e il riferimento di tensione ADR4533 (Analog Device) a basso rumore e alta precisione, con l'obiettivo di ottenere un'unità di alimentazione stabile e senza rumore per gli accelerometri VS1002.
- Cover: come mostrato in Figura 6.3, un cubo di metallo è stato utilizzato come supporto dei tre PCB montati perpendicolarmente tra loro, che incorporano i sensori accelerometrici e le relative unità di condizionamento, mentre l'unità di alimentazione è stata realizzata separatamente su un altro PCB. Sia il cubo di metallo che il PCB dell'unità di alimentazione sono fissati a un supporto metallico che a sua volta è fissato alla scatola esterna dell'intera unità accelerometrica. La scatola esterna è conforme a IP67 e dotata di fori adeguati per il fissaggio a terra.

## 6.4 Test su campo e confronto tra le unità accelerometriche

L'unità accelerometrica realizzata è stata sottoposta a una fase di test, con lo scopo di confrontare le prestazioni dei sensori MEMS a basso costo con un'unità ad alte prestazioni. In particolare è stata usata come riferimento un'unità appartenente alla Rete Sismica Nazionale dell'INGV. L'unità sviluppata è stata denominata stazione TEST ed è stata collocata a pochi centimetri dalla stazione sismica dell'INGV, GUMA, nel centro Italia, precisamente, come mostrato in Figura 6.4, nel comune di Gualdo di Macerata (coordinate: latitudine  $43.0627^\circ$  N, longitudine  $13.3352^\circ$  E, altitudine 574 m Z). Ai fini delle nostre valutazioni, il sito d'installazione viene considerato l'origine del sistema ortogonale usato come riferimento (N, E, Z) per le acquisizioni accelerometriche. I test su campo sono iniziati il 20 Settembre 2016 e sono terminati il 20 Marzo 2017. La vicinanza all'area principale coinvolta dalla sequenza sismica che ha interessato l'Italia Centrale nel 2016 e il lasso temporale di installazione, hanno permesso di registrare i numerosi terremoti significativi che hanno devastato questa zona durante quel periodo.

### 6.4.1 Unità accelerometrica di riferimento

La stazione GUMA, usata come riferimento, è costituita dal data logger GAIA2, dal velocimetro a banda larga e dagli accelerometri ad alte prestazioni Episensor FBA (Force Balance Accelerometer) ES-T (Kinematics).

La stazione può essere configurata attraverso la connessione Ethernet tramite un'interfaccia web e può acquisire su più canali da 4 a 8 [80]. Ad esempio, sui canali 1-3 della GAIA2 è collegato il velocimetro, sui canali 5-7 l'accelerometro di riferimento.

L'Episensor, connesso alla GAIA2, è l'unità accelerometrica utilizzata dalla RSN, questo è un sensore ad alte prestazioni, con range dinamico di 155 dB, intervalli di scala selezionabili dall'utente che vanno da  $\pm 0.25$  a  $\pm 4$  g, utile per diverse applicazioni sismiche, tra cui reti sismiche permanenti per il monitoraggio sismico locale, regionale e globale, monitoraggio di oleodotti e gas o sismicità indotta da geotermia e sistemi di Earthquake Early Warning.

L'Episensor include tre accelerometri Force Balance montati ortogonalmente tra loro in un unico case. La tecnologia implementata consente di avere un livello di rumore molto basso, bassa non linearità ( $< 1000 \mu\text{g}/\text{g}^2$ ), bassa isteresi ( $< 0.1\%$  del fondo scala), bassa sensibilità trasversale ( $< 1\%$ ) e bassa deriva termica ( $< 500 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$ ) [81]. Rispetto ad altri sensori usati in questo campo, ha un'ampia risposta in frequenza da DC a 200 Hz, i livelli di tensione di uscita single-ended sono 2,5 V (5 Vpp) o 10 V (20 Vpp) e i livelli di tensione di uscita

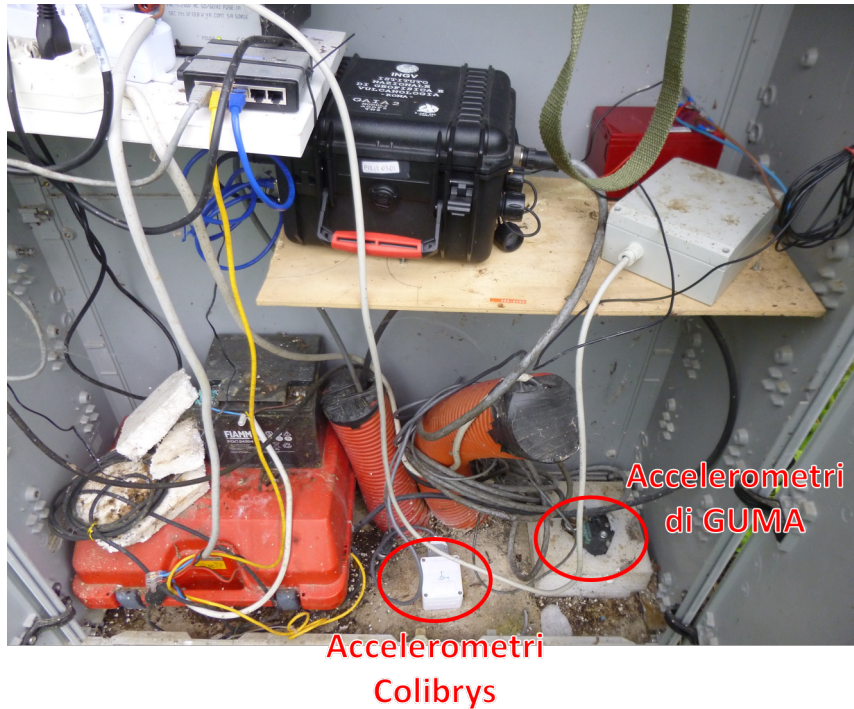


Figura 6.4: Posizionamento della stazione TEST (composta dagli accelerometri Colibrys) a pochi centimetri dall'unità accelerometrica della stazione GUMA.

differenziale sono  $\pm 5$  V (10 Vpp) o  $\pm 20$  V (40 Vpp). L'Episensor è normalmente alimentato con una fonte di alimentazione esterna DC da  $\pm 12$  V.

In questo scenario, l'Episensor utilizzato nella stazione GUMA, è stato configurato con un fondo scala di  $\pm 2$  e un livello di tensione di uscita di 40 Vpp. Di conseguenza, il data logger GAIA2 è stato configurato per ricevere un livello di tensione di ingresso di 40 Vpp, al fine di sfruttare completamente la gamma dinamica del sensore. Le forme d'onda sismiche digitali sono state continuamente registrate a 200 sps su un supporto di schede flash locali e trasmesse in tempo reale e archiviate in remoto nel centro di acquisizione della sede INGV di Ancona.

#### 6.4.2 Eventi sismici rilevati

Durante il periodo di acquisizione, durato sei mesi, l'uso di un sistema di picking automatico, basato su Akaike Information Criterion (AIC) [82], ha prodotto la disponibilità delle fasi appartenenti a 35207 eventi sismici rilevati

#### 6.4 Test su campo e confronto tra le unità accelerometriche

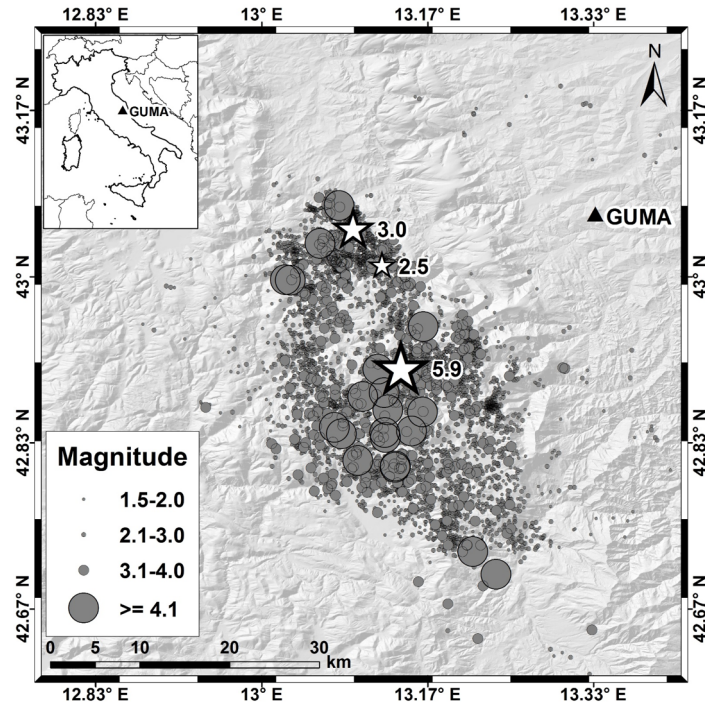


Figura 6.5: Posizione della stazione sismica GUMA e degli eventi sismici selezionati per l'analisi.

dalla stazione GUMA grazie all'uso combinato di velocimetri e accelerometri [83], [84].

Successivamente, tra tutti questi eventi, ne sono stati selezionati ed elaborati 6764. In Figura 6.5 la mappa mostra la distribuzione geografica degli eventi con le loro magnitudo, proporzionali al raggio dei cerchi grigi.

Lo screening iniziale è stato effettuato secondo i seguenti criteri: eventi con  $M_L \geq 1.5$ , con le fasi P e S ben in evidenza quando arrivano alla stazione GUMA, numero di fasi  $\geq 25$ , gap di rete  $< 180^\circ$ ,  $rms \leq 0.3$  s, errore di localizzazione orizzontale  $\leq 2$  km ed errore verticale  $\leq 5$  km. Nel dettaglio, un evento sismico è selezionato se sono state rilevate contemporaneamente più di 25 fasi P e 25 fasi S, tutte incluse in un settore angolare di  $180^\circ$  centrato nell'epicentro, fornendo una localizzazione dell'epicentro con errori orizzontali e verticali inferiori ai valori precedenti. La soglia  $rms$  si riferisce alla differenza tra l'istante di occorrenza del terremoto registrato da ciascuna stazione di misura e quello ottenuto dal modello matematico adottato dall'INGV [85]. Infine, è stato fissato il limite  $M_L$  come soglia di interesse nelle misurazioni della nostra stazione TEST.

Al termine di questa procedura di screening, tutti i 6764 eventi ottenuti sono

risultati all'interno di un'area compresa tra i 16 e i 40 km dalle stazioni GUMA e TEST.

Prima di passare all'analisi vera e propria dei segnali sismici è stata effettuata una fase di pre-processing, comprendente le seguenti operazioni:

1. Rimozione dell'offset;
2. Moltiplicazione per il corrispondente valore di sensibilità, per convertire i dati grezzi (in count) nell'unità corretta (in accelerazione di gravità);
3. Uso di un filtro passa-banda Butterworth a 4 poli con la frequenza di taglio inferiore di 0,2 Hz e la frequenza di taglio superiore di 20 Hz (intervallo di frequenza di interesse).

In questo modo sono stati ottenuti valori di accelerazione comparabili tra la stazione di riferimento GUMA e la stazione TEST, e si è potuto procedere con la valutazione delle capacità di monitoraggio della stazione TEST, col fine di fissare i limiti di applicabilità.

## 6.5 Performances raggiunte dall'unità di sensing sviluppata

Per valutare se l'unità accelerometrica sviluppata può essere integrata nella rete di monitoraggio sismico, per prima cosa sono state analizzate le ampiezze delle fasi P e S.

Per ognuno dei 6764 eventi sismici selezionati, sono state estratte dalle forme d'onda della stazione GUMA e TEST le seguenti finestre: rumore pre-evento (nw), P (pw) e S (sw), rispettivamente di 6,0 s, 0,5 s e 1,0 s. In particolare, la durata delle finestre P e S sono state scelte in modo da includere la maggior parte dei contributi energetici delle onde e inoltre la finestra P è stata scelta in modo da evitare la sua sovrapposizione con la finestra S. In ciascuna finestra, le ampiezze sono state calcolate utilizzando il quadrato medio della radice di accelerazione secondo la formula:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (6.6)$$

dove  $x$  è la componente di accelerazione lungo ciascuno dei tre assi di riferimento e  $n$  il numero di campioni nella finestra selezionata. I rapporti segnale-rumore (S/N) si ottengono dividendo i valori  $rms$ , sia della finestra P che S, per il valore  $rms$  della finestra del rumore pre-evento. In particolare, per la fase P viene presa in considerazione solo la componente Z dell'accelerazione, perché risulta essere sempre la più significativa. Mentre per la fase S, vengono



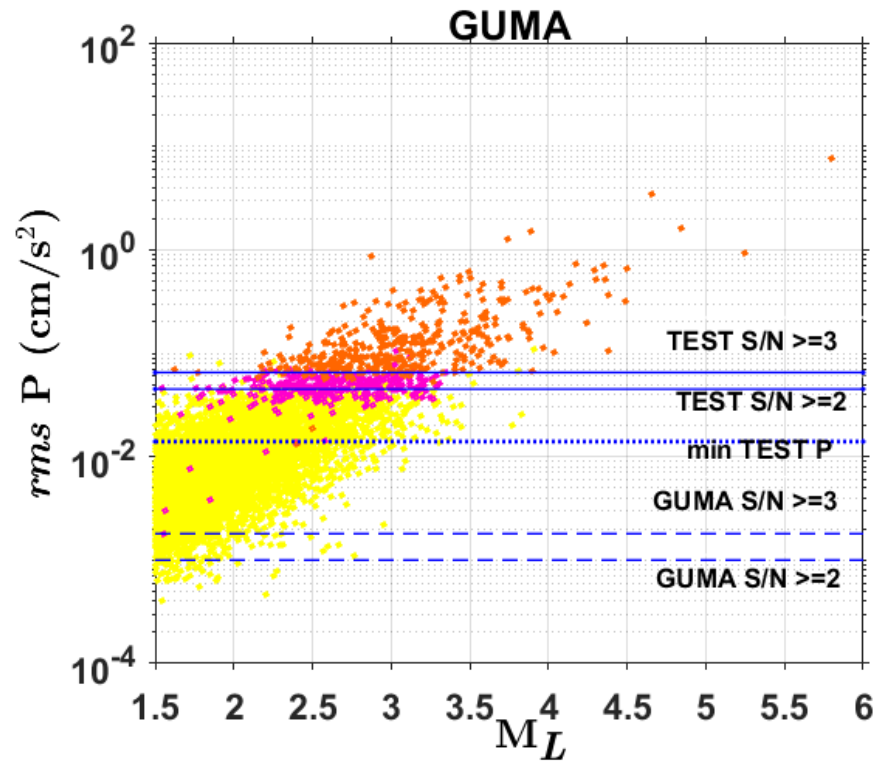


Figura 6.6: Distribuzione dei valori *rms* delle fasi P in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione GUMA.

usate solo le componenti orizzontali, risultando le più rilevanti. Il rapporto S/N viene utilizzato per identificare la soglia di ampiezza del segnale oltre la quale è possibile dichiarare una fase interpretabile, tale che i suoi dati possono essere utilizzati per la localizzazione del terremoto. In questo lavoro, abbiamo assunto il valore  $S/N = 3$  come soglia oltre la quale una fase è dichiarata interpretabile. Questo valore è stato derivato da innumerevoli esperienze sul campo condotte dalla comunità internazionale dei geosismologi ed è stato anche confermato dalla nostra sperimentazione.

Le Figure 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 mostrano in scala logaritmica i valori *rms* delle fasi P e S per i 6764 eventi sismici selezionati, in funzione della grandezza  $M_L$ .

Nelle Figure 6.7 e 6.9 le linee continue indicano specifici valori del rapporto S/N calcolati sulle forme d'onda della stazione TEST. In queste figure, tutti gli eventi sono mostrati come punti gialli, mentre gli eventi con  $S/N \geq 2$  come punti rosa e gli eventi con  $S/N \geq 3$  come punti arancioni. I precedenti valori S/N, riferiti alla stazione TEST, sono riportati anche sui sistemi di riferimento

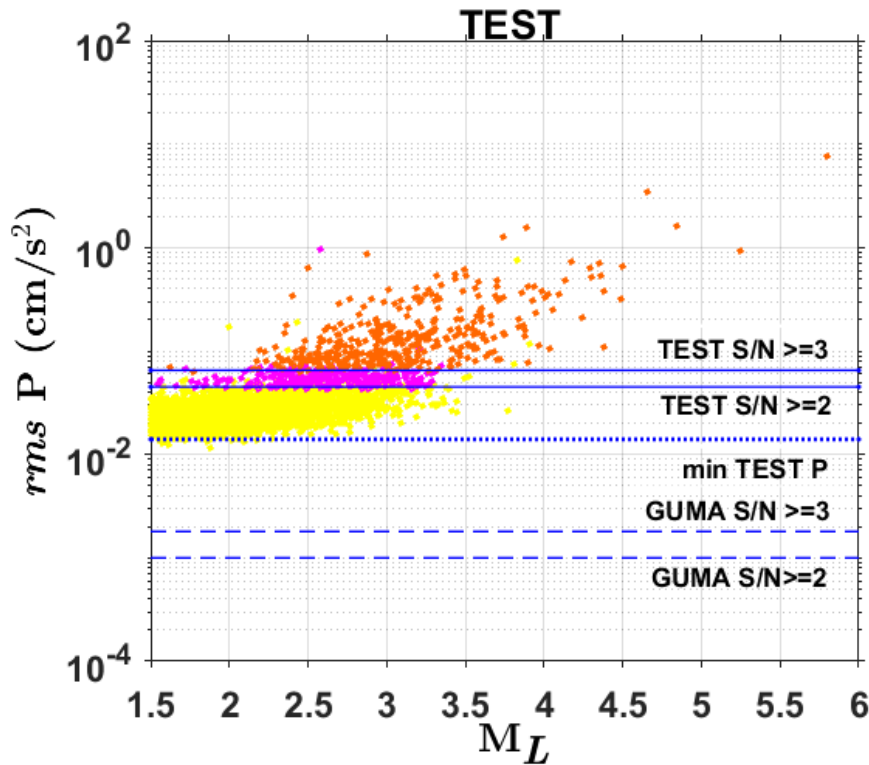


Figura 6.7: Distribuzione dei valori  $rms$  delle fasi P in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione TEST.

GUMA nelle Figure 6.6 e 6.8. Questi grafici mostrano gli stessi eventi con gli stessi colori dei grafici di Figura 6.7 e 6.9, ma ovviamente con ordinate corrispondenti ai valori  $rms$  dei segnali acquisiti da GUMA. Mentre le linee tratteggiate nelle Figure 6.6 e 6.8 indicano i valori del rapporto S/N pari a 2 e 3 calcolati sulle forme d'onda di GUMA. Questi valori per la stazione GUMA sono riportati anche come confronto sulle Figure 6.7 e 6.9 riferite ai risultati della stazione TEST.

Per le fasi P della stazione TEST, il valore minimo registrato non è inferiore a  $0,014 \text{ cm/s}^2$  (linea denominata min TEST P), mentre per le fasi S la soglia è  $0,020 \text{ cm/s}^2$  (linea denominata min TEST S), tali valori stanno ad indicare il rumore strumentale. Gli eventi con  $S/N \geq 2$  sono al di sopra della soglia di  $0,045 \text{ cm/s}^2$  (denominata come TEST  $S/N \geq 2$ ), mentre quelli con  $S/N \geq 3$  sono al di sopra della soglia di  $0,065 \text{ cm/s}^2$  (denominata come TEST  $S/N \geq 3$ ). I valori di queste soglie coincidono sia per le fasi P che S. Le soglie del segnale corrispondenti a  $S/N \geq 2$  e  $S/N \geq 3$  per la stazione GUMA sono comprese tra

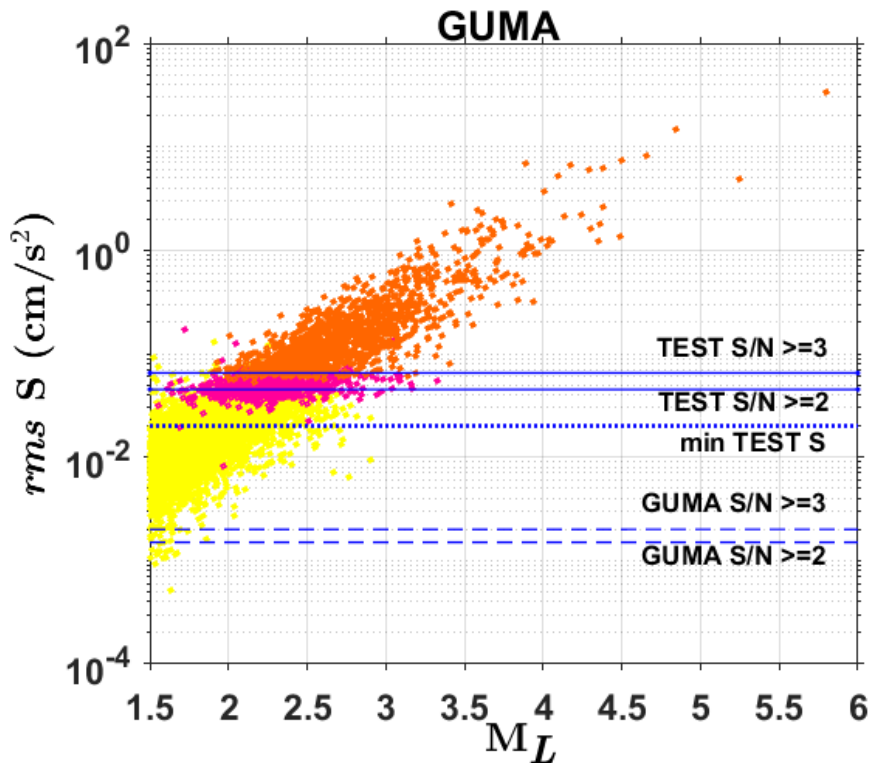


Figura 6.8: Distribuzione dei valori *rms* delle fasi S in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione GUMA.

0,001 e 0,002 cm/s<sup>2</sup>, per entrambe le fasi P e S, denotando che quasi tutte le fasi degli eventi selezionati possono essere interpretate sulle forme d'onda acquisite dall'accelerometro di riferimento. Quindi, tutti gli eventi al di sotto della soglia di 0,014 cm/s<sup>2</sup> registrati dalla stazione GUMA non possono essere riconosciuti dalla stazione TEST a causa del rumore strumentale. Da queste considerazioni è possibile capire perchè è stato scelto il rapporto S/N = 3 per definire la soglia al di sopra della quale le fasi sismiche sono leggibili sulle forme d'onda TEST.

Come mostrato nelle Figure 6.7 e 6.9 gli eventi appartenenti all'intervallo S/N < 3 sulla stazione TEST sono definiti da livelli di ampiezza nel range 0.014 ÷ 0.065 cm/s<sup>2</sup>. Mentre nelle Figure 6.6 e 6.8 una parte significativa degli stessi eventi (in punti rosa e gialli) registrati da GUMA mostrano stime di ampiezza al di sotto dei livelli corrispondenti della stazione TEST, ciò rappresenta che i valori di ampiezza registrati dalla stazione TEST sono contaminati dal rumore intrinseco del sensore. Ciò non accade quando si analizzano eventi nella

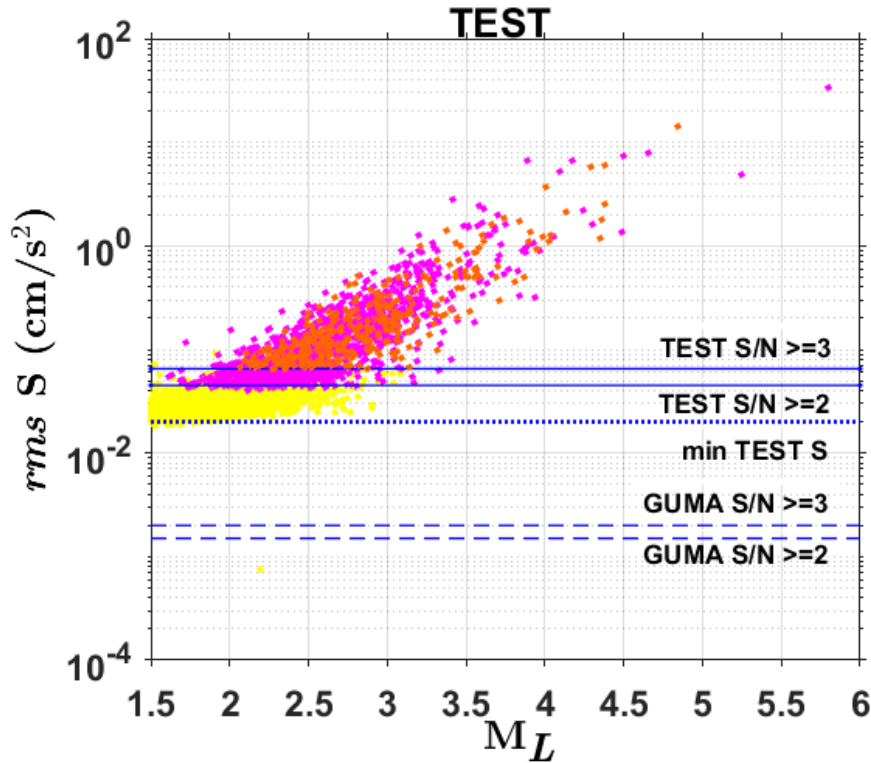


Figura 6.9: Distribuzione dei valori  $rms$  delle fasi S in funzione della magnitudo per i 6764 eventi sismici registrati dalla stazione TEST.

regione  $S/N \geq 3$ . Infatti, esclusi alcuni valori anomali, tutti questi eventi rimangono al di sopra della soglia di  $0.065 \text{ cm/s}^2$  su entrambe le stazioni. Questa corrispondenza è riconoscibile sia per le fasi P che per quelle S.

In relazione agli eventi sismici selezionati, tutti omogeneamente distribuiti tra 16 e 40 km, la Tabella 6.1 mostra, in funzione della magnitudo, le percentuali di eventi per le quali le fasi P e S delle forme d'onda TEST sono state rilevate correttamente dall'unità accelerometrica realizzata. Al di sotto della magnitudo  $M_L=2.0$ , indipendentemente dalle distanze, i risultati mostrano che gli accelerometri TEST non consentono l'identificazione delle fasi.

Nell'intervallo  $2.0 \leq M_L < 2.5$ , non vengono rilevate le fasi P, mentre sono interpretabili il 16% delle fasi S. Nell'intervallo  $2.5 \leq M_L < 3.0$  emergono dal rumore circa il 19% delle fasi P e il 77% delle fasi S. Invece, per quanto riguarda le fasi P, più della metà degli eventi (57%) possono essere interpretati per  $3.0 \leq M_L < 3.5$  e sono praticamente tutti leggibili per  $M_L \geq 3.5$ . Al contrario per le fasi S sono già quasi tutte interpretabili per  $M_L \geq 3.0$ .

### 6.5 Performances raggiunte dall'unità di sensing sviluppata

Tabella 6.1: Percentuale di eventi per la quale è possibile rilevare le fasi P e S delle forme d'onda registrate dalla stazione TEST. Dei 6764 eventi sismici selezionati, appartenenti al range 16 km ÷ 40 km dalla stazione TEST, sono state classificate in funzione della magnitudo.

$M_L$	fase P	fase S	n° di eventi
$M_L \geq 4.0$	100%	100%	20
$3.5 \leq M_L < 4.0$	97%	100%	63
$3.0 \leq M_L < 3.5$	57%	96%	238
$2.5 \leq M_L < 3.0$	19%	77%	803
$2.0 \leq M_L < 2.5$	2%	16%	1979
$1.5 \leq M_L < 2.0$	0%	0%	3661

Inoltre, vista la distribuzione omogenea delle distanze degli eventi dalla stazione TEST per ogni classe di intervalli  $M_L$ , si evince come i risultati ottenuti risultano chiaramente non influenzati dalla distanza dall'epicentro, nell'intervallo sotto osservazione.

Per distanze medio-brevi (16-40 km) l'analisi precedente mostra chiaramente che la stazione TEST può essere utilizzata per registrare la sismicità già da magnitudo  $M_L \geq 2.5$ . Questo permette di integrare la stazione TEST in una rete per la localizzazione di micro terremoti e di tutti i piccoli terremoti locali [68].

Un altro importante studio riguarda il calcolo dei parametri di Strong Motion. La capacità del sistema proposto di riprodurre questi parametri risulta essere di primaria importanza sia nelle applicazioni di protezione civile che ingegneristiche, al fine di valutare gli effetti e i danni dei terremoti.

I parametri sono stati calcolati per ciascuna delle tre componenti di accelerazione (E, N e Z) sia per la stazione GUMA che TEST.

Per un'analisi più accurata, per ciascun parametro sono state calcolate le differenze relative percentuali come segue:

$$\Delta P_{rel}(\%) = [(P_{GUMA} - P_{TEST})/P_{GUMA}] \cdot 100 \quad (6.7)$$

dove  $P_{GUMA}$  e  $P_{TEST}$  rappresentano il generico parametro di Strong Motion P sia per la stazione GUMA che TEST. Le differenze relative percentuali sono state calcolate per tutti i 6764 eventi sismici.

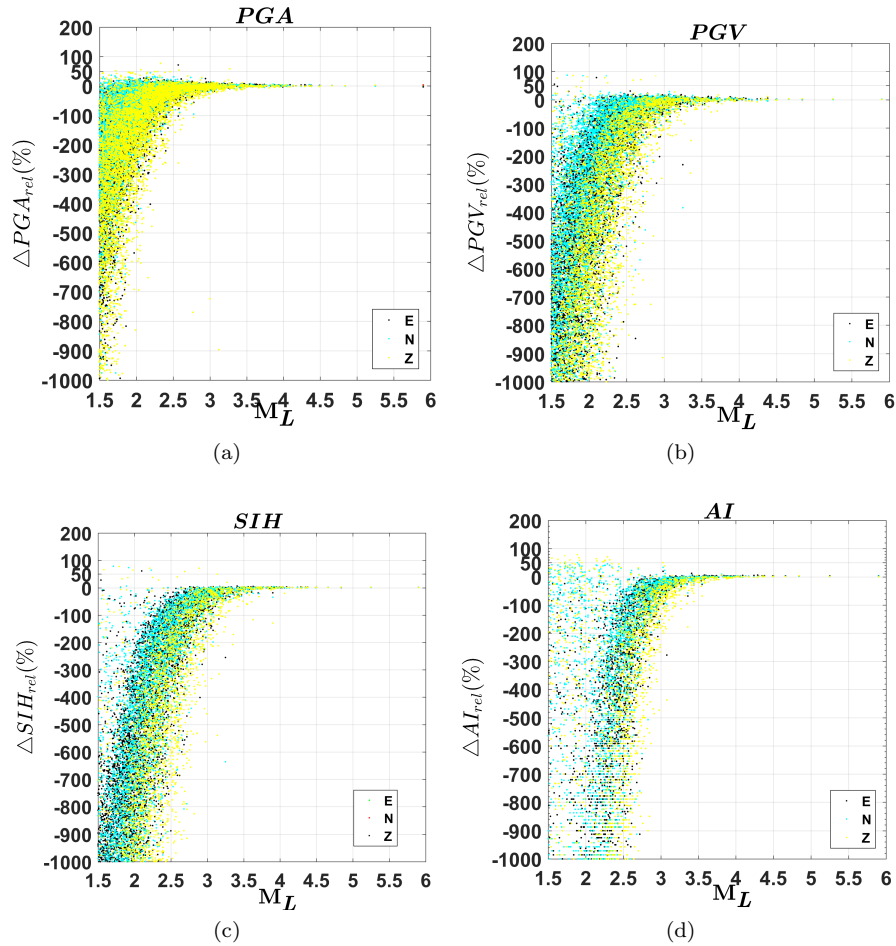


Figura 6.10: Distribuzione delle differenze relative percentuali dei parametri PGA, PGV, SIH e AI in funzione della magnitudo.

Le Figure 6.10 e 6.11 mostrano le distribuzioni di  $\Delta P_{rel}(\%)$  per i parametri di Strong Motion descritti nella Sezione 6.2. In questi grafici, le differenze relative percentuali sono rappresentate per ciascuna delle tre componenti E, N e Z in funzione della magnitudo. Per ogni parametro, all'aumentare della magnitudo, si può osservare una distribuzione inclusa nel range  $\pm 5\%$  che converge allo 0% per magnitudo  $> 3.5$ , ovvero dove i parametri di Strong Motion sono utili e impiegati nell'analisi di ingegneria sismica.

Oltre ai parametri di Strong Motion, con l'obiettivo di valutare l'affidabilità della stazione TEST nella riproduzione di forme d'onda accelerometriche, partendo dai dati di accelerazione, dopo aver effettuato il pre-processing, per prima cosa è stata eseguita un'analisi qualitativa sul confronto del trend del-

## 6.5 Performances raggiunte dall'unità di sensing sviluppata

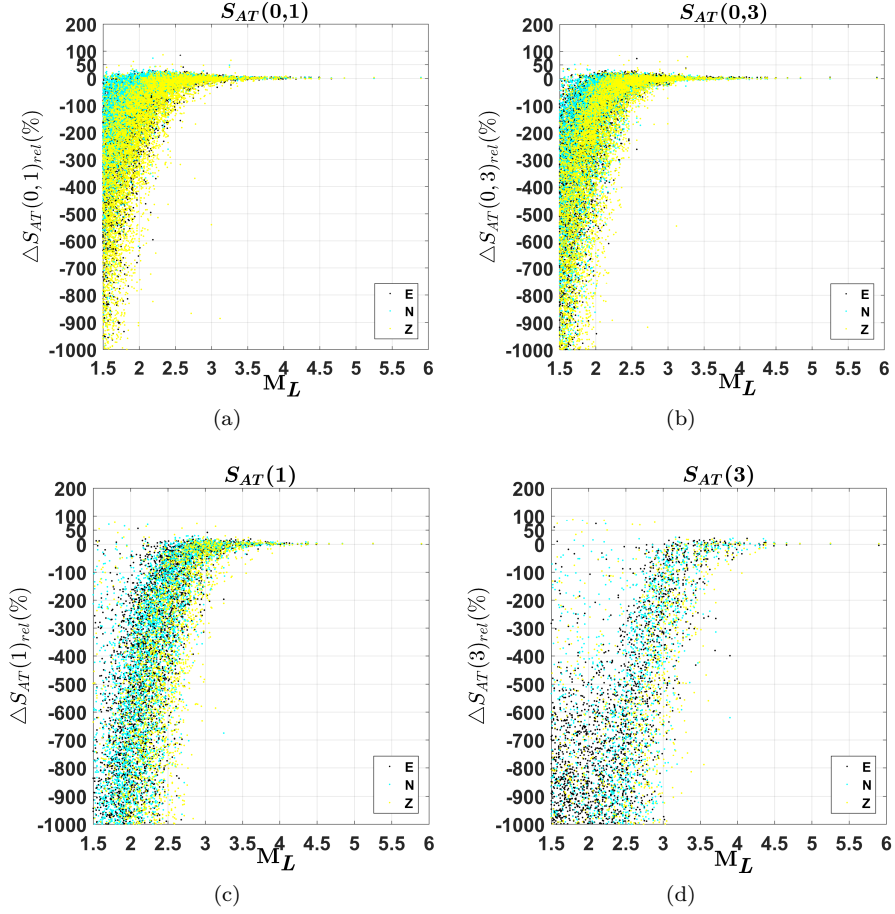


Figura 6.11: Distribuzione delle differenze relative percentuali dei parametri  $S_{AT}(0,1)$ ,  $S_{AT}(0,3)$ ,  $S_{AT}(1)$  e  $S_{AT}(3)$  in funzione della magnitudo.

le accelerazioni acquisite dalle due stazioni. In seguito, è stata calcolata la cross-correlazione tra le corrispondenti componenti di accelerazione dei due diversi sistemi di acquisizione e, infine sono state confrontate le Densità Spettrali di Potenza (PSD) tra le componenti accelerometriche, secondo l'algoritmo di Konno-Ohmachi [86].

In particolare, in questo lavoro di tesi sono stati riportati gli studi di tre eventi rappresentativi dei 6764, scelti con magnitudo significative in base alle considerazioni fatte fino adesso. La Tabella 6.2 riporta i tre terremoti con i relativi dettagli, come la magnitudo locale ( $M_L$ ), la data e la distanza tra l'epicentro e le stazioni GUMA e TEST ( $Dist_{ep-st}$ ).

Le Figure 6.12 e 6.13 mostrano le accelerazioni lungo i tre assi delle due

Tabella 6.2: Lista dei 3 eventi sismici selezionati come esempi rappresentativi dei 6764.

$M_L$	Data	$Dist_{ep-st}$ (km)
2.5	11/12/2016	18
3.0	06/12/2016	20
5.9	26/10/2016	21.6

stazioni GUMA e TEST, durante gli eventi sismici, rispettivamente di magnitudo 2.5 e 3. La Figura 6.12 rappresenta il limite inferiore di registrazione per l'unità proposta (come si può vedere in Tabella 6.1). Le forme d'onda GUMA mostrano chiaramente l'arrivo della fase P lungo la componente Z e della fase S lungo le componenti N ed E. Ma a differenza della GUMA, la stazione TEST proposta non è in grado di rilevare chiaramente l'arrivo della fase P perché ha un'ampiezza inferiore rispetto al rumore intrinseco dello strumento ed è debolmente percepibile dall'occhio umano come piccolo aumento dell'ampiezza lungo la componente Z. Al contrario, la fase S è ben registrata anche dalla stazione TEST sulle componenti orizzontali.

In Figura 6.13 è riportato l'evento  $M_L = 3.0$  dove è confermata la buona registrazione delle fasi P e S su entrambe le stazioni.

Con lo scopo di dimostrare l'affidabilità dell'unità realizzata nel registrare correttamente anche eventi sismici con magnitudo elevata, in Figura 6.14 vengono visualizzate le forme d'onda delle accelerazioni acquisite durante il terremoto  $M_L = 5.9$  che ha colpito l'Italia Centrale il 26 ottobre 2016. La sovrapposizione delle serie temporali delle stazioni GUMA (arancione) e TEST (verde) evidenzia l'elevata somiglianza tra le forme d'onda. Sebbene le ampiezze di accelerazione superano i  $100 \text{ cm/s}^2$ , le onde sismiche registrate sulle tre componenti assiali del sistema di riferimento GUMA sono perfettamente replicate dalla stazione TEST proposta.

Valutazioni quantitative sulla somiglianza delle forme d'onda sono state possibili attraverso il calcolo delle cross-correlazioni. Queste sono state effettuate tra le rispettive componenti accelerometriche delle stazioni GUMA e TEST. Come mostrato in Figura 6.15 si hanno valori elevati di somiglianza per gli eventi  $M_L = 5.9$  (circa 1 per ciascuna delle tre componenti) e  $M_L = 3.0$  (da 0,77 a 0,91, per le tre componenti), mentre per l'evento  $M_L = 2.5$  sono stati ottenuti valori più bassi (da 0,30 a 0,52, per le tre componenti).

Infine è stato eseguito il confronto tra gli spettri, con l'obiettivo di dimo-



## 6.5 Performances raggiunte dall'unità di sensing sviluppata

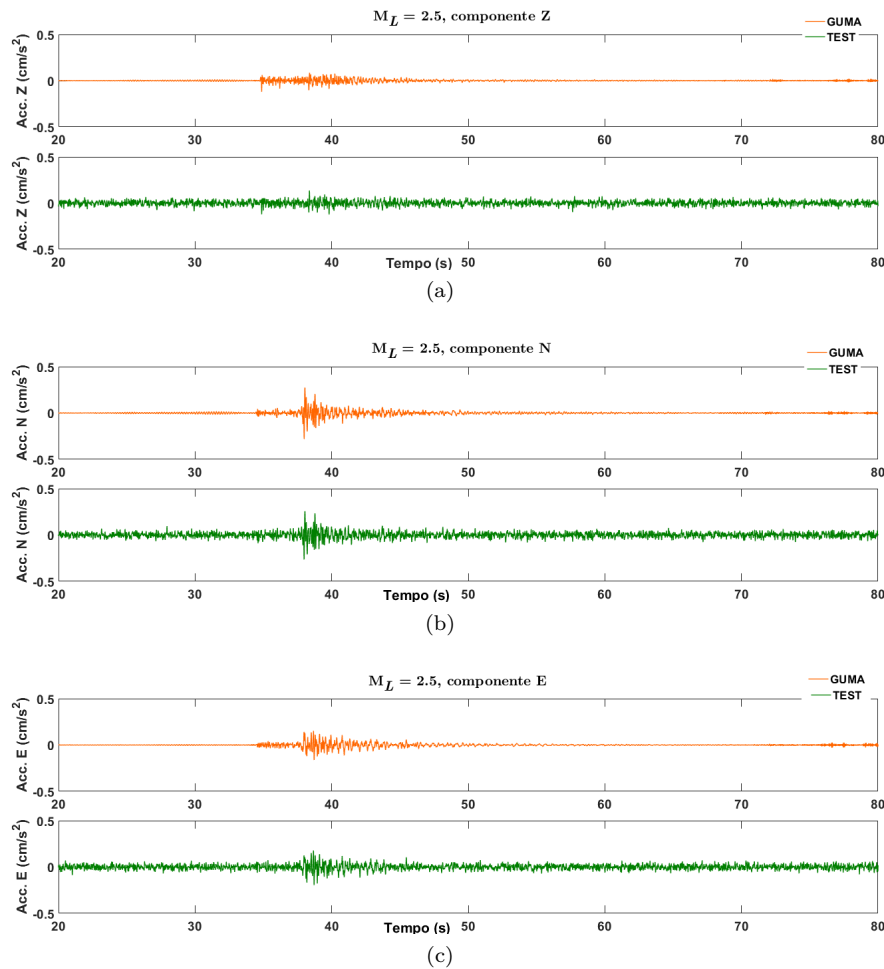


Figura 6.12: Forme d'onda accelerometriche dell'evento di magnitudo 2.5 registrate dalla stazione GUMA (arancione) e dalla stazione TEST (verde): (a) componente accelerometrica Z; (b) componente accelerometrica N; (c) componente accelerometrica E.

strare l'affidabilità della stazione TEST nel registrare eventi sismici anche nel dominio delle frequenze. Per i tre eventi precedentemente selezionati, gli spettri di Fourier sono stati stimati per ciascuna componente delle stazioni GUMA e TEST e sovrapposti l'uno all'altro (Figura 6.16). In Figura 6.16(c) si può notare la perfetta sovrapposizione delle PSD delle tre componenti accelerometriche tra le due stazioni per l'evento  $M_L = 5.9$ . Pertanto, l'analisi spettrale conferma che terremoti di magnitudo elevata vengono replicati con precisione dalla stazione TEST, rivelando così una buona risposta in frequenza dell'unità sviluppata. Invece, in Figura 6.16(b), l'analisi spettrale dell'evento  $M_L =$

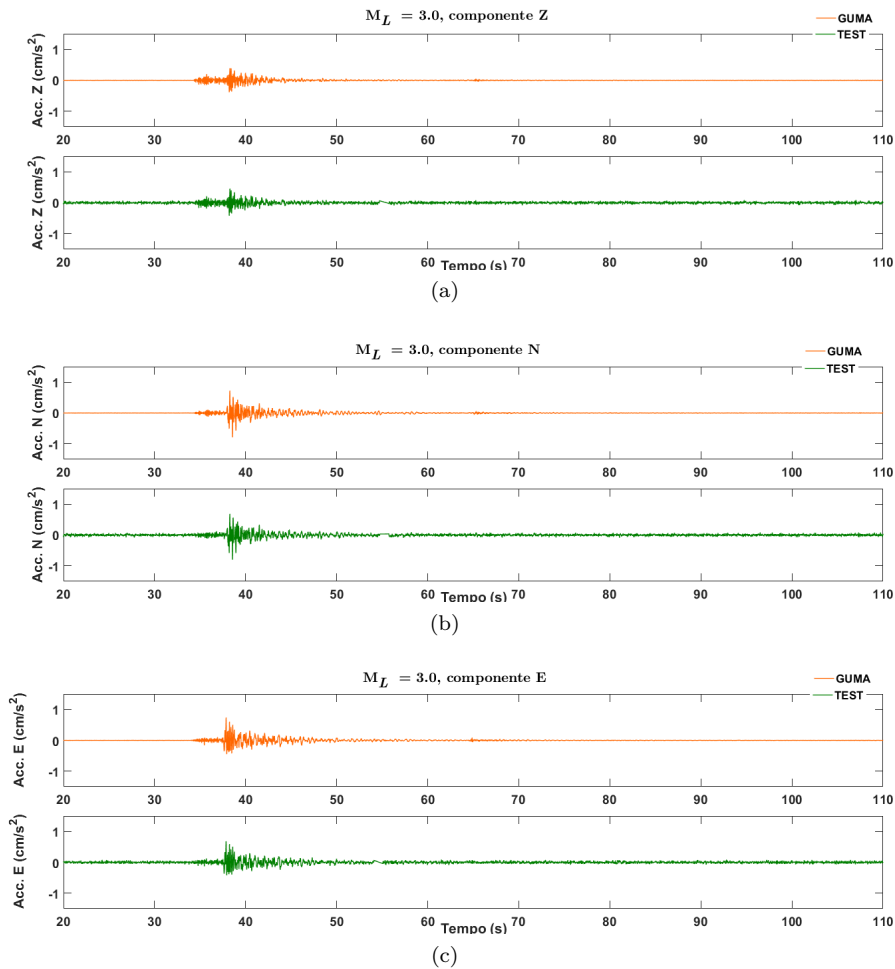


Figura 6.13: Forme d'onda accelerometriche dell'evento di magnitudo 3.0 registrate dalla stazione GUMA (arancione) e dalla stazione TEST (verde): (a) componente accelerometrica Z; (b) componente accelerometrica N; (c) componente accelerometrica E.

3.0 rivela il diverso rumore intrinseco delle due stazioni. Il maggior contenuto energetico dei segnali sismici è compreso tra 1 Hz e 10 Hz, e proprio in questo range le PSD delle accelerazioni di GUMA e TEST si sovrappongono, mentre al di fuori di questo intervallo differiscono. Ad esempio, al di sotto di 1 Hz le accelerazioni hanno uno spettro piatto, e come previsto risulta essere maggiore dello spettro delle accelerazioni della stazione GUMA. Questo è giustificato dal rumore strumentale maggiore che si ha nell'unità realizzata, come già avevamo visto nello studio delle fasi P e S. Questa caratteristica è ancora più evidente quando si confrontano le PSD dell'evento  $M_L = 2.5$  in Figura 6.16(a). In questo

## 6.5 Performances raggiunte dall'unità di sensing sviluppata

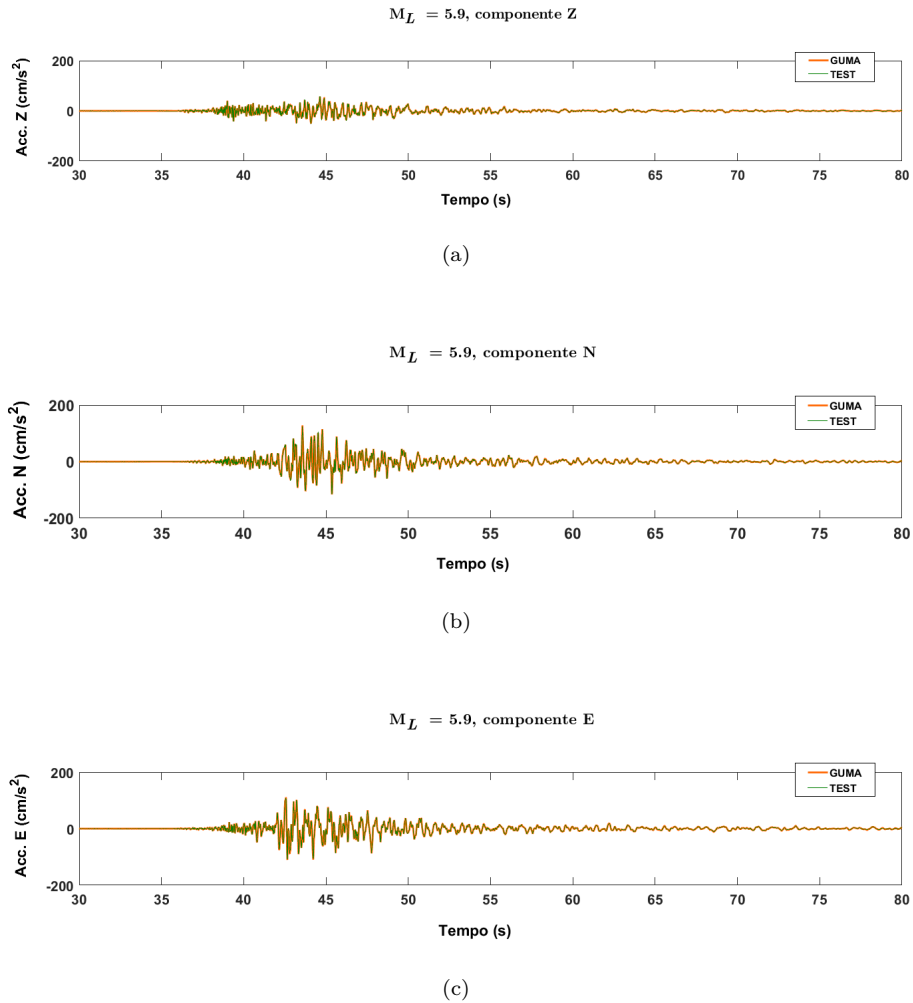


Figura 6.14: Forme d'onda accelerometriche dell'evento di magnitudo 5.9 registrate dalla stazione GUMA (arancione) e dalla stazione TEST (verde): (a) componente accelerometrica Z; (b) componente accelerometrica N; (c) componente accelerometrica E.

caso, gli spettri delle accelerazioni della stazione TEST sono quasi interamente piatti, poichè il segnale sismico non emerge dal rumore strumentale.

Si può riassumere che l'analisi comparativa delle acquisizioni registrate della stazione GUMA di riferimento e dalla stazione TEST, comprendente l'unità accelerometrica sviluppata, ha previsto la stima dei parametri di Strong Motion e la valutazione della somiglianza delle forme d'onda registrate, sia nel dominio del tempo che nel dominio della frequenza, attraverso lo studio delle correlazioni

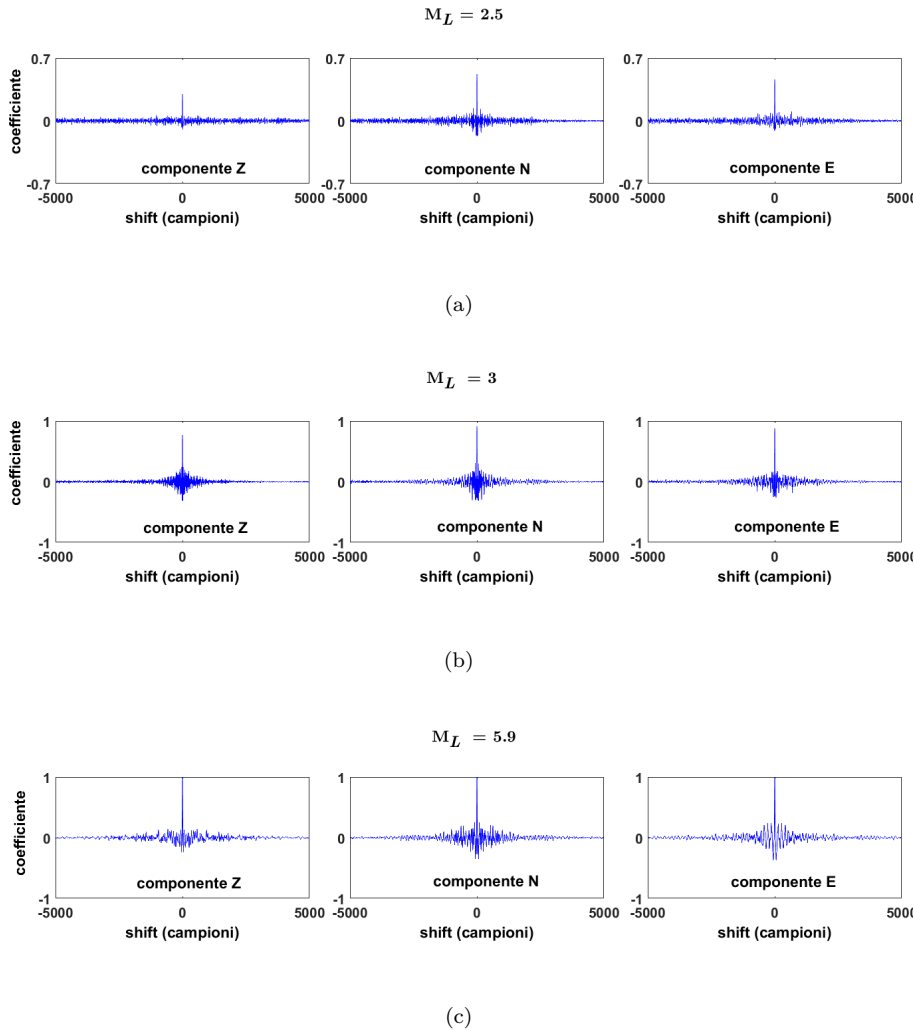


Figura 6.15: Le cross-correlazioni tra le corrispondenti componenti (Z, N, E) di GUMA e TEST durante i tre terremoti: (a)  $M_L = 2.5$ ; (b)  $M_L = 3.0$ ; (c)  $M_L = 5.9$ .

delle forme d'onda e l'analisi spettrale.

I risultati ottenuti dal confronto hanno dimostrato che l'unità di rilevamento proposta, sebbene a basso costo, è adatta per la valutazione dei terremoti di diverse magnitudo. Pertanto, può sostituire efficacemente o essere aggiunta nella RSN per applicazioni con alta densità di nodi nei sistemi di Earthquake Early Warning e in molte altre applicazioni di ingegneria e protezione civile.

6.5 Performances raggiunte dall'unità di sensing sviluppata

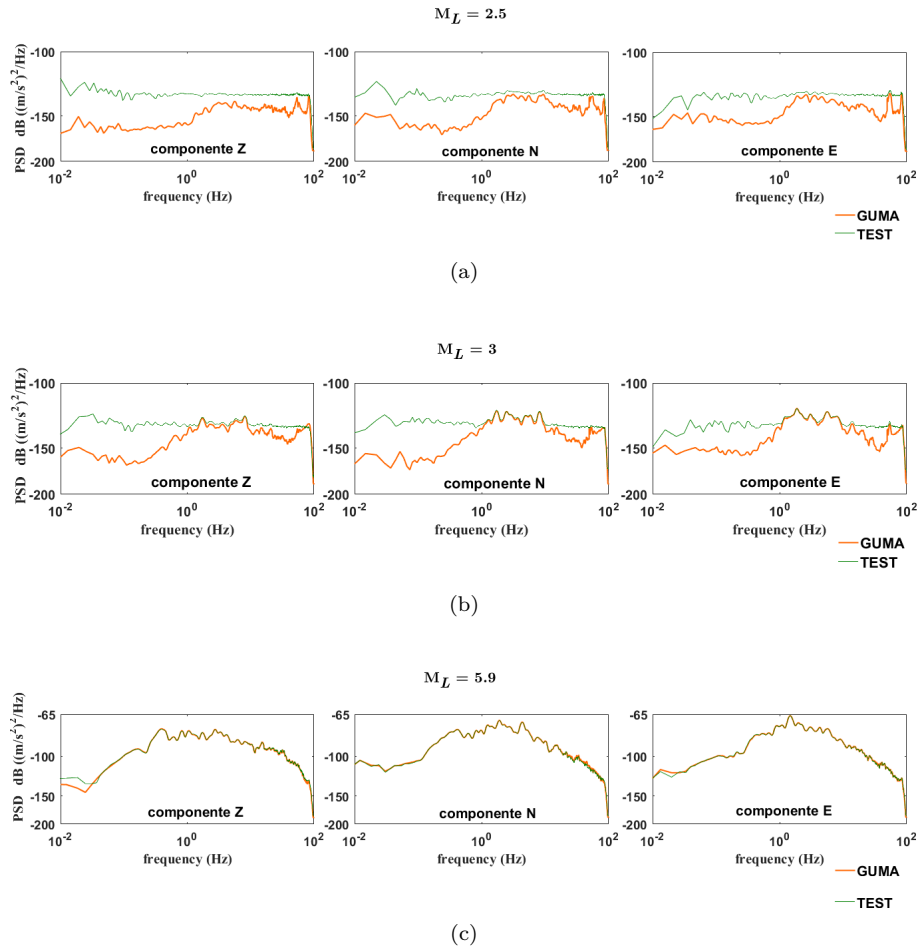


Figura 6.16: Sovrapposizione delle Densità Spettrali di Potenza (PSD) tra le corrispondenti componenti (Z, N, E) di GUMA (arancione) e di TEST (verde) durante i tre eventi: (a)  $M_L = 2.5$ ; (b)  $M_L = 3.0$ ; (c)  $M_L = 5.9$ .



# Capitolo 7

## Conclusioni

L'obiettivo, alla base dello studio relazionato in questo lavoro di tesi, è stato lo sviluppo e test di soluzioni di Wireless Sensor Network per applicazioni di Environmental Monitoring.

La progettazione del sistema IoT, implementato nel nuovo impianto di illuminazione della Cappella degli Scrovegni, dimostra la fattibilità e i vantaggi dell'utilizzo di un'architettura basata su protocolli di nuova concezione, che non richiedono l'uso di gateway complessi e costosi. Grazie allo sviluppo di un'unità di sensing, che è stata adeguatamente calibrata attraverso misure in laboratorio, la soluzione IoT realizza un sistema di monitoraggio diffuso e continuo dei livelli di illuminazione, volto a preservare gli affreschi e capace di memorizzare i dati acquisiti su cui eseguire un'analisi a lungo termine (ad esempio attraverso la creazione di modelli predittivi), per il perfezionamento di un sistema di illuminazione autoregolante. Inoltre, il sistema di gestione sviluppato consente, anche da remoto, il controllo e la configurazione dell'impianto di illuminazione. L'interfaccia multifunzione creata può essere utilizzata sia in fase di installazione dai tecnici, che in fase di monitoraggio dagli utenti.

Con lo scopo di implementare azioni di controllo, che consentono al sistema di illuminazione artificiale di adattarsi automaticamente alle diverse condizioni di illuminazione naturale, è stata necessaria una approfondita analisi delle risposte illuminotecniche dei corpi illuminanti. Partendo da una fase di training è stato illustrato un metodo efficiente e innovativo per caratterizzare i corpi illuminanti in termini di illuminamento e temperatura colore. Sulla base di tecniche di regressione e del metodo dei minimi quadrati è stato sviluppato un modello matematico che descrive l'andamento della temperatura colore e dell'illuminamento in funzione dell'alimentazione. Oltre ad essere un approccio innovativo, l'interfaccia sviluppata consente, a chi gestisce il sistema di illuminazione, di conoscere i valori di alimentazione da dare a ciascuna sorgente luminosa per ottenere una determinata resa cromatica. Il modello matematico è stato validato attraverso una successiva fase di test tramite il confronto con le misurazioni ottenute da uno spettrofotometro. Dall'analisi dei risultati delle prove effettuate emerge che il metodo proposto per la realizzazione del modello

## *Capitolo 7 Conclusioni*

matematico, che caratterizza le sorgenti luminose, garantisce bassi tassi di errore tra i valori calcolati dal modello e quelli verificati attraverso la misurazione manuale con uno spettrofotometro.

Un'ulteriore applicazione orientata all'IoT delle Wireless Sensor Network per scenari di Environmental Monitoring, è la realizzazione di un sistema low-cost e a basso consumo energetico per il monitoraggio sismico. L'unità accelerometrica progettata è stata testata sul campo nel periodo 2016-2017 nell'Italia Centrale. Le prestazioni sono state valutate in termini di capacità di rilevamento dei terremoti, accuratezza nella registrazione delle forme d'onda e corretta quantificazione dei parametri ingegneristici di interesse. Dal confronto effettuato con la stazione sismica di riferimento della rete nazionale dell'INGV è emerso che il dispositivo a basso costo sviluppato rispetta i criteri necessari per le applicazioni di monitoraggio sismico con performance paragonabili alla stazione di riferimento dell'INGV. I punti di forza del sistema proposto risiedono nella possibilità di integrare questi dispositivi nella rete sismica nazionale, col fine di creare una rete di monitoraggio fitta e diffusa, in grado di contribuire a generare mappe di scuotimento, a monitorare l'accelerazione alla base di edifici strategici, quali scuole o ospedali e a localizzare terremoti locali. Inoltre, questa un'unità può essere integrata nei sistemi EEW basati su architetture di Internet of Things come un oggetto intelligente diffuso nell'area di interesse.



# Publicazioni

## Riviste Internazionali

S. Raggiunto, A. Belli, L. Palma, P. Ceregioli, M. Gattari, and P. Pierleoni, “An Efficient Method for LED Light Sources Characterization”, *Electronics*, vol. 8, no. 10, pp. 1089, 2019, DOI: 10.3390/electronics8101089.

P. Pierleoni, A. Belli, R. Concetti, L. Palma, F. Pinti, S. Raggiunto, L. Sabbatini, S. Valenti, and A. Moneriù, “Biological Age Estimation Using an eHealth System based on Wearable Sensors”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, DOI: 10.1007/s12652-019-01593-8.

P. Pierleoni, A. Belli, A. Gentili, L. Incipini, L. Palma, S. Raggiunto, A. Sbröllini, L. Burattini, “Real-Time Smart Monitoring System for Atrial Fibrillation Pathology”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, DOI: 10.1007/s12652-019-01602-w.

P. Pierleoni, S. Marzorati, C. Ladina, S. Raggiunto, A. Belli, L. Palma, M. Cattaneo, and S. Valenti, “Performance Evaluation of a Low-Cost Sensing Unit for Seismic Applications: Field Testing During Seismic Events of 2016-2017 in Central Italy”, *IEEE Sensors Journal*, no. 16, pp. 6644–6659, 2018, DOI: 10.1109/JSEN.2018.2850065.

P. Pierleoni, A. Belli, L. Palma, S. Valenti, S. Raggiunto, L. Incipini, and, P. Ceregioli, “The Scrovegni Chapel Moves into the Future: an Innovative Internet of Things Solution Brings New Light to Giotto’s Masterpiece”, *IEEE Sensors Journal*, no. 18, pp. 7681–7696, 2018, DOI: 10.1109/JSEN.2018.2858543.

## Conferenze Internazionali

L. Incipini, L. Palma, A. Belli, S. Raggiunto, and P. Pierleoni, “Performance Evaluation of a Full IPv6-based Internet of Things Wireless Sensor Network”, in *2019 IEEE 23rd International Symposium on Consumer Technologies (ISCT)*, *IEEE*, pp. 333-338, June 2019.

## Books

P. Pierleoni, A. Belli, A. Gentili, L. Incipini, L. Palma, S. Valenti, and S. Raggiunto, “A eHealth System for Atrial Fibrillation Monitoring”, in *Italian Forum of Ambient Assisted Living, Springer*, pp. 229-241, 2018, DOI: 10.1007/978-3-030-05921-7\_19.

P. Pierleoni, A. Belli, R. Concetti, L. Palma, F. Pinti, S. Raggiunto, S. Valenti, and A. Monteriù, “A Non-invasive Method for Biological Age Estimation Using Frailty Phenotype Assessment”, in *Italian Forum of Ambient Assisted Living, Springer*, pp. 81–94, 2018, DOI: 10.1007/978-3-030-05921-7\_7.

## Conferenze Nazionali

Paola Pierleoni, Alberto Belli, Lorenzo Palma, Michele Paoletti, Sara Raggiunto, Federica Pinti, “Postural stability evaluation using wearable wireless sensor”, in *10th Forum Italiano dell’Ambient Assisted Living (FORITAAL 2019)*, June 2019.

Paola Pierleoni, Alberto Belli, Lorenzo Palma, Lorenzo Incipini, Sara Raggiunto, Roberto Concetti, Luisiana Sabbatini, “A Cross-Protocol Proxy for Sensor Networks Based on CoAP”, in *10th Forum Italiano dell’Ambient Assisted Living (FORITAAL 2019)*, June 2019.

Paola Pierleoni, Alberto Belli, Andrea Gentili, Lorenzo Incipini, Lorenzo Palma, Simone Valenti, Sara Raggiunto, “A eHealth System for Atrial Fibrillation Monitoring”, in *9th Forum Italiano dell’Ambient Assisted Living (FORITAAL 2018)*, July 2018.

Paola Pierleoni, Alberto Belli, Roberto Concetti, Lorenzo Palma, Federica Pinti, Sara Raggiunto, Simone Valenti, Andrea Monteriù, “A Non-invasive Method for Biological Age Estimation Using Frailty Phenotype Assessment”, in *9th Forum Italiano dell’Ambient Assisted Living (FORITAAL 2018)*, July 2018

## Bibliografia

- [1] Kevin Ashton et al., “That ‘internet of things’ thing”, *RFID journal*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.
- [2] Michele Zorzi, Alexander Gluhak, Sebastian Lange, and Alessandro Bassi, “From today’s intranet of things to a future internet of things: a wireless- and mobility-related view”, *IEEE Wireless communications*, vol. 17, no. 6, pp. 44–51, 2010.
- [3] Emi Mathews, Salih Serdar Guclu, Qingzhi Liu, Tanir Ozcelebi, and Johan J Lukkien, “The internet of lights: An open reference architecture and implementation for intelligent solid state lighting systems”, *Energies*, vol. 10, no. 8, pp. 1187, 2017.
- [4] Mathilde Durvy, Julien Abeillé, Patrick Wetterwald, Colin O’Flynn, Blake Leverett, Eric Gnoske, Michael Vidales, Geoff Mulligan, Nicolas Tsiftes, Niclas Finne, et al., “Making sensor networks ipv6 ready”, in *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*. ACM, 2008, pp. 421–422.
- [5] Ping Song, Chang Chen, Kejie Li, and Li Sui, “The design and realization of embedded gateway based on wsn”, in *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*. IEEE, 2008, vol. 4, pp. 32–36.
- [6] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey”, *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [7] Sang Hyuk Lee, Soobin Lee, Heecheol Song, and Hwang Soo Lee, “Wireless sensor network design for tactical military applications: Remote large-scale environments”, in *MILCOM 2009-2009 IEEE Military communications conference*. IEEE, 2009, pp. 1–7.
- [8] Byungrak Son, Yong-sork Her, and Jung-Gyu Kim, “A design and implementation of forest-fires surveillance system based on wireless sensor networks for south korea mountains”, *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, vol. 6, no. 9, pp. 124–130, 2006.

## Bibliografia

- [9] Adam B Noel, Abderrazak Abdaoui, Tarek Elfouly, Mohamed Hossam Ahmed, Ahmed Badawy, and Mohamed S Shehata, “Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1403–1423, 2017.
- [10] Jiong Jin, Jayavardhana Gubbi, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami, “An information framework for creating a smart city through internet of things”, *IEEE Internet of Things journal*, vol. 1, no. 2, pp. 112–121, 2014.
- [11] S Valenti, M Conti, P Pierleoni, L Zappelli, A Belli, F Gara, S Carbonari, and M Regni, “A low cost wireless sensor node for building monitoring”, in *2018 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [12] Dae-Man Han and Jae-Hyun Lim, “Smart home energy management system using ieee 802.15. 4 and zigbee”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 1403–1410, 2010.
- [13] Paola Pierleoni, Luca Pernini, Alberto Belli, Lorenzo Palma, Lorenzo Maurizi, and Simone Valenti, “Indoor localization system for aal over ipv6 wsn”, in *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2016, pp. 1–7.
- [14] Paola Pierleoni, Alberto Belli, Andrea Gentili, Lorenzo Incipini, Lorenzo Palma, Simone Valenti, and Sara Raggiunto, “A ehealth system for atrial fibrillation monitoring”, in *Italian Forum of Ambient Assisted Living*. Springer, 2018, pp. 229–241.
- [15] Paola Pierleoni, Alberto Belli, Roberto Concetti, Lorenzo Palma, Federica Pinti, Sara Raggiunto, Simone Valenti, and Andrea Monteriù, “A non-invasive method for biological age estimation using frailty phenotype assessment”, in *Italian Forum of Ambient Assisted Living*. Springer, 2018, pp. 81–94.
- [16] Abu Zafar Abbasi, Noman Islam, Zubair Ahmed Shaikh, et al., “A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture”, *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, 2014.
- [17] Vehbi C Gungor and Gerhard P Hancke, “Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches”, *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258–4265, 2009.

- [18] Winston KG Seah, Zhi Ang Eu, and Hwee-Pink Tan, “Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap)-survey and challenges”, in *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*. Ieee, 2009, pp. 1–5.
- [19] Lorenzo Palma, Luca Pernini, Alberto Belli, Simone Valenti, Lorenzo Maurizi, and Paola Pierleoni, “Ipv6 wsn solution for integration and interoperation between smart home and aal systems”, in *2016 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [20] Fernando Gont, “A method for generating semantically opaque interface identifiers with ipv6 stateless address autoconfiguration (slaac)”, 2014.
- [21] J Vasseur, Navneet Agarwal, Jonathan Hui, Zach Shelby, Paul Bertrand, and Cedric Chauvenet, “Rpl: The ip routing protocol designed for low power and lossy networks”, *Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance*, vol. 36, 2011.
- [22] Rajeev Piyare, Sun Park, Se Yeong Maeng, Sang Hyeok Park, Seung Chan Oh, Sang Gil Choi, Ho Su Choi, and Seong Ro Lee, “Integrating wireless sensor network into cloud services for real-time data collection”, in *2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC)*. IEEE, 2013, pp. 752–756.
- [23] Andrea Zanella, Nicola Bui, Angelo Castellani, Lorenzo Vangelista, and Michele Zorzi, “Internet of things for smart cities”, *IEEE Internet of Things journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [24] Paola Pierleoni, Alberto Belli, Lorenzo Palma, Simone Valenti, Sara Raggiunto, Lorenzo Incipini, and Piergiovanni Ceregioli, “The scrovegni chapel moves into the future: an innovative internet of things solution brings new light to giotto’s masterpiece”, *IEEE Sensors Journal*, 2018.
- [25] Marco Frascarolo, Stefano Martorelli, and Valeria Vitale, “An innovative lighting system for residential application that optimizes visual comfort and conserves energy for different user needs”, *Energy and Buildings*, vol. 83, pp. 217–224, 2014.
- [26] Zoltán Nagy, Fah Yik Yong, Mario Frei, and Arno Schlueter, “Occupant centered lighting control for comfort and energy efficient building operation”, *Energy and Buildings*, vol. 94, pp. 100–108, 2015.
- [27] Michele Magno, Tommaso Polonelli, Luca Benini, and Emanuel Popovici, “A low cost, highly scalable wireless sensor network solution to achieve

## Bibliografía

- smart led light control for green buildings”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2963–2973, 2014.
- [28] Pablo Londero, Theresa Fairbanks-Harris, and Paul M Whitmore, “An open-source, internet-of-things approach for remote sensing in museums”, *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 55, no. 3, pp. 166–175, 2016.
- [29] Francisco Mesas-Carrascosa, Daniel Verdú Santano, Jose Meroño de Larri-va, Rafael Ortíz Cordero, Rafael Hidalgo Fernández, and Alfonso García-Ferrer, “Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: A case study of the mosque-cathedral of córdoba”, *Sensors*, vol. 16, no. 10, pp. 1620, 2016.
- [30] Henoc Agbota, John Mitchell, Marianne Odlyha, and Matija Strlič, “Re-mote assessment of cultural heritage environments with wireless sensor array networks”, *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 8779–8793, 2014.
- [31] Angel Perles, Eva Perez-Marin, Ricardo Mercado, J Damian Segrelles, Ignacio Blanquer, Manuel Zarzo, and Fernando J Garcia-Diego, “An energy-efficient internet of things (iot) architecture for preventive conser-vation of cultural heritage”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 81, pp. 566–581, 2018.
- [32] MC Rodriguez-Sanchez, S Borromeo, and JA Hernández-Tamames, “Wi-reless sensor networks for conservation and monitoring cultural assets”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1382–1389, 2010.
- [33] Mitsunori Miki, Tomoyuki Hiroyasu, and Kazuhiro Imazato, “Propo-sal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness”, *Proc. IEEE CIS*, vol. 1, pp. 520–525, 2004.
- [34] Monica Figueiredo, Luis Nero Alves, and Carlos Ribeiro, “Lighting the wi-reless world: The promise and challenges of visible light communication”, *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 28–37, 2017.
- [35] E Fred Schubert and Jong Kyu Kim, “Solid-state light sources getting smart”, *Science*, vol. 308, no. 5726, pp. 1274–1278, 2005.
- [36] Ziren Xiu and Hao Li, “Smart lighting system with brightness and color temperature tunable”, in *Computational Intelligence and Design (ISCID), 2014 Seventh International Symposium on*. IEEE, 2014, vol. 2, pp. 183–186.

- [37] Sachin Bhardwaj, Tanir Özçelebi, and Johan Lukkien, “Smart lighting using led luminaries”, in *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2010 8th IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 654–659.
- [38] Jennifer A Veitch, Guy R Newsham, PR Boyce, and CC Jones, “Lighting appraisal, well-being and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach”, *Lighting Research & Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 133–151, 2008.
- [39] Michael Bauer, Tasha Glenn, Scott Monteith, John F Gottlieb, Philipp S Ritter, John Geddes, and Peter C Whybrow, “The potential influence of led lighting on mental illness”, *The World Journal of Biological Psychiatry*, vol. 19, no. 1, pp. 59–73, 2018.
- [40] Nicola Trivellin, Matteo Meneghini, Marco Ferretti, Diego Barbisan, Matteo Dal Lago, Gaudenzio Meneghesso, and Enrico Zanoni, “Effects and exploitation of tunable white light for circadian rhythm and human-centric lighting”, in *Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), 2015 IEEE 1st International Forum on*. IEEE, 2015, pp. 154–156.
- [41] Dong Kim, Sangmin Ahn, Sangin Park, and Mincheol Whang, “Interactive emotional lighting system using physiological signals”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 59, no. 4, pp. 765–771, 2013.
- [42] Michael Royer, Ralph Tuttle, Scott Rosenfeld, and Naomi Miller, “Color maintenance of leds in laboratory and field applications”, 2013.
- [43] Anqing Liu, Arūnas Tuzikas, Artūras Žukauskas, Rimantas Vaicekauskas, Prančiskas Vitta, and Michael Shur, “Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 6801010–6801010, 2013.
- [44] LE Barbrrow, “International lighting vocabulary”, *Journal of the SMPTE*, vol. 73, no. 4, pp. 331–332, 1964.
- [45] ams AG, *Application Note: DN40 - Lux and CCT Calculations using ams Color Sensors*, revision 1.0 edition, August 2013.
- [46] Calvin S McCamy, “Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates”, *Color Research & Application*, vol. 17, no. 2, pp. 142–144, 1992.

## Bibliografia

- [47] Joseph Smith, “Calculating color temperature and illuminance using the taos tcs3414cs digital color sensor”, *Designer’s Notebook*, pp. 1–7, 2009.
- [48] Juan-Sebastián Botero Valencia, Francisco-Eugenio López Giraldo, and Jesús-Francisco Vargas Bonilla, “Calibration method for correlated color temperature (cct) measurement using rgb color sensors”, in *Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA), 2013 XVIII Symposium of*. IEEE, 2013, pp. 1–6.
- [49] Sara Raggiunto, Alberto Belli, Lorenzo Palma, Piergiovanni Ceregioli, Massimo Gattari, and Paola Pierleoni, “An efficient method for led light sources characterization”, *Electronics*, vol. 8, no. 10, pp. 1089, 2019.
- [50] Wu Yang, Ping Zhong, Shiliang Mei, Qihang Chen, Wanlu Zhang, Jiatao Zhu, Ruiqian Guo, and Guoxing He, “Photometric optimization of color temperature tunable quantum dots converted white leds for excellent color rendition”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 1–11, 2016.
- [51] N Narendran, Lei Deng, Jean Paul Freyssinier, Hua Yu, Yimin Gu, David Cyr, and Jennifer Taylor, “Developing color tolerance criteria for white leds”, *Lighting Res. Center, Troy, NY, USA*, 2004.
- [52] KH Loo, Wai-Keung Lun, Siew-Chong Tan, YM Lai, and K Tse Chi, “On driving techniques for leds: Toward a generalized methodology”, *IEEE transactions on power electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 2967–2976, 2009.
- [53] Tetsushi Tamura, Tatsumi Setomoto, and Tsunemasa Taguchi, “Illumination characteristics of lighting array using 10 candela-class white leds under ac 100 v operation”, *Journal of Luminescence*, vol. 87, pp. 1180–1182, 2000.
- [54] “U. s. department of energy, energy efficiency and renewable energy, led color characteristics”, in *Solid-State Lighting Technology Fact Sheet*. Available online: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/led-color-characteristics-factsheet.pdf>, 2016.
- [55] Raymond H Myers and Raymond H Myers, *Classical and modern regression with applications*, vol. 2, Duxbury press Belmont, CA, 1990.
- [56] Paola Pierleoni, Simone Marzorati, Chiara Ladina, Sara Raggiunto, Alberto Belli, Lorenzo Palma, Marco Cattaneo, and Simone Valenti, “Performance evaluation of a low-cost sensing unit for seismic applications: Field testing during seismic events of 2016-2017 in central italy”, *IEEE Sensors Journal*, 2018.



- [57] D Giardini, J Woessner, L Danciu, H Crowley, F Cotton, G Grünthal, R Pinho, and G Valensise, “Share european seismic hazard map for peak ground acceleration, 10% exceedance probabilities in 50 years”, *Erdbebengefahrenkarte (DOI: 10.2777/30345)*, Zürich: *ETH Zürich*, 2013.
- [58] L Chiaraluce, R Di Stefano, Elisa Tinti, Laura Scognamiglio, M Michele, E Casarotti, M Cattaneo, P De Gori, C Chiarabba, G Monachesi, et al., “The 2016 central italy seismic sequence: A first look at the mainshocks, aftershocks, and source models”, *Seismological Research Letters*, vol. 88, no. 3, pp. 757–771, 2017.
- [59] Milena Moretti, Silvia Pondrelli, Lucia Margheriti, Luigi Abruzzese, Mario Anselmi, Pierre Arroucau, Paola Baccheschi, Brian Baptie, Raffaele Bonadio, Andrea Bono, et al., “Sismiko: emergency network deployment and data sharing for the 2016 central italy seismic sequence”, *Annals of Geophysics*, vol. 59, 2016.
- [60] Gerhard Lammel, “The future of mems sensors in our connected world”, in *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2015 28th IEEE International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 61–64.
- [61] Jiri Marek and Udo-Martin Gómez, “Mems (micro-electro-mechanical systems) for automotive and consumer electronics”, in *Chips 2020*, pp. 293–314. Springer, 2011.
- [62] Haonan Wang, Linxi Dong, Wei Wei, Wen-Sheng Zhao, Kuiwen Xu, and Gaofeng Wang, “The wsn monitoring system for large outdoor advertising boards based on zigbee and mems sensor”, *IEEE Sensors Journal*, pp. 1314–1323, 2017.
- [63] Yao-Jung Wen, Jessica Granderson, and Alice M Agogino, “Towards embedded wireless-networked intelligent daylighting systems for commercial buildings”, in *Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2006. IEEE International Conference on*. IEEE, 2006, vol. 1, pp. 1–6.
- [64] Paola Pierleoni, Alberto Belli, Lorenzo Palma, Marco Pellegrini, Luca Pernini, and Simone Valenti, “A high reliability wearable device for elderly fall detection”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 8, pp. 4544–4553, 2015.
- [65] Paola Pierleoni, Alberto Belli, Lorenzo Maurizi, Lorenzo Palma, Luca Pernini, Michele Paniccchia, and Simone Valenti, “A wearable fall detector for elderly people based on ahrs and barometric sensor”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 17, pp. 6733–6744, 2016.

## Bibliografia

- [66] Donald J Milligan, Brian D Homeijer, and Robert G Walmsley, “An ultra-low noise mems accelerometer for seismic imaging”, in *Sensors*. IEEE, 2011, pp. 1281–1284.
- [67] Tao Deng, Deyong Chen, Junbo Wang, Jian Chen, and Wentao He, “A mems based electrochemical vibration sensor for seismic motion monitoring”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 92–99, 2014.
- [68] T Hagiwara, “Brief description of the project proposed by the earthquake prediction research group of japan”, in *Proc. US-Japan Conf. Res. Relat. Earth-quake Prediction Probl*, 1964, pp. 10–12.
- [69] Chiara Ladina, Simone Marzorati, Giancarlo Monachesi, Marco Cattaneo, Massimo Frapiccini, and Viviana Castelli, “Strong-motion observations recorded in strategic public buildings during the 24 august 2016 mw 6.0 amatrice (central italy) earthquake”, *Annals of Geophysics*, vol. 59, 2016.
- [70] Tom Torfs, Tom Sterken, Steven Brebels, Juan Santana, Richard van den Hoven, Vincent Spiering, Nicolas Bertsch, Davide Trapani, and Daniele Zonta, “Low power wireless sensor network for building monitoring”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 909–915, 2013.
- [71] Alessandro Sabato, Christopher Nierecki, and Giancarlo Fortino, “Wireless mems-based accelerometer sensor boards for structural vibration monitoring: a review”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 226–235, 2017.
- [72] Partha Pratim Ray, Mithun Mukherjee, and Lei Shu, “Internet of things for disaster management: State-of-the-art and prospects”, *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18818–18835, 2017.
- [73] K Abdrakhmatov, H-B Havenith, Delphine Delvaux, D Jongmans, and P Trefois, “Probabilistic pga and arias intensity maps of kyrgyzstan (central asia)”, *Journal of Seismology*, vol. 7, no. 2, pp. 203–220, 2003.
- [74] Edwin L Harp and Raymond C Wilson, “Shaking intensity thresholds for rock falls and slides: Evidence from 1987 whittier narrows and superstition hills earthquake strong-motion records”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 85, no. 6, pp. 1739–1757, 1995.
- [75] Arturo Arias, “Measure of earthquake intensity.”, Tech. Rep., Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge. Univ. of Chile, Santiago de Chile, 1970.

- [76] George W Housner, “Intensity of ground motion during strong earthquakes”, 1952.
- [77] Navin C Nigam and Paul C Jennings, “Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 59, no. 2, pp. 909–922, 1969.
- [78] David J Wald, Bruce C Worden, Vincent Quitoriano, and Kris L Pankow, “Shakemap manual: technical manual, user’s guide, and software guide”, Tech. Rep., 2005.
- [79] “Ubc, uniform building code”, in *International Conference of Building Officials, Whittier, California, USA*, 1997.
- [80] Leonardo Salvaterra and Sandro Rao, “Nuova interfaccia web della stazione sismica digitale gaia2”, *Rapporti Tecnici INGV*, 251, pp. 1–37, 2013.
- [81] Kinematics, “Episensor es-t”, Available online: <https://kinematics.com/wp-content/uploads/2017/04/datasheet-episensor-es-t-force-balance-accelerometer-kinematics.pdf>.
- [82] Hirotogu Akaike, “Information theory and an extension of the maximum likelihood principle”, in *Selected papers of hirotugu akaike*, pp. 199–213. Springer, 1998.
- [83] D Spallarossa, G Ferretti, D Scafidi, C Turino, and M Pasta, “Performance of the rsni-picker”, *Seismological Research Letters*, vol. 85, no. 6, pp. 1243–1254, 2014.
- [84] D Spallarossa, M Cattaneo, D Scafidi, S Marzorati, P De Gori, C Chiarabba, L Chiaraluca, S Barani, and G Ferretti, “Towards the creation of a fully automatic catalog of the 2016 central italy seismic sequence”, *XXXVI Convegno Nazionale GNGTS*, 14-16 Novembre 2017, Trieste.
- [85] John C Lahr, *HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern, Y2K Compliant Version*, US Department of the Interior, US Geological Survey, 1999.
- [86] Katsuaki Konno and Tatsuo Ohmachi, “Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 88, no. 1, pp. 228–241, 1998.