

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e applicazione della regolazione adattiva nella *Smart Street Lighting*



Relatori:

Prof.ssa Anna Pellegrino

Arch. Gabriele Piccablotto

Candidato:

Sara Giacchi

Anno Accademico 2018/2019

INDICE

<u>INTRODUZIONE</u>	<u>5</u>
<u>CAPITOLO 1 - SVILUPPO DELLE AREE URBANE E NASCITA DELLE <i>SMART CITY</i></u>	<u>9</u>
1.1 PREMESSA	9
1.2 NASCITA E CLASSIFICAZIONE DELLE <i>SMART CITY</i>	10
1.3 INIZIATIVE EUROPEE E BANDI	15
1.4 LA SITUAZIONE ITALIANA	17
<u>CAPITOLO 2 - L'ILLUMINAZIONE PUBBLICA NELLE <i>SMART CITY</i></u>	<u>20</u>
2.1 PREMESSA	20
2.2 LA DIFFUSIONE DEI LED NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA	23
2.3 GESTIONE E REGOLAZIONE DEL FLUSSO LUMINOSO NELLA <i>SMART STREET LIGHTING</i>	27
2.4 ESEMPI DI <i>SMART STREET LIGHTING</i>	35
<u>CAPITOLO 3 - NORMATIVA DI RIFERIMENTO</u>	<u>42</u>
3.1 PREMESSA	42
3.2 UNI 11248:2016	43
3.3 UNI EN 13201-2:2016	51
3.4 UNI EN 13201-3:2016	57
3.5 UNI EN 13201-4:2016	61
3.6 UNI EN 13201-5:2016	65
<u>CAPITOLO 4 - CASO STUDIO: COMUNE DI SAVIGLIANO</u>	<u>68</u>
4.1 PREMESSA	68
4.2 SISTEMA DI TELECONTROLLO DELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA DI SAVIGLIANO	73
4.3 CLASSIFICAZIONE DELLE STRADE E ANALISI DEI RISCHI	80
4.4 PROCEDURA PER IL CALCOLO DELLA LUMINANZA PER IL CASO STUDIO DI SAVIGLIANO	86
4.5 CALCOLO DELLA PARAMETRO DI CORRELAZIONE <i>K</i> PER IL CASO DI SAVIGLIANO	91

4.5.1 CORSO ROMITA	95
4.5.2 VIA TORRE DE CAVALLI	100
4.6 ANALISI DEI DATI	105
4.7 APPLICAZIONE DELLA REGOLAZIONE ADATTIVA	109
4.7.1 IMPLEMENTAZIONE DELLA <i>TAI</i>	110
4.7.2 IMPLEMENTAZIONE DELL'ALGORITMO <i>FAI</i>	115
4.7.3 VALUTAZIONE DEI RISPARMI ENERGETICI	121
4.8 CONSIDERAZIONI SULLA REGOLAZIONE ADATTIVA	129
4.8.1 LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE DI NUOVI IMPIANTI ADATTIVI	132
<u>CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI</u>	<u>134</u>
<u>RINGRAZIAMENTI</u>	<u>138</u>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>140</u>
<u>SITOGRAFIA</u>	<u>142</u>
<u>APPENDICE – SCHEDE TECNICHE</u>	<u>143</u>

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni si è riscontrato un significativo aumento della domanda di energia a livello mondiale. Questo fenomeno, in concomitanza con l'incremento dell'effetto serra generato dall'utilizzo di fonti fossili, ha spinto il mercato energetico ad orientarsi verso la ricerca e l'integrazione efficace di nuove fonti di energia pulite ed economiche e ad adottare politiche di risparmio energetico. La rivoluzione tecnologica che si sta verificando si è concentrata principalmente sull'ottimizzazione dell'impiego di fonti energetiche tradizionali e sullo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili (fotovoltaico, solare termico, eolico, biomassa, ecc.). In particolare, nel campo dell'illuminazione, sta avvenendo una trasformazione radicale basata sull'integrazione delle nuove tecnologie di illuminazione a LED (che possono essere alimentate da fonti di energia rinnovabili, come il fotovoltaico) con sistemi all'avanguardia di gestione e controllo del flusso luminoso. Tra i fattori che hanno permesso lo sviluppo e la diffusione di queste tecnologie vi è sicuramente l'aumento della consapevolezza dell'importanza del risparmio energetico, ma anche la possibilità di raggiungere livelli di efficienza sempre più elevati, di ottenere un'eccellente qualità della luce emessa e di acquistare prodotti innovativi a prezzi sempre più competitivi e accessibili.

L'illuminazione stradale deve garantire a tutti gli utenti della strada (pedoni, automobilisti, motociclisti e ciclisti) l'adeguata visibilità dei percorsi e delle aree marginali, in maniera tale da creare condizioni favorevoli per la riduzione del tasso di incidenti stradali e degli episodi di criminalità. L'adozione di soluzioni di illuminazione più efficienti dal punto di vista energetico, in combinazione con l'impiego di sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili, rappresenta uno dei primi passi per ridurre il consumo energetico e limitare le emissioni climalteranti. In questo panorama, la promozione dell'efficienza energetica ha rappresentato un elemento chiave della “*Strategia 20-20-20*” varata nel 2007 dall'Unione Europea, che si era posta l'obiettivo di risparmiare il 20% del proprio consumo di energia primaria, di ridurre del 20% le emissioni di gas a effetto serra e di soddisfare il 20% del fabbisogno energetico europeo con le energie rinnovabili, rispetto alle previsioni per il 2020. Nel 2014, è stato adottato il “*Quadro 2030 per il clima e l'energia*” (valido per il periodo dal 2021 al 2030), i quali obiettivi riguardano la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra di

almeno il 40% rispetto al 1990, l'aumento dell'utilizzo di energia rinnovabile di una quota pari al 27% e il miglioramento dell'efficienza energetica di almeno il 27%. Gli obiettivi in materia di energie rinnovabili e di efficienza energetica sono stati successivamente rivisti al rialzo nel 2018, arrivando rispettivamente ai valori di 32% e di 32,5%. La riduzione delle emissioni di CO₂ rappresenta un traguardo prioritario sia per i Paesi avanzati che per quelli in via di sviluppo. Negli ultimi 30 anni, infatti, le emissioni inquinanti in atmosfera sono aumentate del 60%, a causa dell'incremento della domanda dei servizi energetici e, di conseguenza, dei consumi di energia.

Per ridurre lo spreco energetico causato dall'impiego di sistemi di illuminazione obsoleti e non efficienti (come le lampade a scarica), è necessario sfruttare l'energia in modo razionale e adottare una corretta gestione dell'impianto, ovvero verificare l'effettivo bisogno di illuminazione di una determinata strada o un luogo pubblico. Sulla base delle problematiche citate in precedenza, si è diffuso il concetto di "*Smart Street Lighting*" (in italiano *Illuminazione Stradale Intelligente*), che rappresenta una rete di illuminazione pubblica in cui i lampioni sono "intelligenti e multifunzionali". Questa tecnologia sfrutta dei sensori di varia natura installati sui lampioni e un sistema di connessione avanzato dei dispositivi, permettendo una regolazione dinamica e adattiva del flusso luminoso del singolo punto luce in base alle reali esigenze dello spazio da illuminare. In questo modo, le città risultano essere più vivibili e sicure e la gestione del territorio viene svolta in modo più razionale e sostenibile, evitando sprechi, ottimizzando le risorse e accrescendo il benessere collettivo della popolazione. Un concetto fondamentale nell'ambito della *Smart Street Lighting* è quello di "energy on demand": da questo punto di vista, la regolazione adattiva permette di gestire in tempo reale il flusso luminoso degli apparecchi illuminanti, tenendo in considerazione la densità di traffico, l'orario, le condizioni meteo e altri fattori. Tale soluzione permette di monitorare costantemente i parametri degli apparecchi di illuminazione, di programmare interventi per ottimizzare la viabilità, di rilevare situazioni di emergenza e di conseguire un risparmio energetico maggiore, grazie alla possibilità di adattare il livello di luminosità in base ad una continua analisi temporale delle condizioni circostanti.

Il tema dell'*Illuminazione Smart* rientra all'interno di un concetto più esteso, ovvero quello di "*Smart City*", che rappresenta una città sostenibile che applica le tecnologie a svariati aspetti della società urbana, per migliorare e semplificare la qualità della vita della popolazione. Alla

base delle *Città Intelligenti* vi sono le “smart grid”, le quali costituiscono delle reti intelligenti che associano l’utilizzo di tecnologie tradizionali con soluzioni digitali innovative, migliorando la gestione della rete elettrica grazie a uno scambio di informazioni più rapido ed efficace. Difatti, la *Smart City* è caratterizzata dalla presenza di piattaforme intelligenti, distribuite sul campo, dotate di sensori che prevedono il trattamento computerizzato dei dati rilevati e l'automazione della gestione delle aree urbane e delle strutture pubbliche.

La tesi affronta il tema dell’illuminazione stradale intelligente, introducendo dapprima i concetti principali in tema di *Smart City* e illuminazione pubblica, per poi approfondire la tematica della regolazione adattiva e stimare i risparmi ottenibili dall’applicazione di quest’ultima ad un caso studio nell’ambito del Comune di Savigliano, in provincia di Cuneo.

Nel *Capitolo 1* viene mostrata la panoramica delle esigenze che hanno portato alla nascita e allo sviluppo di realtà urbane sostenibili e innovative, ovvero le *Smart City*. In questo capitolo vengono fornite le principali definizioni di *Smart City*, vengono mostrate le più importanti iniziative sviluppate per promuoverne la diffusione e viene presentato il contesto italiano in questo campo.

Nel *Capitolo 2* viene definito il ruolo dell’illuminazione pubblica all’interno della *Smart City* e vengono esposti i motivi per i quali si è sviluppata la “*Smart Street Lighting*”, definendone i principali componenti e le modalità di gestione e regolazione del flusso luminoso. Inoltre, vengono esposti alcuni esempi di applicazione in campo della regolazione adattiva relativi agli impianti di illuminazione stradale, sia a livello mondiale che italiano.

Il *Capitolo 3* tratta, invece, l’ambito normativo in materia di illuminazione stradale, presentando le norme che definiscono e regolano i requisiti illuminotecnici. In particolare, viene approfondito il concetto di regolazione adattiva, evidenziando le differenze tra una regolazione basata esclusivamente sui dati di traffico orario veicolare e una regolazione più avanzata, che tiene in considerazione anche i parametri ambientali e la luminanza del manto stradale (o l’illuminamento).

Nel *Capitolo 4* viene esposto il caso studio relativo al Comune di Savigliano, illustrando le attività svolte per la sperimentazione della regolazione adattiva degli impianti *FAI* nell’ambito

di un progetto di ricerca attinente al programma *P.O.R F.E.S.R 2014-2020*¹, finanziato dalla regione Piemonte. Per ragioni progettuali, è stata condotta solo una simulazione della modalità di regolazione degli impianti *TAI* e dell'applicazione dell'algoritmo per la regolazione adattiva degli impianti *FAI*, basata esclusivamente sul flusso orario veicolare. Sono stati confrontati, inoltre, i risultati ottenuti da queste simulazioni con quelli conseguiti attraverso l'adozione di cicli di regolazione pre-programmati ed è stato valutato il possibile guadagno in termini di risparmio energetico e manutentivo.

Infine, sulla base dei concetti esposti e delle criticità riscontrate in campo durante la progettazione della regolazione adattiva, sono state definite delle linee guida, con lo scopo di facilitare la progettazione di nuovi impianti adattivi e di focalizzare l'attenzione su particolari aspetti essenziali per una corretta applicazione della regolazione adattiva relativa agli impianti di illuminazione stradale.

¹ Progetto *ELF* – Improving Efficiency of street Lighting through Intelligent Dimming and Radio-Frequency data connection; *P.O.R F.E.S.R 2014-2020*.

CAPITOLO 1 - Sviluppo delle aree urbane e nascita delle *Smart City*

1.1 Premessa

Le città sono sempre state protagoniste di processi di crescita e trasformazione che hanno coinvolto diversi ambiti (urbanistico, economico, sociale, ecc.) e hanno rigenerato la funzione stessa della realtà urbana, sia in chiave di qualità della vita che di competitività e innovazione. Da oltre un decennio la maggior parte della popolazione mondiale vive nelle città e, secondo le previsioni delle Nazioni Unite, nei prossimi anni si verificherà un aumento della densità demografica nelle aree urbane; questo fenomeno, combinato con l'incremento della longevità della vita media, farà sì che nel 2050 quasi il 70% della popolazione mondiale vivrà in aree urbane². Questo significa che si conteranno oltre 3 miliardi in più di residenti nelle città, concentrati soprattutto nei paesi emergenti come Cina, India e Africa.

Urban and rural population of the world, 1950–2050

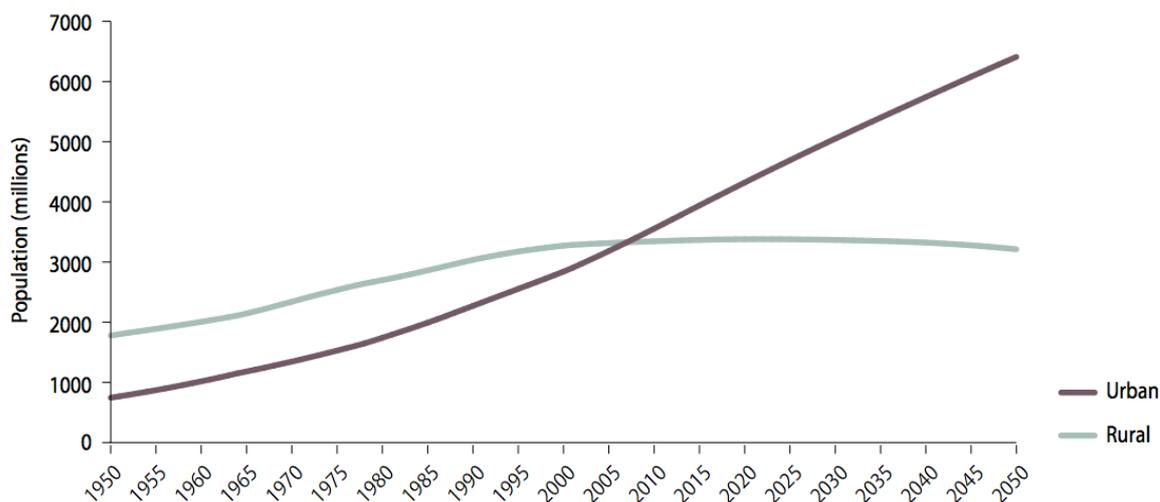


Figura 1 - Prospettive di urbanizzazione nel mondo (Fonte: *UN DESA's Population Division, 2014*)

² Secondo il "*World Urbanization Prospects 2018*" delle Nazioni Unite

Secondo il “*World Urbanization Prospects 2018*” delle Nazioni Unite, emerge che le città consumano molta energia per l’elettricità e i trasporti (circa l’80% di quella mondiale prodotta), rappresentando la fonte primaria di inquinamento a livello mondiale. Secondo il *Report dell’International Energy Agency*³, solo nel 2018 il consumo energetico mondiale è cresciuto del 2,3% rispetto all’anno precedente. Le attuali politiche e strategie di crescita in tutto il mondo aspirano a rendere le città più vivibili ed efficienti, tenendo presente che il contenimento dei problemi riguardanti l’urbanizzazione è strettamente legato al processo di innovazione tecnologica, economica e sociale. Occorre individuare un processo che permetta di potenziare le organizzazioni, le infrastrutture e i servizi che le città forniscono ai cittadini, non sottovalutando obiettivi generali fondamentali come l’implementazione della sostenibilità e del risparmio energetico, la tutela dell’ambiente e il miglioramento della qualità della vita. La trasformazione delle città in ottica “*smart*” rappresenta una risposta dal potenziale molto promettente a questa esigenza e un passo importante per un radicale cambiamento culturale indotto dai crescenti mutamenti sociali ed urbani, che richiedono tecnologie più sofisticate ed efficienti. Le *Smart City*, applicando in maniera ampiamente distribuita le tecnologie innovative nell’uso quotidiano, permettono di raccogliere informazioni e monitorare l’ambiente urbano in tempo reale, così da stabilire un controllo automatizzato e prendere decisioni “*intelligenti*” che permettano di facilitare la fruizione ai vari servizi e migliorare la qualità della vita urbana.

1.2 Nascita e classificazione delle *Smart City*

La genesi del concetto di città “*smart*” è da ricondursi all’inizio degli anni ‘90 quando, grazie alla liberalizzazione delle telecomunicazioni e al progresso dei servizi digitali, si cominciò a valutare l’idea di utilizzare la tecnologia nell’ambito delle infrastrutture urbane, rivoluzionando e migliorando l’assetto architettonico e urbanistico delle città esistenti.

Il termine “*Smart City*” venne introdotto per la prima volta nel 2009 a Rio de Janeiro dall’Unione Europea nell’ambito dello *Strategic Energy Technology Plan (piano SET)*, in occasione dello sviluppo del primo progetto che aspirava a impiegare l’innovazione

³ Report “*Global Energy and CO₂ Status Report 2018*” (Fonte *iea.org*).

tecnologica nelle città per migliorare la qualità della vita dei cittadini. Il *SET Plan* definisce una *Città Intelligente* come una città, o un grande conglomerato, che mira a migliorare l'efficienza energetica secondo gli obiettivi della “*Strategia 20-20-20*”, come stabilito dall'Unione Europea. Nonostante siano trascorsi diversi anni da quando il termine “*smart*” o “*intelligente*” venne associato al concetto di città, ad oggi risulta ancora complicato riuscire ad identificare una designazione unica e condivisa su scala mondiale. Mentre inizialmente la denominazione “*smart*” era utilizzata per definire una città digitale, nel corso dei decenni lo stesso appellativo venne adottato prima per indicare una città inclusiva (dove a chiunque era permesso partecipare produttivamente e positivamente alle attività offerte) e successivamente per designare una città sostenibile e che migliora la qualità della vita, grazie alla disponibilità dei dati e all'uso intelligente ed esteso delle tecnologie digitali.

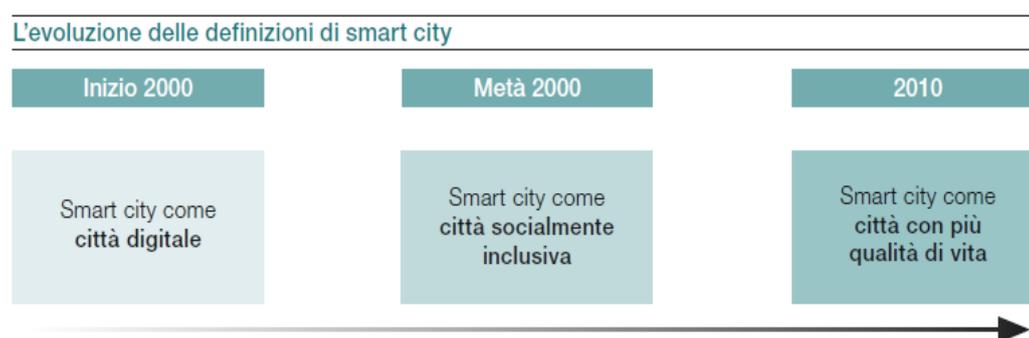


Figura 2 - Evoluzione delle definizioni di *Smart City* (Fonte: *ABB*, 2012)

Le istituzioni, le regioni o i singoli progetti affrontano il tema delle *Smart City* con modalità differenti, generando un complesso insieme di designazioni, valide a seconda del settore o del proponente che fornisce il proprio punto di vista. Tutte le definizioni, però, sono accomunate dal fatto che l'analisi dei dati e l'uso delle nuove *Tecnologie legate all'Informazione e alla Comunicazione (TIC⁴)* vengono visti come validi sistemi per risolvere le sfide economiche, sociali e ambientali di una città, nel rispetto della sostenibilità ambientale. È utile evidenziare che le *Smart City* sono definite dal loro livello di “*smartness*”, ovvero dall'innovazione e dalla loro capacità di risolvere problemi. Uno degli aspetti caratterizzanti le *Smart City*, infatti, è garantire che le tecnologie siano in grado di fornire una risposta efficace ai problemi

⁴*Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (TIC)* o in inglese *Information and Communication Technology (ICT)* sono l'insieme dei metodi e delle tecnologie che realizzano i sistemi di elaborazione, trasmissione e ricezione delle informazioni. Queste tecnologie sono basate sull'informatica e sulle telecomunicazioni.

riscontrati dai cittadini e dalle imprese. Ma il concetto di *Città Intelligente* va oltre l'impiego delle *TIC* per ridurre l'inquinamento ambientale e per ottimizzare l'utilizzo delle risorse. Quando si parla di *Smart City*, si fa riferimento anche ad un'amministrazione cittadina più interattiva e al miglioramento delle prestazioni dei servizi urbani, tra cui l'approvvigionamento idrico, lo smaltimento dei rifiuti, il trasporto urbano e il riscaldamento degli edifici.

Nella letteratura sono stati segnalati numerosi campi e vari sistemi per la classificazione delle *Smart City*. Uno dei più famosi è quello proposto nel Report del Politecnico di Vienna, in collaborazione con l'Università di Lubiana ed il Politecnico di Delft. La definizione fornita da R. Giffinger⁵ identifica 6 assi attraverso cui è possibile valutare il grado di smartness di 70 città europee di medie dimensioni:

1. economia;
2. mobilità;
3. ambiente;
4. persone;
5. vita;
6. governance.

Queste categorie sono basate rispettivamente sulle teorie della competitività regionale, dei trasporti e delle *TIC* economiche, delle risorse naturali, del capitale umano e sociale, della qualità della vita e della partecipazione dei cittadini nella gestione delle città. Il modello di *Smart City* trasforma la città in un agglomerato dinamico, che sfrutta la connettività e la cooperazione tra le sei dimensioni sopracitate.

⁵ Il professor Dr. Rudolf Giffinger è un esperto nella ricerca analitica dello sviluppo urbano e regionale. La sua ricerca si concentra principalmente sullo sviluppo intraurbano, sul degrado urbano, sulla segregazione / integrazione e sulla competitività urbana / metropolitana di città selezionate e relative questioni strategiche.

Asse	Fattori di valutazione
Smart Economy (Competitività)	<ul style="list-style-type: none"> - Spirito innovativo - Imprenditorialità - Immagine economica e marchio di fabbrica - Produttività - Flessibilità del mercato del lavoro - Contestualità internazionale - Capacità di trasformare
Smart Mobility (Trasporto e ICT)	<ul style="list-style-type: none"> - Accessibilità locale - Accessibilità nazionale - Disponibilità di infrastrutture ICT - Sistemi di trasporto sostenibili, innovativi e sicuri
Smart Environment (Risorse naturali)	<ul style="list-style-type: none"> - Attrattività delle condizioni naturali - Inquinamento - Tutela ambientale - Gestione sostenibile delle risorse
Smart People (Capitale umano e sociale)	<ul style="list-style-type: none"> - Livello di qualifica - Apprendimento permanente - Pluralità sociale ed etnica - Flessibilità - Creatività - Cosmopolitismo/Apertura mentale - Partecipazione alla vita pubblica
Smart Living (Qualità della vita)	<ul style="list-style-type: none"> - Strutture culturali - Condizioni sanitarie - Sicurezza individuale - Alloggi di qualità - Strutture per l'istruzione - Attrattività turistica - Coesione sociale
Smart Governance (Partecipazione)	<ul style="list-style-type: none"> - Partecipazione ai processi decisionali - Servizi pubblici e sociali - Governance trasparente - Strategie politiche e prospettive

Tabella 1 - Dimensioni e fattori per misurare la smartness secondo Giffinger

Nel 2012 l'Agencia per l'Italia Digitale affermava che: «... con il termine *Smart City/Community (SC)* si intende quel luogo e/o contesto territoriale ove l'utilizzo pianificato e sapiente delle risorse umane e naturali, opportunamente gestite e integrate mediante le numerose tecnologie ICT già disponibili, consente la creazione di un ecosistema capace di utilizzare al meglio le risorse e di fornire servizi integrati e sempre più intelligenti (cioè il cui valore è maggiore della somma dei valori delle parti che lo compongono). Gli assi su cui si sviluppano le azioni di una SC sono molteplici: mobilità; ambiente ed energia; qualità edilizia; economia e capacità di attrazione di talenti e investimenti; sicurezza dei cittadini e delle infrastrutture delle città; partecipazione e coinvolgimento dei cittadini. Condizioni indispensabili sono una connettività diffusa e la digitalizzazione delle comunicazioni e dei servizi.»

Per sintetizzare le principali accezioni di *Smart City* oggi esistenti, si può fare riferimento alla *Tabella 2*, nella quale si evidenziano le principali tipologie di proponente (istituzionale, accademico o imprenditoriale) e gli ambiti di focalizzazione. Sulla base delle informazioni riportate, si può affermare che:

- a) la mobilità e le tecnologie *TIC* si ritrovano in più interpretazioni;
- b) la sostenibilità ambientale risulta essere l'unico aspetto comune a tutte le definizioni;
- c) il mondo accademico presta particolare attenzione alla dimensione di qualità della vita, così come gli aspetti più marcatamente sociali;
- d) le istituzioni e le imprese si concentrano maggiormente sulle infrastrutture di rete (energia, mobilità e *TIC*).

	Mobilità	ICT	Sostenibilità ambientale	Qualità della vita	Società smart
<i>Istituzioni</i>					
EU SET Plan			■		
EU Smart Cities and Communities Initiatives	■	■	■		
Agenda Digitale per l'Italia	■	■	■	■	■
Bandi MIUR	■	■	■		■
<i>Accademia</i>					
Politecnico di Vienna	■	■	■	■	■
MIT SENSEable Lab		■	■	■	■
Caragliu et al (2009)	■	■	■	■	■
Harvard	■	■	■	■	■
<i>Imprese</i>					
ABB	■	■	■	■	
Alcatel	■	■	■	■	
IBM	■	■	■		■
Siemens	■	■	■		
Cisco	■	■	■	■	■
Accenture		■	■		■

Tabella 2 - Principali definizioni di *Smart City* per categorie di proponente e ambito di focalizzazione

1.3 Iniziative europee e bandi

Sia in Italia che nel mondo, le iniziative e i bandi per promuovere il concetto di *Smart City* stanno proliferando. Tra le principali iniziative a livello europeo si possono citare:

- *Patto dei Sindaci*

Lanciato nel gennaio 2008, esso rappresenta la principale iniziativa europea, a cui partecipano le autorità locali e regionali. Lo scopo è quello di aumentare l'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, così da raggiungere e superare l'obiettivo europeo di riduzione del 40% dei gas a effetto serra entro il 2030, e di adottare un approccio comune per affrontare la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici. L'iniziativa riunisce ad oggi oltre 7.000 enti locali e regionali in 57 Paesi. I Comuni che sottoscrivono il Patto dei Sindaci si impegnano a stilare il proprio *Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES)*, che riporta gli interventi atti al raggiungimento degli obiettivi. I provvedimenti, nelle città firmatarie del Patto, si concentrano principalmente su:

- a) mobilità pulita;
- b) riqualificazione energetica di edifici pubblici e privati;
- c) sensibilizzazione dei cittadini in tema di consumi energetici.

Nel giugno del 2016, il Patto dei Sindaci si è unito con un'altra iniziativa, il *Compact of Mayors*⁶, annunciando il nuovo "*Patto Globale dei Sindaci per il Clima & l'Energia*", che rappresenta il più grande movimento dei governi locali impegnati a superare i loro obiettivi nazionali in tema di clima ed energia.

- *Piano strategico per le tecnologie energetiche (SET Plan)*

Adottato nel 2008, esso rappresenta una strategia volta a stimolare lo sviluppo e l'utilizzo in tutta Europa di tecnologie a basse emissioni entro il 2020 e migliorare la competitività delle tecnologie energetiche innovative. In tal modo, promuove la cooperazione tra gli Stati membri, l'industria, gli istituti di ricerca e l'UE. L'attuazione del piano SET è realizzata attraverso le *Piattaforme Europee Per La Tecnologia e L'innovazione (ETIP)* e l'*Alleanza Europea Per La Ricerca Nel Settore Dell'energia (EERA)*.

⁶ Il Compact of Mayors è il più grande sforzo cooperativo del mondo tra sindaci e funzionari della città per ridurre le emissioni di gas serra e i rischi climatici nelle città. Attraverso la misurazione standardizzata delle emissioni e dei rischi climatici e una comunicazione pubblica coerente dei loro sforzi, fornisce prove concrete che le città sono i veri leader del clima e che l'azione locale può avere un impatto globale significativo.

- *Smart Cities and Communities European Innovation Partnership*

È un'iniziativa lanciata nel 2011 e sostenuta dalla Commissione Europea, il cui obiettivo è la realizzazione di collaborazioni tra le aziende e le città europee, riunendo così città, industrie, piccole e medie imprese, banche, ricerca e altri. I progetti riguardano lo sviluppo di sistemi di mobilità urbana e la realizzazione di edifici e infrastrutture digitali intelligenti e sostenibili, affinché le innovazioni nel campo dell'energia, dei trasporti e delle *TIC* siano in grado di accelerare la trasformazione delle aree urbane in ambienti in cui le risorse energetiche siano utilizzate in maniera efficiente, sostenibile e con basse emissioni di carbonio.

- *Smart Cities and Communities Initiative*

È un'iniziativa supportata dall'Unione Europea che mira a migliorare le reti elettriche, il settore dei trasporti e l'efficienza energetica nell'edilizia, attraverso soluzioni integrate di produzione e utilizzo dell'energia più sostenibile ed efficiente nelle città. Questa iniziativa supporta circa 20/25 città europee la cui sfida è quella di superare gli obiettivi climatici ed energetici dell'Unione Europea per giungere ad una riduzione del 40% delle emissioni di gas ad effetto serra entro il 2020. Il bando, emanato a giugno 2011, ha visto tra i vincitori anche la città di Genova.

- *Fondo europeo per l'efficienza energetica (EEE)*

Lanciato nel 2011, è un'innovativa partnership pubblico-privato che sfrutta l'implementazione di misure di efficienza energetica e l'utilizzo di energia rinnovabile negli stati membri dell'Unione Europea per promuovere la mobilità sostenibile e ridurre l'impatto ambientale.

1.4 La situazione italiana

Con il Decreto Legislativo n. 12/179 del 18 ottobre 2012, venne introdotto per la prima volta in Italia in una legge dello Stato il concetto di "*Comunità Intelligente*", ma la carenza di risorse economiche, l'alternarsi di amministrazioni e la mancanza di competenze hanno limitato notevolmente lo sviluppo di realtà "*smart*". Nonostante negli ultimi anni si siano registrati provvedimenti dedicati all'innovazione sociale nelle città, attraverso azioni come

l'elaborazione di un *Piano Strategico Nazionale per lo Sviluppo della Banda Larga*, finanziamenti, bandi *Smart City* e l'adozione del *PON Metro 2014-2020*⁷, la situazione resta caratterizzata da una numerosità di soluzioni che presentano alcuni limiti, tra i quali l'eterogeneità tra le diverse realtà a discapito di un'iniziativa comune e uno scarso livello di coordinamento tra Comuni e Governo centrale. Ad oggi, manca la definizione di una metodologia per applicare il concetto di *Smart City* all'interno delle città che permetta di garantire una pianificazione di progetti a medio e lungo termine e il miglioramento della qualità della vita dell'intera popolazione.

Dal confronto tra la situazione italiana e quella del resto dell'Europa, emerge che i passi da compiere in Italia sono ancora numerosi, nonostante alcuni dati incoraggianti: sono infatti numerose le iniziative che sfruttano le tecnologie digitali per rendere le città più "smart" (circa il 48% dei comuni con più di 15.000 abitanti ha avviato almeno un progetto "smart" nel triennio 2015-2017). Sono però molto meno diffusi i casi in cui si è riusciti a sviluppare progetti che si estendessero su larga scala in modo permanente (solo nel 37% dei casi). È necessario definire un indirizzo strategico che permetta di sviluppare una pianificazione globale a lungo termine (personalizzata in base alle esigenze), che tenga conto delle capacità di ciascuna città o realtà sociale di implementare un modello di crescita sostenibile e di ottimizzazione degli investimenti, sfruttando appieno l'integrazione tra le sue numerose opportunità e soluzioni.

Il Rapporto *ICity Rate* analizza 106 comuni capoluoghi italiani sulla base dello sviluppo delle tecnologie, considerando 113 indicatori su 15 dimensioni urbane⁸ e mostra l'elenco delle città italiane più smart (*Figura 3*). Nel 2018, in vetta alla classifica si è posizionata la città di Milano, grazie allo sviluppo degli ambiti relativi alla crescita economica, alla ricerca e all'innovazione. Al secondo posto Firenze, per le sue eccellenze nel campo turistico-culturale,

⁷ Il Programma Operativo Nazionale "Città Metropolitane 2014 – 2020", a titolarità dell'Agenzia per la Coesione Territoriale, supporta le priorità dell'Agenda urbana nazionale e, nel quadro delle strategie di sviluppo urbano sostenibile delineate nell'Accordo di Partenariato per la programmazione 2014/2020, si pone in linea con gli obiettivi e le strategie proposte per l'Agenda urbana europea che individua nelle aree urbane i territori chiave per cogliere le sfide di crescita intelligente, inclusiva e sostenibile poste dalla Strategia Europa 2020. Le città metropolitane interessate sono 14: Torino, Genova, Milano, Bologna, Venezia, Firenze, Roma, Bari, Napoli, Reggio Calabria, Cagliari, Catania, Messina e Palermo.

⁸ Povertà, istruzione, aria e acqua, energia, crescita economica, occupazione, turismo e cultura, ricerca e innovazione, trasformazione digitale e trasparenza, mobilità sostenibile, rifiuti, verde pubblico, suolo e territorio, legalità e sicurezza, governance (Fonte: *ICity Rate 2018 – La classifica delle città intelligenti italiane, settima edizione* – ottobre 2018, Realizzata da FPA)

per la mobilità sostenibile, la stabilità economica, l'istruzione e l'utilizzo razionale dell'energia. Bologna, invece, si è piazzata al terzo posto, confermando la sua avanguardia negli ambiti del lavoro, dell'energia e della governance e partecipazione civile. A completare la classifica delle prime dieci *Smart City* italiane si trovavano poi Trento, Bergamo, Torino, Venezia, Parma, Pisa e Reggio Emilia.

ICity Rate 2018 – le prime 10 città in classifica			
Posizione 2018	Città	Punteggio	Posizione 2017
1	Milano	640,2	1
2	Firenze	621,6	3
3	Bologna	620,0	2
4	Trento	583,6	5
5	Bergamo	567,1	6
6	Torino	547,7	7
7	Venezia	544,1	4
8	Parma	539,1	9
9	Pisa	538,6	13
10	Reggio Emilia	532,8	11

Figura 3 - Classifica delle prime 10 città smart (Fonte: *ICity Rate*)

CAPITOLO 2 - L'illuminazione pubblica nelle *Smart City*

2.1 Premessa

In una *Smart City*, i servizi resi disponibili per migliorare il benessere ed accrescere la sicurezza dei cittadini includono l'approvvigionamento idrico, la fornitura di elettricità, i trasporti, l'illuminazione stradale, ecc. Tra quelli citati, l'illuminazione stradale è sicuramente uno dei servizi più importanti per la progettazione delle città intelligenti, in quanto rappresenta per i Comuni una delle voci di spesa più cospicue nell'amministrazione del territorio; inoltre, l'aumento del consumo di energia e il rialzo del prezzo delle tariffe elettriche contribuiscono ad aggravare tale bilancio. La causa è da ricondursi alla scarsa efficienza energetica dei sistemi di illuminazione pubblica attualmente impiegati, alle limitate risorse economiche da dedicare al loro miglioramento e alle competenze degli amministratori non sempre adeguate a gestire un servizio multidisciplinare, nel quale si intrecciano tematiche complesse e molto differenti. Per di più, il sistema di illuminazione vede una serie di sprechi su cui è possibile intervenire: numerosi impianti di illuminazione pubblica, infatti, si presentano obsoleti e non conformi alle norme vigenti in materia di efficienza energetica e molti lampioni si accendono/spengono in funzione di una programmazione oraria e forniscono un flusso luminoso costante durante la loro attività. Anche quando non fosse più richiesta l'illuminazione stradale o la piena luminosità, questo meccanismo di illuminazione "sempre acceso/spento" tradizionale continua a fornire un flusso luminoso, generando così uno spreco di energia. Inoltre, nell'eventualità di guasti di alcuni lampioni, tali impianti non consentono di rilevare e segnalare in maniera rapida ed efficiente i lampioni difettosi. A tutto ciò va aggiunto che, per ragioni tecniche e normative, il flusso luminoso emesso da questa tipologia di apparecchi risulta superiore rispetto a quello effettivamente richiesto (un esubero pari al 30-35%), per tenere in considerazione la riduzione delle prestazioni dovute all'usura degli apparecchi di illuminazione durante la loro vita utile.

L'analisi sull'illuminazione pubblica contenuta nel rapporto "Finanza Locale 2/2016" a cura del Centro studi e ricerche di Cassa depositi e prestiti dichiara: «*L'illuminazione pubblica si caratterizza per consumi di elettricità eccessivi e sproporzionati rispetto alla qualità del*

servizio offerto ai cittadini. Si stima che i risparmi energetici potenzialmente conseguibili - attraverso la realizzazione d'interventi di efficientamento degli impianti e di miglioramento delle loro prestazioni funzionali e illuminotecniche - siano in un range del 30-60% rispetto all'attuale profilo dei consumi».

Secondo i dati forniti da Terna, nel 2017 il consumo di energia elettrica destinata esclusivamente all'illuminazione pubblica in Italia è stato pari a circa 6.000 GWh e la spesa italiana per l'illuminazione pubblica, sempre nello stesso anno, è ammontata a circa 1,7 miliardi di euro.

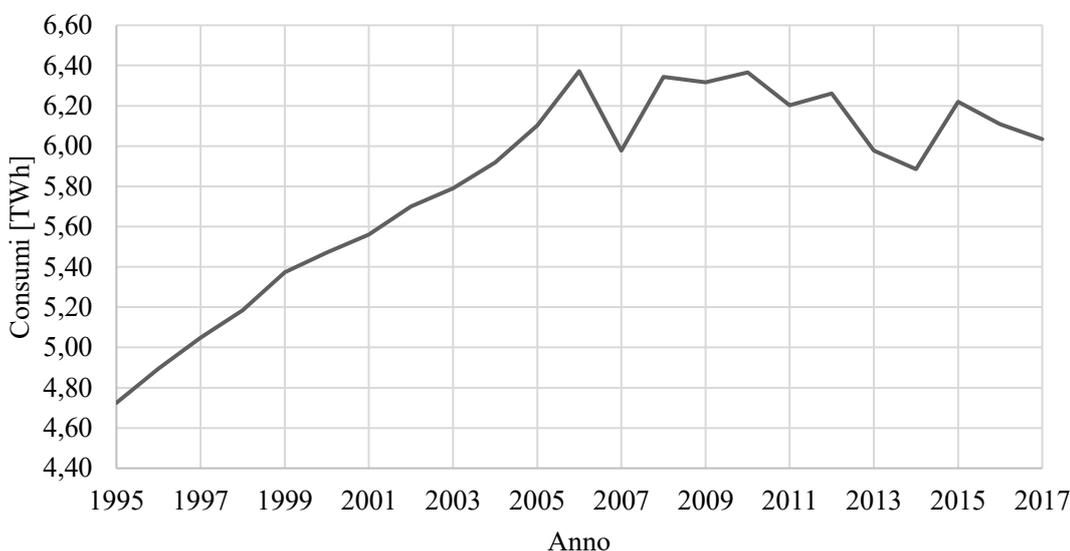


Figura 4 - Consumi di energia elettrica in Italia per l'illuminazione pubblica (Fonte: Terna, 2017)

L'Europa spreca almeno il 20% dell'energia che consuma a causa della scarsa efficienza degli apparecchi e degli impianti di illuminazione e si è posta l'obiettivo di ridurre queste perdite entro il 2020, adottando un *Piano d'azione sull'efficienza energetica*. Quest'ultimo mira ad eliminare dal mercato i prodotti che consumano troppo e ad informare i cittadini su quelli più efficienti. Inoltre, esso introduce norme minime di rendimento energetico per apparecchiature e impianti e prevede un'ulteriore diffusione dei sistemi di etichettatura energetica e di incentivazione economica. In Italia, le recenti disposizioni legislative regionali in tema di risparmio energetico stimolano i Comuni a dotarsi di piani di illuminazione per migliorare la qualità e l'efficienza delle sorgenti luminose, per regolare l'utilizzo degli impianti esistenti

sul territorio e per controllare l'introduzione di nuove installazioni. Lo strumento tecnico di pianificazione strategica urbana è rappresentato dal *Piano Regolatore dell'Illuminazione Comunale (PRIC)*, il quale permette di evidenziare le principali soluzioni che consentono di razionalizzare l'utilizzo dell'energia per l'illuminazione e adeguare gli impianti esistenti ai nuovi requisiti di inquinamento luminoso, efficienza energetica e sicurezza stradale. Essendo però uno strumento urbanistico ancora non obbligatorio esso non è stato adottato dalla maggior parte dei comuni italiani.

La riqualificazione energetica dei sistemi di illuminazione pubblica rappresenta il primo passo da parte delle Amministrazioni Locali per attuare una politica di risparmio energetico, di riduzione dei consumi e, di conseguenza, delle emissioni di gas ad effetto serra rilasciate in atmosfera. Ad oggi, accanto a tali esigenze si presenta anche il proposito di armonizzare gli impianti di illuminazione con l'ambiente circostante, limitando l'abbagliamento e l'inquinamento luminoso. Circa il 20-30% della luce emessa dagli impianti di illuminazione pubblica viene diffusa in cielo, in parte a causa della componente riflessa dal suolo e dagli edifici e in parte dell'erroneo orientamento o della cattiva scelta degli apparecchi di illuminazione. L'inquinamento luminoso e il fenomeno dell'abbagliamento possono essere causati da una distribuzione non uniforme, da un elevato contrasto di luminanza o dall'utilizzo di apparecchi non adatti e possono essere contenuti riducendo la luce intrusiva o fastidiosa che i sistemi di illuminazione generano nei confronti degli edifici attigui. Gli effetti dannosi e l'inquinamento luminoso in atmosfera possono essere notevolmente limitati con l'adozione dei regolatori di flusso.

Le città hanno bisogno di soluzioni di illuminazione innovative ad alto contenuto tecnologico, che permettano di accantonare le sorgenti luminose tradizionali e che funzionino mediante una valida rete integrata che consenta la gestione e il controllo dell'illuminazione pubblica. Nasce così la "*Smart Street Lighting*", ovvero la combinazione tra la tecnologia e l'illuminazione a LED, con la quale si rende possibile il controllo della luce fornita dagli apparecchi di illuminazione, in funzione del profilo di occupazione delle strade, e la riduzione dei costi di manutenzione e dei consumi energetici. Gli interventi necessari per rendere il servizio di illuminazione pubblica più sicuro, efficiente e innovativo riguardano:

1. la riqualificazione delle armature stradali (con l'adozione delle tecnologie LED);

2. l'introduzione nelle armature di dispositivi elettronici che permettano la creazione di una rete di telecontrollo (per consentire la gestione da remoto dei singoli punti luce);
3. l'installazione di ripetitori Wi-Fi (con i quali si rende possibile usufruire di numerosi servizi basati sulle tecnologie digitali).

Le soluzioni di illuminazione a LED “*intelligenti*” costituiscono delle vere e proprie stazioni multifunzione: infatti, gli apparecchi di illuminazione sono spesso accoppiati a sensori che consentono, a seconda delle esigenze, di gestire le luci in modalità on/off oppure regolare il flusso luminoso emesso, in funzione dell'attività pedonale e/o veicolare. Lo sviluppo delle tecnologie per il rilevamento e la trasmissione dei dati consente la diffusione di un nuovo sistema di gestione dell'illuminazione stradale. Questa struttura è costituita da un centro di controllo remoto che monitora ed emette comandi per controllare in maniera “adattiva” l'illuminazione stradale in base alle informazioni ambientali raccolte dai sensori locali, come le condizioni meteorologiche e del traffico. L'adozione della regolazione adattiva nell'ambito dell'illuminazione stradale offre delle prospettive significative sia per il risparmio energetico sia per il monitoraggio dello stato dell'impianto di illuminazione stradale. Implementando il sistema di illuminazione stradale con adeguate innovazioni tecnologiche si è in grado di sviluppare il concetto di “energy on demand”, il quale si basa sulla possibilità di fornire l'illuminazione solo quando è necessario e nella misura richiesta. Inoltre, è possibile integrare questa tecnologia con altri servizi, come ad esempio l'attivazione di telecamere di sorveglianza ove e quando necessario, il monitoraggio della temperatura e della qualità dell'aria e l'utilizzo dell'internet wireless urbano. Nella tematica delle *Smart City*, l'adozione di un sistema di illuminazione pubblica intelligente è considerata una grande opportunità capace di rendere più efficiente la gestione delle reti urbane connesse ai servizi energetici pubblici, sia dal punto di vista energetico che funzionale. Attraverso il monitoraggio degli spazi pubblici possono essere forniti un numero significativo di servizi ausiliari, come la raccolta delle informazioni sulle prestazioni funzionali degli apparecchi di illuminazione e la tutela della sicurezza pubblica.

2.2 La diffusione dei LED nell'illuminazione pubblica

Il servizio di pubblica illuminazione svolge un ruolo essenziale per la vita cittadina, in quanto garantisce la visibilità nelle ore buie (permettendo di identificare persone, ostacoli e fonti di

pericolo) e la sicurezza per il traffico veicolare al fine di evitare incidenti, perdita di informazioni sul tragitto e sulla segnaletica in generale. Inoltre, una buona illuminazione migliora la qualità della vita sociale, con l'incentivazione delle attività serali, e permette la valorizzazione delle strutture architettoniche e ambientali. Questi obiettivi primari devono essere ottenuti cercando non solo di minimizzare i consumi energetici, ma anche contenendo il più possibile il flusso disperso, concausa dell'inquinamento luminoso, dell'invasività della luce e dell'impatto sull'ambiente.

Lo sviluppo di nuove tecnologie ha consentito di realizzare una notevole varietà di sorgenti luminose, destinate alle più differenti applicazioni in ambito illuminotecnico. Tuttavia, le sorgenti luminose elettriche possono essere classificate in tre categorie principali:

- lampade a incandescenza (tradizionali o alogene)
- lampade a scarica nei gas
 - a bassa pressione (comprendono le lampade fluorescenti e le lampade a vapori di sodio a bassa pressione)
 - ad alta pressione (comprendono le lampade ai vapori di mercurio, le lampade a ioduri metallici e le lampade a vapori di sodio ad alta pressione)
- LED.

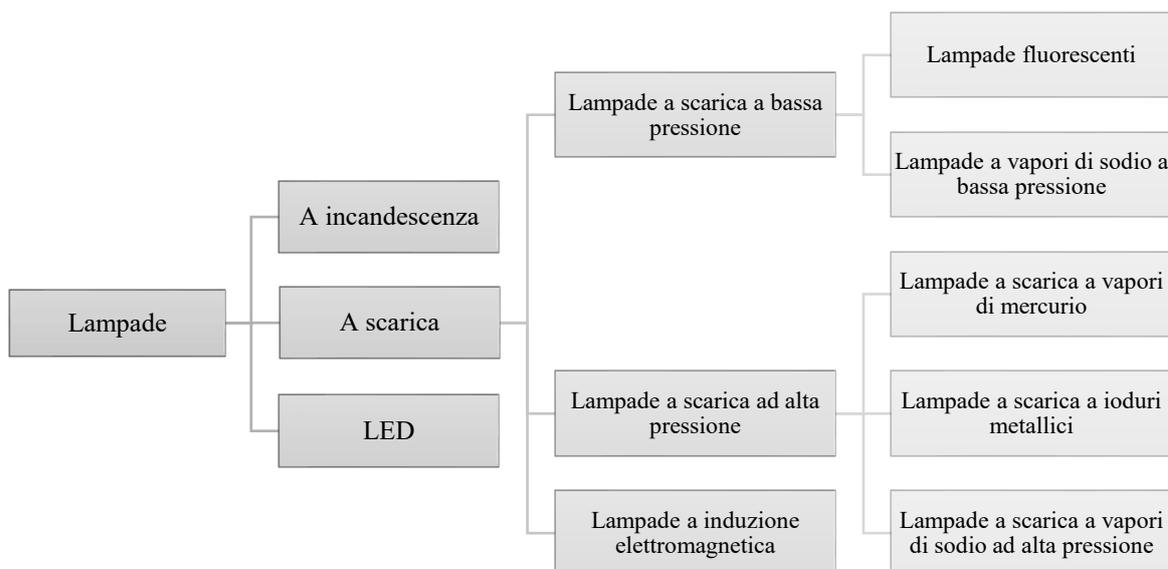


Figura 5 - Categorie di sorgenti luminose

Tra le sorgenti luminose idonee per l'illuminazione pubblica vi sono le lampade a scarica ad alta intensità (soprattutto quelle a sodio), che sono state il prodotto dominante nell'illuminazione stradale per molti anni; sono state largamente impiegate per illuminare le autostrade, grazie all'efficienza molto elevata che permetteva di compensare la bassa resa cromatica (non importante in questo tipo di applicazione). Invece, le lampade al sodio a bassa pressione sono state molto usate in incroci soggetti a nebbia; uno dei principali vantaggi nell'uso di queste lampade è rappresentato dal mantenimento del contrasto visivo anche in caso di nebbia e foschia, grazie all'elevata efficienza luminosa e all'emissione monocromatica in una lunghezza d'onda ottimale per l'occhio umano. L'applicazione di questo tipo di lampade, però, è stato ridotto notevolmente nell'illuminazione stradale a causa della loro colorazione non ottimale e dell'impossibilità di restituire i colori degli oggetti illuminati.

Nell'ultimo decennio la tecnologia più innovativa, che si sta inserendo nel mercato illuminotecnico e si sta imponendo su tutte le altre tipologie di lampade per i sistemi di illuminazione stradale, è quella basata su materiali semiconduttori (diodi) ad emissione di luce, denominata illuminazione allo stato solido (*Solid State Lighting - SSL*). Tale tecnologia non utilizza filamenti riscaldati (come le lampade alogene a incandescenza) né gas (come le lampade fluorescenti) e comprende i LED (*Light Emitting Diode*) e gli OLED (*Organic Light Emitting Diode*).

Un dispositivo LED è un diodo realizzato con un materiale semiconduttore in grado di emettere fotoni per emissione spontanea nel campo del visibile (questo fenomeno è detto *luminescenza*). I LED comprendono i seguenti componenti:

- chip a led;
- vano riflettore (con contatto verso il catodo);
- filo dorato (contatto verso l'anodo);
- lente in plastica (unisce e fissa i componenti).

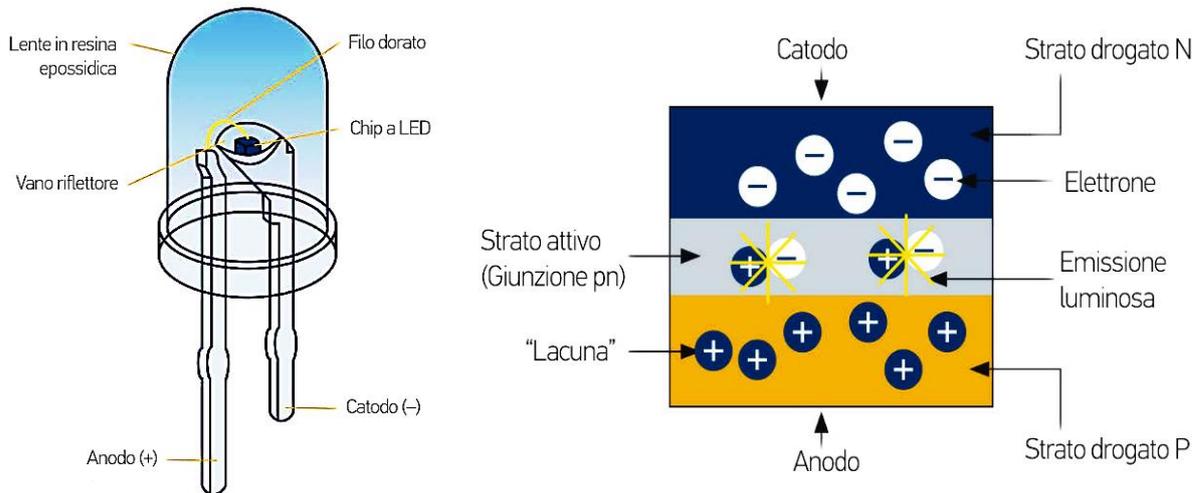


Figura 6 – Componenti lampada a LED (Fonte: www.hella.com)

Il diodo è opportunamente drogato in modo da ottenere un'area con eccesso di elettroni (*zona n*), separata da una sottile regione di confine rispetto ad un'area con eccesso di lacune (*zona p*). Sottoposti ad una tensione diretta, gli elettroni liberi presenti nella banda di conduzione (strato drogato n) si ricombinano con le lacune della banda di valenza (strato drogato p), emettendo energia sotto forma di fotoni ad una frequenza caratteristica che dipende dagli elementi usati per drogare il materiale semiconduttore. L'energia del fotone determina la lunghezza d'onda della luce emessa, e quindi il suo colore.

Le lampade a LED impiegate in ambito stradale presentano numerosi vantaggi, tra i quali vi sono:

- l'elevata durata di funzionamento, mediamente superiore a 50.000 ore;
- la possibilità di regolazione del flusso luminoso, ovvero di “*dimmerare*” (la temperatura di colore resta invariata e la luce non subisce alcuna alterazione visibile);
- l'elevata efficienza luminosa, che permette un sostanziale risparmio energetico e una notevole riduzione delle emissioni di CO₂;
- elevata resa cromatica, che rende ottimale la percezione dei colori;
- l'assenza di sostanze pericolose o tossiche;
- bassi costi di manutenzione, legati all'elevata vita utile;
- le dimensioni ridotte.

Si tratta di una tecnologia luminosa che riesce a fondere in un unico prodotto un risparmio energetico pari all'85% rispetto alle lampade tradizionali ad incandescenza⁹ ed una durata che si aggira fra i 15 e i 17 anni circa. In aggiunta, l'illuminazione a LED comporta benefici anche nella sfera ambientale e sanitaria, grazie al controllo dell'inquinamento luminoso: uno dei più importanti punti di forza di questa classe di lampade è la possibilità di direzionare il flusso luminoso in maniera tale da illuminare le superfici riducendo al minimo l'inquinamento luminoso. Questa caratteristica consente di abbassare il flusso totale emesso dalla lampada (con conseguente diminuzione della potenza installata) mantenendo la luminanza richiesta sulla superficie. I LED presentano una minore sensibilità ai fenomeni transitori, che hanno un forte impatto su altre tecnologie, consentendo migliaia di accensioni senza il rischio di guasti alla lampada e, inoltre, hanno il vantaggio di non contenere mercurio.

Le lampade a LED possono anche essere dotate di strumenti in grado di contrastare il fenomeno dell'abbagliamento. È possibile definire due tipologie di abbagliamento: l'abbagliamento molesto (*discomfort glare*), che induce una sensazione di disagio, e quello debilitante (*disability glare*), che riduce la sensibilità al contrasto. Quest'ultimo è particolarmente problematico in ambito stradale, in quanto la riduzione della capacità di percepire deboli contrasti può interferire in attività importanti nel traffico, come ad esempio nella valutazione dei pericoli, nell'individuazione di situazioni critiche e nel controllo delle luci di posizione dei veicoli. L'abbagliamento generato dai sistemi di illuminazione stradale è influenzato dal contrasto tra la luminanza della fonte di abbagliamento e la luminanza dello sfondo; inoltre, copre un ruolo fondamentale anche l'angolo tra la fonte di abbagliamento e la linea di visuale dell'osservatore. Per questi motivi, le lampade a LED sono dotate di lenti e riflettori che permettono di controllare la distribuzione dell'intensità luminosa nello spazio e il livello di luminanza.

2.3 Gestione e regolazione del flusso luminoso nella *Smart Street Lighting*

Per ottenere un risparmio energetico e una riduzione delle emissioni di CO₂ è indispensabile riprogettare le città in un'ottica "*smart*", attraverso l'utilizzo delle soluzioni digitali

⁹ Riferimento all'adozione di una lampada a LED della ditta Philips (Fonte: www.lighting.philips.it).

innovative, le quali consentono di creare una rete di connessioni e migliorare la vita nelle aree metropolitane. Oggigiorno, l'esigenza di salvaguardare l'ambiente si manifesta in maniera sempre più importante e il tema della sostenibilità energetica nel campo dell'illuminazione stradale si sta progressivamente affermando nella coscienza comune. Già negli anni '70 vennero sviluppate delle soluzioni impiantistiche nel campo dell'illuminazione che miravano a razionalizzare i consumi, attraverso l'adozione di sistemi di regolazione "tutta notte-mezzanotte" e degli alimentatori "bi-potenza". I primi prevedevano lo spegnimento alternato di metà degli apparecchi illuminanti, con conseguente non uniformità dell'illuminazione a causa della generazione di zone di luce e zone di ombra che si intervallavano. I secondi, invece, permettevano di scegliere il funzionamento a piena potenza o a potenza ridotta.

Perseguendo questi obiettivi, l'adozione delle tecnologie a LED per la *Smart Street Lighting* permette di ottenere molteplici vantaggi, sia in termini economici (minori costi di manutenzione, minore costo energetico, possibile alimentazione con micro-pannelli solari, ecc.), sia in termini gestionali (maggiore affidabilità e maggiore durata). In generale, vengono classificati con l'accezione di "*Smart Lighting*" tutti gli impianti "*intelligenti*", vale a dire quelli forniti di dispositivi che:

- I. consentono una gestione più flessibile e personalizzabile rispetto a quella dell'impianto tradizionale (basato su cablaggi e comandi localizzati e manuali);
- II. sono in grado di scambiare segnali e dati da remoto con altri dispositivi connessi in rete.

Il sistema della *Smart Street Lighting* permette la gestione ottimale degli impianti di illuminazione pubblica e della viabilità urbana: alla base vi è il concetto di "*palo intelligente*", integrato con sensori, telecamere e dispositivi di comunicazione. Esso è in grado di variare il flusso luminoso emesso garantendo un'illuminazione adeguata in ogni condizione di traffico, di luminosità ambientale e meteorologica. Attraverso una piattaforma per il controllo da remoto è possibile gestire e configurare l'impianto; inoltre, vengono raccolte e salvate le informazioni sui parametri ambientali, sul traffico e sui consumi misurati nell'area urbana monitorata.

Gli elementi chiave dell'architettura del sistema di *Smart Street Lighting* sono:

1. *Lampade*

Negli ultimi anni, i dispositivi illuminanti sono stati molto migliorati, sia dal punto di vista della resa cromatica che a livello di efficienza energetica. L'introduzione e l'applicazione dei LED ha sicuramente indotto un notevole risparmio di energia e di costi di manutenzione, grazie all'aumento della durata della vita media.

2. *Dispositivo di controllo (Controllore)*

Il dispositivo di controllo permette la regolazione dell'intensità luminosa della lampada ed è dotato anche della funzionalità di diagnosi dei guasti. Esso deve essere presente su ogni singolo punto di illuminazione ed ognuno di essi costituisce il nodo di una rete di comunicazione. Ogni singolo nodo comunica con tutti quelli che gli stanno intorno grazie ad una rete *mesh* a corto raggio (ZigBee, 6LOWPAN o Bluetooth Low Energy, ecc.) che deve essere in grado di riconfigurarsi automaticamente in caso di perdita del segnale.

3. *Dispositivo coordinatore*

Il coordinatore della rete di punti luce è un dispositivo di interfacciamento locale tra il Centro di Controllo e il dispositivo illuminante (la comunicazione a lungo raggio avviene attraverso Wi-Fi, Ethernet, GPRS, 3G/4G/5G, ecc.). Solitamente, esso sfrutta la comunicazione per interfacciarsi con i nodi della rete (punti luce), scambiare richieste di informazioni e smistare i comandi ricevuti dalla piattaforma Web.

4. *Sensori*

I sensori permettono di rilevare i dati, così da garantire un'analisi in tempo reale del traffico (pedonale/veicolare) e dei parametri ambientali in un'area di interesse (strada, piazza, ecc.).

5. *Software e pagina Web*

La piattaforma di gestione e controllo remoto consente all'utente di interagire con gli impianti di illuminazione, consultare le informazioni sullo stato dell'impianto (ad esempio la presenza di guasti) e analizzare i dati registrati dai sensori installati.

Nell'ambito della *Smart Lighting*, risulta fondamentale l'adozione delle tecnologie *TIC* per controllare in maniera funzionale molti aspetti della realtà urbana: dal monitoraggio del traffico alla gestione dell'energia, dall'e-health¹⁰ all'e-government¹¹, dai bisogni della popolazione alla gestione delle emergenze. Il corretto funzionamento della rete di connessione e di sensori intelligenti, così come la gestione dei data center/cloud (in cui i dati raccolti sono memorizzati e condivisi), costituiscono il corpo principale dell'infrastruttura di una *Smart City* e, oltretutto, permettono di ottenere degli efficaci risultati in termini di costi e affidabilità, nonché di sostenibilità delle risorse. Dall'unione delle tecnologie moderne a LED con i sistemi di regolazione del flusso luminoso intelligenti, derivano sostanziali risparmi riguardanti le risorse consumate e il flusso luminoso emesso, con una riduzione dell'inquinamento luminoso ed ottico. Al fine di amministrare in maniera ottimale l'insieme dei sensori e riuscire a interconnettere alla rete i dispositivi abilitati (in modo tale da raccogliere ed elaborare i dati), si può ricorrere all'*Internet of Things (IoT)*. Infatti, con la diffusione dell'illuminazione a LED è possibile realizzare una vasta rete di comunicazione basata sulla luce, in cui ogni apparecchio a LED funge da hotspot per la trasmissione dei dati.

Tuttavia, per gestire i dispositivi e i sensori e permettere agli apparecchi e agli utenti dei servizi di interagire tra loro e con l'ambiente circostante in maniera ottimale, è necessario introdurre dei meccanismi personalizzati di controllo e gestione delle funzionalità.

L'applicazione "base" della *Smart Street Lighting* permette di telegestire gli impianti di illuminazione pubblica mediante l'adozione di dispositivi di comando che accendono e spengono il sistema in maniera programmata, basando il funzionamento su un orologio astronomico e sul profilo orario. Tuttavia, una regolazione basata sui cicli preimpostati non permette di tenere conto della variabilità dei dati in input (come per esempio condizioni meteo avverse o traffico particolarmente intenso) e va a discapito del risparmio energetico, in quanto il flusso luminoso emesso non fa riferimento alla reale richiesta.

La soluzione più "avanzata" di telegestione per la regolazione del flusso luminoso si basa sull'esigenza di ottenere una riduzione dei consumi rilevante, una migliore viabilità del

¹⁰ Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), l'eHealth (scritto anche e-health) consiste nell'uso di tecnologie informatiche e di telecomunicazione (TIC) a vantaggio della salute umana.

¹¹ Con il termine e-government si fa riferimento in modo generico all'utilizzo di tecnologie innovative nei processi amministrativi che le Pubbliche Amministrazioni svolgono per fornire servizi ai cittadini.

traffico e una maggiore sicurezza per i pedoni, gli automobilisti e i ciclisti. È necessario adottare un sistema di illuminazione che possa adattarsi ai cambiamenti ambientali e possa rispondere in maniera adeguata alla variabilità delle condizioni esterne (come per esempio la presenza dei pedoni). A tal proposito, nel 2015 la norma europea *EN 13201-1* sull'illuminazione stradale ha introdotto un paragrafo sulla regolazione della luce stradale ed il risparmio energetico. In Italia l'aggiornamento è stato recepito attraverso la *UNI 11248:2016*, che introduce per la prima volta il concetto di “*regolazione adattiva*”, la quale rappresenta una tipologia di regolazione in cui le variazioni del flusso luminoso sono controllate e avvengono in funzione dei dati in tempo reale relativi:

- al traffico e al profilo di occupazione delle strade nelle diverse fasce orarie;
- ai parametri ambientali (come le condizioni meteo);
- alle prestazioni effettive dell'impianto di illuminazione (in termini di luminanza o illuminamento).

Questo consente di ottimizzare il funzionamento degli impianti di illuminazione, riuscendo ad ottenere il massimo risparmio energetico e a garantire la massima sicurezza degli utenti delle strade. Gli impianti di illuminazione stradale adattivi che regolano il flusso luminoso in maniera continua sono dotati della funzionalità *CP (Constant Performance)*, ovvero sono in grado di mantenere costante, al valore richiesto, la luminanza o l'illuminamento della superficie stradale nonostante l'invecchiamento degli apparecchi di illuminazione o le condizioni meteorologiche. Nell'Appendice D della norma *UNI 11248:2016*, relativa alla selezione delle categorie illuminotecniche per i sistemi di illuminazione adattivi, vengono specificati i requisiti peculiari per questi impianti, illustrando le caratteristiche generali dei sistemi adattivi e le modalità di campionamento del flusso orario di traffico. Se la regolazione adattiva è discreta, ovvero fa riferimento esclusivamente ai dati relativi al flusso orario di traffico, viene adottato l'acronimo *TAI (Traffic Adaptive Installations)*; se, invece, la regolazione è continua, cioè oltre al campionamento del flusso orario di traffico si fa riferimento anche alle condizioni meteorologiche e alla luminanza del manto stradale in tempo reale, allora si parla di *FAI (Full Adaptive Installations)*.

L'accensione e lo spegnimento dell'impianto avvengono in modo autonomo attraverso il calcolo del crepuscolo (per mezzo di fotocellule sensibili alla luce) e, grazie all'integrazione di sensori di movimento, è possibile regolare l'intensità luminosa adeguandola al passaggio

delle persone e, in caso di strade completamente vuote, è possibile ridurre il flusso luminoso (fino allo spegnimento degli apparecchi) in modo da minimizzare totalmente gli sprechi. Le modalità di regolazione adattiva permettono anche di migliorare la longevità dei dispositivi a LED che, come tutte le altre tipologie di sorgenti, vanno incontro ad invecchiamento e tendono a diminuire il flusso luminoso. Per una gestione efficiente dell'impianto di illuminazione stradale in un'ottica di *Smart Lighting* è indispensabile riuscire a programmare in maniera personalizzata i profili di riduzione del flusso luminoso e regolare a distanza le modalità di funzionamento di un impianto. Il vantaggio di tali soluzioni consiste nel poter disporre da remoto dei parametri di funzionamento dei dispositivi e quindi evitare l'ispezione degli impianti da parte di personale dedicato, comandando accensioni/spegnimenti e regolando il flusso luminoso emesso in remoto e in maniera adattiva, sulla base dei dati forniti in real-time. La riduzione e il controllo della tensione e del flusso luminoso avvengono mediante l'adozione dei dispositivi di regolazione di flusso (definiti "regolatori di flusso"). I sistemi di telegestione permettono di scegliere una gestione a gruppo o a singoli punti luce afferenti al medesimo quadro, consentendo di mantenere sempre il rispetto della normativa. Inoltre, in assenza di connettività con la piattaforma Web, è possibile abilitare la modalità "stand-alone" che consente all'impianto di funzionare in completa autonomia.



Figura 7 - Modalità di gestione dei punti luce (Fonte: www.smartlightingproject.it)

I dati (misure, allarmi e stato di funzionamento) vengono raccolti e gestiti dal centro di controllo, costituito da un PC o da un server contenuto negli uffici delle Autorità Locali, che regola tutte le attività relative agli impianti di pubblica illuminazione di una città o di un quartiere, tramite un software dedicato. Nel caso di impianti di pubblica illuminazione di piccole e medie città, tipicamente il sistema di telegestione è coordinato da un unico centro di controllo, costituito da un PC, che scambia informazioni con il quadro di comando e consente il monitoraggio dell'impianto di illuminazione. Quando, invece, i quadri di comando presenti

sono in quantità ragguardevole o esiste la necessità di condividere ed elaborare le informazioni in più sedi di lavoro, la telegestione si realizza attraverso la configurazione con più PC connessi in rete e lo scambio delle informazioni avviene non solo tra server e quadri in campo, ma anche all'interno della rete.

La comunicazione dei dati, nel caso dell'illuminazione stradale, può avvenire attraverso onde convogliate oppure attraverso sistemi wireless a onde radio. Nel caso dell'illuminazione stradale, però, la tecnologia *PLC (Power Line Communications)* ad onde convogliate rappresenta il sistema più economico di comunicazione fra punti luce e, poiché i segnali viaggiano sulle linee di alimentazione, non comportano l'installazione di cavi aggiuntivi. La tecnica di trasmissione ad onde convogliate consente di ottenere una comunicazione bidirezionale.

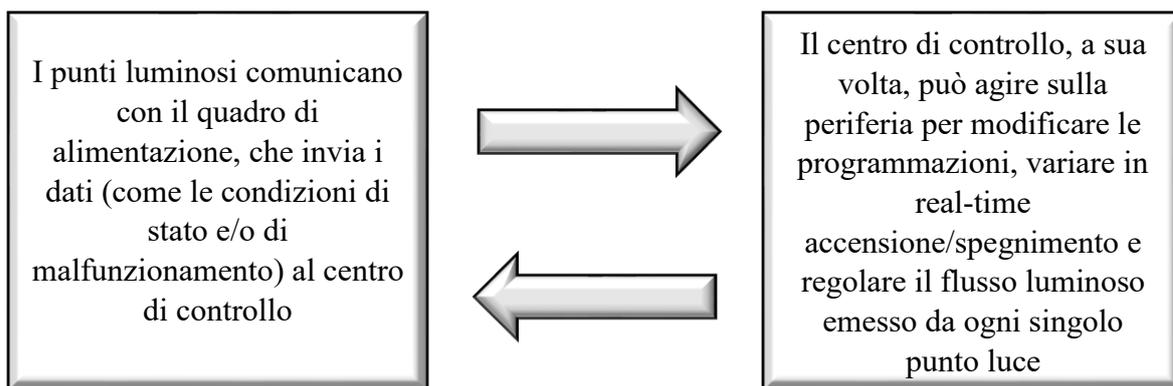


Figura 8 - Comunicazione bidirezionale tra i punti luce e il centro di controllo

Inoltre, il centro di controllo può interagire in tempo reale con sensori che rilevano dati specifici (ad esempio la luce solare, le condizioni meteo o il flusso di traffico), per garantire la migliore illuminazione in quel momento, ovvero quella che garantisce la maggiore sicurezza e il maggior risparmio energetico, tramite un software aperto e che interagisce con altri sistemi in ottica *Smart City*. Questo processo è reso possibile grazie allo sviluppo dei canali di comunicazione come *GSM, GPRS, LAN, Wi-Fi* e alla presenza, in ogni armatura, di un dispositivo operante con onde convogliate che permette di agire sul punto luce.

Il risparmio economico che si può ottenere con l'adozione della regolazione adattiva mediante tediagnosti è legato essenzialmente a due fattori: il risparmio energetico e quello manutentivo. Il risparmio energetico deriva dalla possibilità di poter predisporre di profili personalizzati di regolazione del flusso luminoso e dalla possibilità di ridurre le accensioni diurne per la ricerca dei guasti. Dal punto di vista manutentivo è possibile:

- risparmiare sui materiali (grazie al controllo mirato degli elementi guasti);
- risparmiare sui costi del personale (grazie all'ottimizzazione dei tempi d'intervento);
- eliminare i costi superflui dovuti alla ricerca dei guasti;
- risparmiare sui costi dell'organizzazione generale del servizio.

Un esempio di architettura del sistema è mostrato in *Figura 9*.

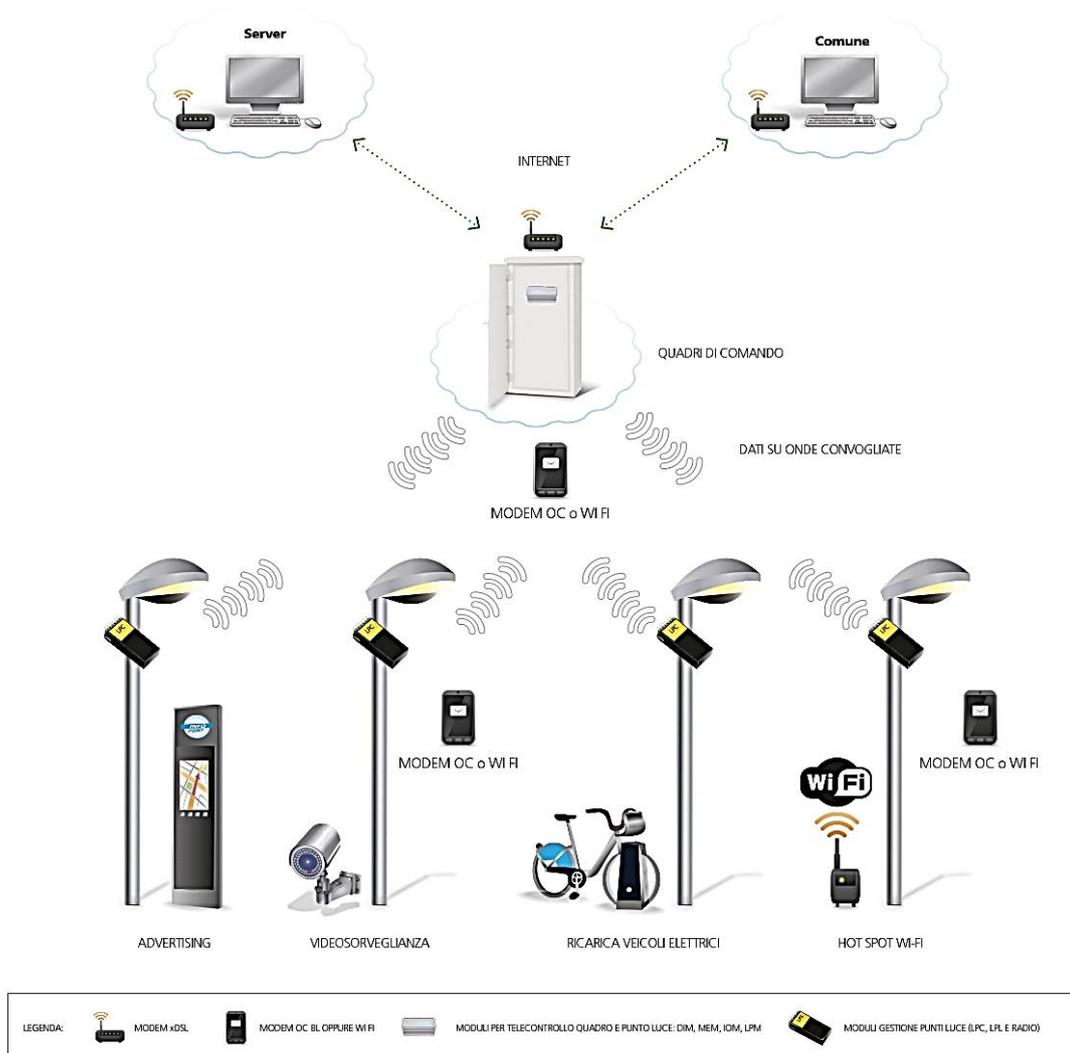


Figura 9 - Sistema di telecontrollo basato su onde convogliate (Fonte: Riverberi)

2.4 Esempi di *Smart Street Lighting*

Un primo passo verso la crescita delle *Smart City* consiste nello sviluppo del sistema di illuminazione pubblica, il quale, essendo costituito da una rete capillare di fonti luminose diffuse in maniera uniforme in tutto l'ambiente urbano, può permettere lo sviluppo di una piattaforma digitale equipaggiata con tecnologie in grado di erogare servizi per il controllo dell'intero territorio. LED e IoT diventano tecnologie abilitanti in cui si innestano tutte le altre. Ecco anche perché si parla di “*connected street lighting*”, cioè sistemi di illuminazione urbana basati sulla tecnologia LED connessi in rete. Secondo il rapporto del mercato globale dei lampioni 2019-2023 di *Global Connected (Smart)*, il numero degli apparecchi illuminanti collegati alla rete aumenterà del 28% nel periodo 2019-2023, fino a raggiungere un valore di 675 milioni di dollari (dati *Technavio*). La crescita è alimentata dalla diffusione delle politiche energetiche sostenibili dei governi per ridurre le emissioni di anidride carbonica, dallo sviluppo delle iniziative di *Smart City* e da una maggiore consapevolezza sui vantaggi dei lampioni connessi alla rete che vanno al di là del risparmio energetico. Inoltre, dal rapporto emerge che, nel 2018, la protagonista assoluta del mercato dei lampioni è stata l'Europa occidentale, seguita dal Nord America. La previsione globale per l'illuminazione esterna connessa, così come prevista da *Strategies Unlimited*, è mostrato nel grafico seguente.

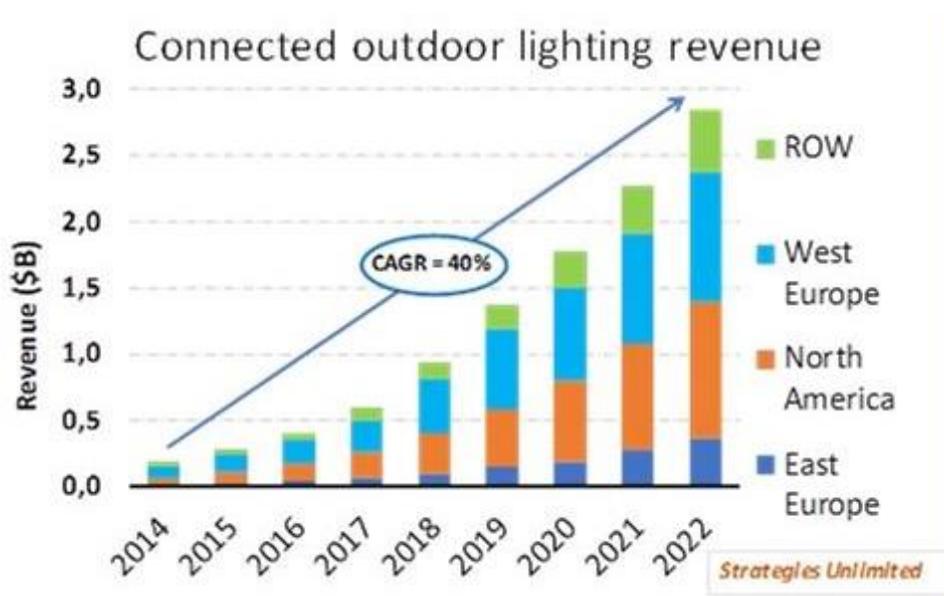


Figura 10 – Evoluzione del mercato per apparecchi di illuminazione outdoor connessi in rete
(Fonte: *Strategies Unlimited*)

IoT Analytics riporta sul suo sito la classifica, aggiornata ad agosto 2018, delle città più sviluppate dal punto di vista della *Smart Lighting* in relazione al numero di lampioni connessi e gestiti in maniera intelligente a partire dal 2017.

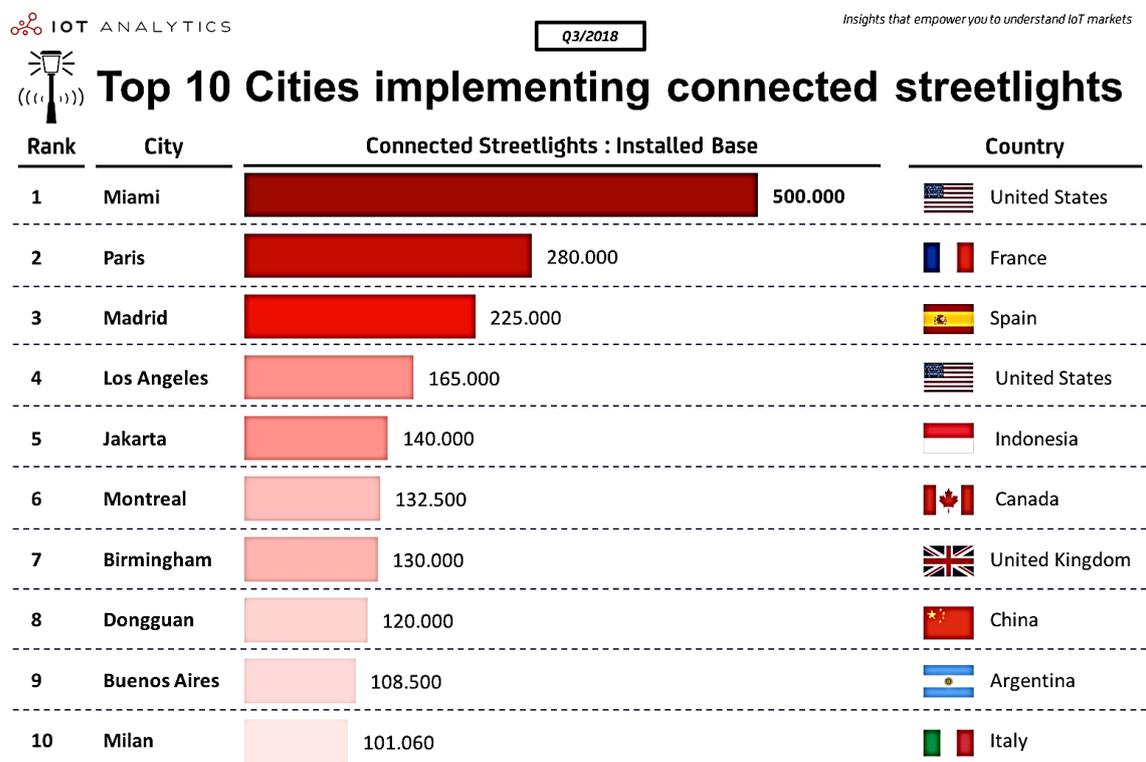


Figura 11 - Classifica delle 10 città al mondo più *Smart Lighting* (Fonte: *IoT Analytics Research*)

Nel 2018, *Miami* è risultata essere la prima città al mondo per numero di lampioni collegati in rete. La riqualificazione della struttura di illuminazione pubblica a Miami è stata affidata alla società tecnologica Itron e alla società di servizi Florida Power & Light. L'adozione dei lampioni intelligenti a LED, in sostituzione di quelli tradizionali, ha permesso di ridurre il consumo energetico e di raggiungere l'obiettivo che la città si era posta, ovvero la riduzione delle emissioni di biossido di carbonio del 25% entro il 2020 (rispetto ai livelli del 2006), come indicato nel Piano d'azione per il clima di Miami. Tale sistema ha consentito alla città di Miami di beneficiare di un risparmio energetico annuale del 44% rispetto ai consumi per l'illuminazione stradale relativi all'adozione dei lampioni tradizionali precedentemente installati. Come caso italiano, invece, al decimo posto nella classifica delle città con maggior numero di lampioni connessi in rete, vi è *Milano*. A partire dal 2014, il progetto di "A2A Illuminazione Pubblica", ha previsto la graduale sostituzione di circa 136.000 punti luce

pubblica della città, con corpi illuminanti della serie di apparecchi a LED ITALO della ditta AEC Illuminazione. Questi ultimi sono stati integrati con le tecnologie di AEC Smart System, che hanno permesso la gestione dell'illuminazione in modo flessibile e in base alle esigenze in tempo reale, massimizzando il risparmio energetico e mantenendo allo stesso tempo sicura la viabilità. Il sistema consente la registrazione completa degli stati di funzionamento di ogni apparecchio, dal conteggio delle ore di accensione, al consumo energetico, alla diagnosi puntuale degli alimentatori. È possibile, inoltre, rilevare istantaneamente consumi anomali o guasti della rete o del singolo punto luce, senza richiede ispezioni preventive in loco. Questo sistema di gestione intelligente dell'illuminazione pubblica ha permesso di evitare l'emissione di oltre 23.000 tonnellate di CO₂ e di ridurre di oltre il 50% il consumo di energia elettrica.

La raccolta dei dati relativi all'impianto di illuminazione connesso in rete permette di accendere le luci solo quando necessario e di identificare le sorgenti di luce malfunzionanti più rapidamente, risparmiando sul numero di ore di lavoro per la sostituzione. Per esempio, la *Norvegia* è tra i Paesi più all'avanguardia in fatto di risparmio energetico e illuminazione urbana. Infatti, nel 2018 azienda norvegese Comlight ha testato il primo sistema di lampioni intelligenti al mondo su un tratto di strada lungo 9 km, adottando dei sensorizzati radar su ciascun palo in grado di ridurre l'intensità della luce sulla strada del 20% in assenza di macchine, biciclette o pedoni o al contrario di aumentare l'intensità in presenza di veicoli. In questo caso, il numero di problemi tecnici con questa installazione è risultato essere molto basso e il risparmio ottenuto è stato di circa 25.000 kWh al trimestre nel periodo buio dell'anno. Un altro esempio di applicazione della Smart Lighting in un ambiente urbano è rappresentato dalla città di *Helmond*, comune olandese che attualmente conta circa 90.000 residenti e oltre 25.000 punti di illuminazione pubblica. Già nel 2013, quando ancora il concetto di illuminazione "intelligente" non era diffuso come lo è adesso, il Comune, per far fronte alla repentina crescita e all'elevato consumo di energia, decise di focalizzare l'attenzione sul miglioramento dell'illuminazione pubblica, adottando delle soluzioni sostenibili che permettessero di incrementare la sicurezza e la qualità della vita dei cittadini, riducendo al contempo i costi per la gestione dell'infrastruttura. La presenza di sensori intelligenti integrati installati in maniera diffusa in tutta la città, ha permesso lo sviluppo di un'infrastruttura digitale che le consente di evolversi insieme alle esigenze dei cittadini. Oggi, Helmond conta oltre una dozzina di reti intelligenti di illuminazione stradale che montano i sensori Twilight CitySense (sensore di movimento per l'illuminazione stradale con un

controller di illuminazione wireless integrato), SkyLite (per il controllo dell'illuminazione wireless) & CityManager (piattaforma software *Smart City*), i quali hanno permesso alla città di risparmiare il 70% dell'energia utilizzata ed incrementa l'efficienza di manutenzione del 50%. Un ulteriore esempio olandese è rappresentato dalla città di Eindhoven che, in collaborazione con l'Università tecnica di Eindhoven, la società di costruzioni e ingegneria Heijmans e all'azienda Philips Lighting, ha sviluppato il progetto "*Roadmap for Urban Lighting 2030*". L'obiettivo del programma è quello di creare una rete di illuminazione pubblica innovativa che possa contribuire al benessere dei cittadini, non solo attraverso l'illuminazione ma anche con strutture e servizi aggiuntivi. Questo sarà possibile grazie alla partecipazione attiva dei residenti al processo di pianificazione e alla rete di sensori installati nell'area urbana. La città sta già sperimentando l'illuminazione dal 2016 per un periodo di cinque anni, per poi sfruttare ciò che è stato appreso per lo sviluppo di ulteriori tecnologie e applicazioni per affrontare le sfide nei dieci successivi. A titolo di esempio, Philips Lighting suggerisce che alla fine le luci stradali potrebbero essere utilizzate per guidare i servizi di emergenza in caso di incidenti, utilizzare sensori per adattare l'illuminazione alle condizioni meteorologiche o fornire illuminazione su richiesta quando le persone usano le strade di notte.

Ma le tecnologie della *Smart Lighting* non si limitano soltanto alla regolazione sensorizzata del flusso luminoso. Tra i servizi che possono essere erogati attraverso questi pali intelligenti vi sono anche la videosorveglianza urbana, i dispositivi per il monitoraggio della qualità dell'aria, i sistemi di controllo del traffico e di gestione dei parcheggi. Nell'ottica di *Smart City*, i lampioni possono fungere da colonnine per la ricarica elettrica (come avvenuto recentemente a Verona), e in centraline di comunicazione per parlare con i veicoli in transito.

5 SMART LIGHTING APPLICATIONS



Figura 12 - Alcuni dei servizi che possono essere offerti ai cittadini (Fonte: www.inform.tmforum.org)

In Danimarca, più precisamente a Copenaghen, si stanno sperimentando dei lampioni a LED collegati in rete che, grazie ad appositi sensori di movimento e ambientali, si accendono solo quando le condizioni lo richiedono e si regolano sulla base della luce naturale presente. Inoltre, i lampioni fungono da centraline e si integrano con altri dispositivi per far fronte a necessità di comunicazione, sicurezza e controllo. Infatti, grazie ai sensori installati nelle lampade, che raccolgono dati e li inviano al software, la rete ha anche altre funzioni, come ad esempio quella di allertare il dipartimento dei servizi igienico-sanitari quando è il momento di svuotare i contenitori della spazzatura o di informare i ciclisti sul percorso più rapido e tranquillo per raggiungere le proprie destinazioni.

Nella città di San Diego sono stati sostituiti i vecchi lampioni ad alto consumo energetico con 38.000 luci a LED più efficienti (di cui 3.500 sono attualmente dotati di sistemi avanzati di controllo dell'illuminazione) e sono stati installati circa 4.200 sensori intelligenti CityIQ dell'azienda AT&T per creare la più grande infrastruttura digitale in ottica di *Smart City*. L'adozione di questi dispositivi permetterà di monitorare il traffico, i parcheggi, la qualità dell'aria e registrare persino gli eventi criminali. Inoltre, con l'iniziativa "*Intelligent Outdoor Lighting Project*", nel 2018 sono stati installati altri 14.000 nuovi dispositivi LED di controllo adattivo, che consentono alla città di risparmiare circa 2,8 milioni di dollari all'anno. Oltre all'evidente vantaggio in termini di risparmio economico e riduzione delle emissioni di gas a

effetto serra, l'impianto di illuminazione pubblica dotato di sensori e controlli avanzati, consente di:

- trovare parcheggio più facilmente (attraverso l'analisi della frequenza con cui sono stati occupati i parcheggi);
- migliorare il flusso di traffico (attraverso la programmazione dei semafori in funzione della densità di traffico);
- garantire la sicurezza pubblica (posizionando i sensori dove vi è una maggiore frequenza di incidenti).

In Finlandia sono stati installati numerosi sistemi per il controllo adattivo dell'illuminazione stradale, con l'obiettivo di ottenere risparmi energetici e ridurre i costi di manutenzione, come ad esempio ad *Helsinki* nell'autostrada Ring III e nell'autostrada VT7. I dati relativi al volume di traffico, alla luminosità della superficie stradale e alle condizioni della superficie stradale vengono raccolti ed analizzati, al fine di consentire al sistema di gestione dell'illuminazione pubblica prendere decisioni sulla regolazione, confrontando i dati con i parametri predefiniti. In entrambi i casi, sono installate delle lampade al sodio e la gamma di regolazione è impostata dal 40% al 100% della potenza nominale. La struttura e i componenti dei sistemi di controllo dell'illuminazione stradale sulla Ring III e sulla VT7 sono essenzialmente gli stessi, ad eccezione della definizione dei parametri di controllo e del controllo separato degli apparecchi di illuminazione nelle due direzioni della VT7. I valori dei parametri di controllo sono definiti in base all'esperienza dei progettisti dell'illuminazione stradale. I valori di luminanza del manto stradale vengono raccolti dai misuratori di luminanza e dovrebbero essere utilizzati come feedback per regolare i livelli di regolazione. Lo scopo del monitoraggio delle condizioni del manto stradale è evitare di ridurre ulteriormente la luminanza del manto stradale in condizioni di bagnato. Per problemi tecnici però, il volume del traffico è l'unico parametro funzionante nei sistemi di controllo dell'illuminazione della Ring III e della VT7. Finora, sebbene i sistemi di illuminazione stradale intelligenti con controllo in tempo reale possano fornire livelli di luce adeguati in base a informazioni in tempo reale, i vantaggi sono compromessi dalla complessità dei sistemi, dalle prestazioni inaffidabili e dagli investimenti non sufficienti.

Un ulteriore esempio in ottica di *Smart Lighting* è rappresentato dal progetto *LIFE-Diademe* (risultato di approfondite ricerche condotte da Reverberi), applicato al quartiere EUR di *Roma*,

che ha sviluppato un sistema innovativo di regolazione dell'illuminazione stradale che adotta sensori ambientali a basso costo. Per rendere possibile la regolazione continua degli impianti *FAI* è stata sviluppata una rete di circa 1.000 appositi sofisticati sensori in grado di fornire una luce adattiva alle strade coinvolte in *LIFE-Diademe* e di consentire l'acquisizione di dati di monitoraggio ambientale. Il nuovo sistema di regolazione adattivo permetterà di ridurre il consumo energetico, l'inquinamento luminoso e le emissioni di CO₂ del 30% rispetto allo stato dell'arte dei sistemi di regolazione esistenti e comporterà anche un minor dispendio economico in termini di manutenzione dell'illuminazione stradale e contribuirà alla riduzione dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE). Durante la fase sperimentale del progetto, è stato condotto un test (della durata di 15 giorni) che ha visto l'attuazione dell'illuminazione adattiva in via dell'Aeronautica, con un risparmio energetico rispetto ai profili di dimmerazione pre-programmati pari al 33% e pari al 51% se confrontato con un sistema di illuminazione a luce piena.

CAPITOLO 3 - Normativa di riferimento

3.1 Premessa

L'impianto di illuminazione pubblica di una città ha la funzione di garantire la sicurezza dei pedoni, dei ciclisti, del traffico veicolare e dei cittadini (attraverso il controllo visivo dello spazio circostante durante le ore notturne), di incentivare l'utilizzo di spazi per le attività serali (parchi, piazze, punti di aggregazione, ecc.) e di valorizzare attraverso l'illuminazione artificiale le strutture architettoniche e ambientali (centri storici, piazze e strade di pregio, ecc.). L'obiettivo principale delle attuali politiche energetiche e ambientali nell'ambito dell'illuminazione pubblica è cercare di assicurare che questi servizi primari siano garantiti, minimizzando al contempo i consumi energetici, l'inquinamento luminoso e ottimizzando i costi di esercizio e di manutenzione di questi impianti.

I documenti di riferimento nel campo dell'illuminotecnica sono emessi da tre organismi:

- la *Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)* a livello internazionale;
- il *CEN* in Europa;
- l'*UNI* in Italia.

L'*ISO* è praticamente assente in questo settore, se non per alcune norme a carattere fondamentale che pubblica insieme alla *CIE*. In materia di illuminazione stradale, le normative essenziali, aggiornate nel corso del 2016, da rispettare sono:

1. la UNI 11248: Illuminazione stradale – *Selezione delle categorie illuminotecniche*;
2. la UNI EN 13201-2: Illuminazione stradale – Parte 2: *Requisiti prestazionali*;
3. la UNI EN 13201-3: Illuminazione stradale – Parte 3: *Calcolo delle prestazioni*;
4. la UNI EN 13201-4: Illuminazione stradale – Parte 4: *Metodi di misurazione delle prestazioni fotometriche*;
5. la UNI EN 13201-5: Illuminazione stradale – Parte 5: *Indicatori delle prestazioni energetiche*.

Nello specifico, la *UNI 11248:2016* propone una classificazione delle strade, definendo così un metodo per determinare la classe illuminotecnica in funzione di alcuni parametri specifici, come la complessità del campo visivo, la luminosità dell'ambiente, il tipo di sorgente utilizzata, il flusso di traffico. Sulla base di questa classificazione, la *UNI EN 13201-2:2016* definisce con precisione i requisiti prestazionali corrispondenti alle categorie illuminotecniche per l'illuminazione stradale, quali per esempio i valori minimi di luminanza, l'illuminamento, l'uniformità e il controllo dell'abbagliamento. Tali requisiti tengono conto delle esigenze visive di determinati utenti della strada (automobilisti, ciclisti, pedoni, ecc.) in certe tipologie di zone della strada e degli ambienti. Le *UNI EN 13201-3:2016* e *UNI EN 13201-4:2016* definiscono, rispettivamente, le modalità di calcolo specifiche per la progettazione degli impianti da installare e quelle di verifica e collaudo degli impianti stessi. La *UNI EN 13201-5:2016* definisce in che modo calcolare gli indicatori delle prestazioni energetiche per gli impianti di illuminazione stradale, ovvero l'indicatore di densità di potenza (PDI) e l'indicatore del consumo energetico annuale calcolato (AECI).

3.2 UNI 11248:2016

La norma *UNI 11248:2016* individua le prestazioni illuminotecniche degli impianti di illuminazione fissi e definisce una metodologia progettuale che garantisca il mantenimento della sicurezza degli utenti della strada e la presenza di buone condizioni di visibilità durante i periodi di oscurità. Il metodo individuato dalla *UNI 11248:2016* è basato su un procedimento sottrattivo che, a seguito dell'analisi dei rischi effettuata dal progettista dell'impianto, permette di individuare sia la categoria illuminotecnica di progetto sia quelle di esercizio. L'analisi dei rischi consiste nella valutazione dei parametri di influenza al fine di individuare la categoria illuminotecnica che garantisce la massima efficacia del contributo degli impianti di illuminazione alla sicurezza degli utenti della strada in condizioni notturne, minimizzando al contempo i consumi energetici, i costi di installazione e di gestione, l'impatto ambientale e l'inquinamento luminoso. Mediante questo processo, a partire dalla categoria illuminotecnica di progetto, le strade classificate possono essere declassate se i flussi di traffico orari sono inferiori a quelli previsti dalla norma per ciascun indice illuminotecnico. Attraverso la classificazione delle zone esterne destinate al traffico, la norma identifica gli aspetti che condizionano l'illuminamento stradale e fornisce le linee guida per ottenere un risparmio

energetico, una riduzione dell'impatto ambientale e dell'inquinamento luminoso. Secondo la norma, si possono evidenziare 6 differenti zone di studio:

1. strade a traffico veicolare;
2. strade di classe F (con limite di velocità ≤ 30 km/h);
3. piste ciclabili e strade ove gli utenti principali sono i pedoni;
4. zone di conflitto;
5. presenza di rallentatori di velocità;
6. presenza di attraversamenti pedonali.

Per ogni zona di studio il progettista deve selezionare una categoria illuminotecnica di ingresso, una di progetto e una o più categorie illuminotecniche di esercizio. La definizione della categoria illuminotecnica può essere fatta conoscendo:

- la classe della strada della zona di studio;
- la geometria della zona di studio;
- l'utilizzo della zona di studio;
- le condizioni e la tipologia del traffico della zona di studio;
- l'influenza dell'ambiente circostante.

Per definire la categoria illuminotecnica di ingresso, è necessario individuare le zone di studio della strada, che rappresentano delle aree in cui i parametri di influenza sono omogenei. Successivamente, per ogni zona di studio, si deve individuare il tipo di strada e, a seconda di quest'ultimo, determinare la categoria illuminotecnica di ingresso. La classificazione delle strade e la definizione delle categorie illuminotecniche di ingresso per l'analisi dei rischi sono mostrati nella *Tabella 3*.

Tipo di strada	Descrizione del tipo della strada	Limiti di velocità [km/h]	Categoria illuminotecnica di ingresso
A₁	Autostrade extraurbane	Da 130 a 150	M1
	Autostrade urbane	130	
A₂	Strade di servizio alle autostrade extraurbane	Da 70 a 90	M2
	Strade di servizio alle autostrade urbane	50	
B	Strade extraurbane principali	110	M2
	Strade di servizio alle strade extraurbane principali	Da 70 a 90	M3
C	Strade extraurbane secondarie (tipi C1 e C2)	Da 70 a 90	M2
	Strade extraurbane secondarie	50	M3
	Strade extraurbane secondarie con limiti particolari	Da 70 a 90	M2
D	Strade urbane di scorrimento	70	M2
		50	
E	Strade urbane di quartiere	50	M3
F	Strade locali extraurbane (tipi F1 e F2)	Da 70 a 90	M2
	Strade locali extraurbane	50	M4
		30	C4/P2
	Strade locali urbane	50	M4
	Strade locali urbane: centri storici, isole ambientali, zone 30	30	C3/P1
	Strade locali urbane: altre situazioni	30	C4/P2
	Strade locali urbane: aree pedonali, centri storici (utenti principali: pedoni, ammessi gli altri utenti)	5	C4/P2
	Strade locali interzonali	50	M3
30		C4/P2	
Fbis	Itinerari ciclo-pedonali	Non dichiarato	P2
	Strade a destinazione particolare	30	

Tabella 3 - Classificazione delle strade e individuazione della categoria illuminotecnica di ingresso per l'analisi dei rischi

Per la definizione della categoria illuminotecnica di progetto, si procede con l'analisi dei rischi: è necessario valutare i parametri di influenza costanti nel lungo periodo e gli aspetti legati al contenimento dei consumi energetici e dell'inquinamento luminoso. Nell'analisi dei rischi, il progettista deve indicare chiaramente i criteri e le fonti delle informazioni utilizzate. Tra i parametri di influenza costanti nel lungo periodo più comuni si possono citare:

- la complessità del campo visivo;
- l'assenza o la bassa densità di zone di conflitto;
- la segnaletica cospicua nelle zone conflittuali;
- la segnaletica stradale attiva;
- l'assenza di pericolo di aggressione.

Il valore della riduzione, associato ad ogni parametro di influenza costanti nel lungo periodo, è compreso tra 0 e 1. Nel caso di apparecchi di illuminazione che emettono luce con indice generale di resa dei colori R_a maggiore o uguale a 60 e rapporto $S/P^{1/2}$ maggiore o uguale a 1,10, il progettista può valutare tale situazione tra i parametri di influenza costanti nel lungo periodo, adottando un valore massimo di riduzione pari a 1. Inoltre, nel caso di traffico motorizzato, è possibile anche valutare il fattore di visibilità di oggetti (FVO) e la riduzione massima permessa associata a questo parametro di influenza è pari a 1. La somma del valore della riduzione di tutti i parametri di influenza costanti nel lungo periodo, ridotta al più grande intero minore o uguale alla somma stessa, rappresenta la riduzione per ottenere la categoria illuminotecnica di progetto, a partire da quella di ingresso.

Infine, per identificare una o più categorie di esercizio, si deve considerare la variabilità nel tempo dei parametri di influenza e specificare le condizioni che rendono corretto il funzionamento dell'impianto. I parametri di influenza variabili nel tempo in modo periodico o casuale più utilizzati sono:

- flusso orario di traffico inferiore al 50% della portata di servizio;
- flusso orario di traffico inferiore al 25% della portata di servizio;
- riduzione della complessità nella tipologia di traffico.

¹² Rappresenta il rapporto tra il flusso luminoso emesso da una sorgente misurato considerando il fattore spettrale di visibilità CIE per la visione scotopica e il flusso luminoso emesso dalla stessa sorgente misurato considerando il fattore spettrale di visibilità CIE per la visione fotopica.

La riduzione massima concessa è pari a 2 categorie illuminotecniche per un flusso orario di traffico inferiore al 25% della portata di servizio e 1 categoria illuminotecnica negli altri casi. La somma del valore della riduzione di tutti i parametri di influenza variabili nel tempo in maniera periodica o casuale, ridotta al più grande intero minore o uguale alla somma stessa, rappresenta la riduzione per ottenere la categoria illuminotecnica di esercizio, a partire da quella di progetto. Inoltre, per gli impianti adattivi denominati *FAI (Full Adaptive Installations)*, di cui si parlerà in maniera dettagliata più avanti, alle riduzioni precedenti si aggiunge una ulteriore riduzione della categoria illuminotecnica per flussi di traffico minori del 12,5% del flusso orario di traffico nominale.

La nuova versione della *UNI 11248* del 2016 individua e sviluppa due modalità di regolazione adattiva per gli impianti di illuminazione, i quali devono garantire che le condizioni di illuminazione indicate dalla categoria illuminotecnica di progetto siano verificate anche in condizioni di guasto del sistema di regolazione. Mediante l'adozione dei sistemi di regolazione adattivi è possibile controllare, in tempo reale, il flusso luminoso di ogni singolo punto luce in funzione delle reali esigenze in quell'istante, garantendo il mantenimento dei requisiti illuminotecnici e della sicurezza degli utenti delle strade e ottenendo un notevole risparmio sui consumi energetici.

La prima soluzione proposta dalla *UNI 11248:2016* è rappresentata dagli impianti *TAI (Traffic Adaptive Installations)*, nei quali la definizione della categoria illuminotecnica di esercizio è basata sul campionamento del solo flusso orario di traffico e considerando, ai fini della regolazione, il massimo valore campionato per ogni corsia. Il flusso orario di traffico va calcolato per tutto il periodo di accensione dell'impianto di illuminazione, adottando la seguente procedura:

- a) valutare il numero dei veicoli e/o dei pedoni e/o dei velocipedisti per un periodo di 10 minuti (definito periodo di conteggio);
- b) moltiplicare per sei il conteggio ottenuto allo step precedente.

Durante tutto il periodo di campionamento, è richiesto che venga mantenuto il flusso orario di traffico ammesso per la variazione della categoria illuminotecnica. Per ogni periodo di conteggio, è possibile intervenire modificando una sola categoria illuminotecnica per ottenere la categoria illuminotecnica di esercizio. Inoltre, la norma specifica che:

- se la variazione prevede una riduzione di una categoria illuminotecnica rispetto a quella di progetto, essa viene attivata solo se due campionamenti consecutivi prevedono una riduzione della categoria illuminotecnica;
- se la variazione prevede un incremento della categoria illuminotecnica rispetto a quella di progetto, essa viene attivata al primo campionamento che prevede un incremento della categoria illuminotecnica.

Se il controllo dell'illuminazione stradale dipende esclusivamente dai dati del flusso di traffico orario, si ottiene una regolazione a gradini, come mostrato in *Figura 13*.

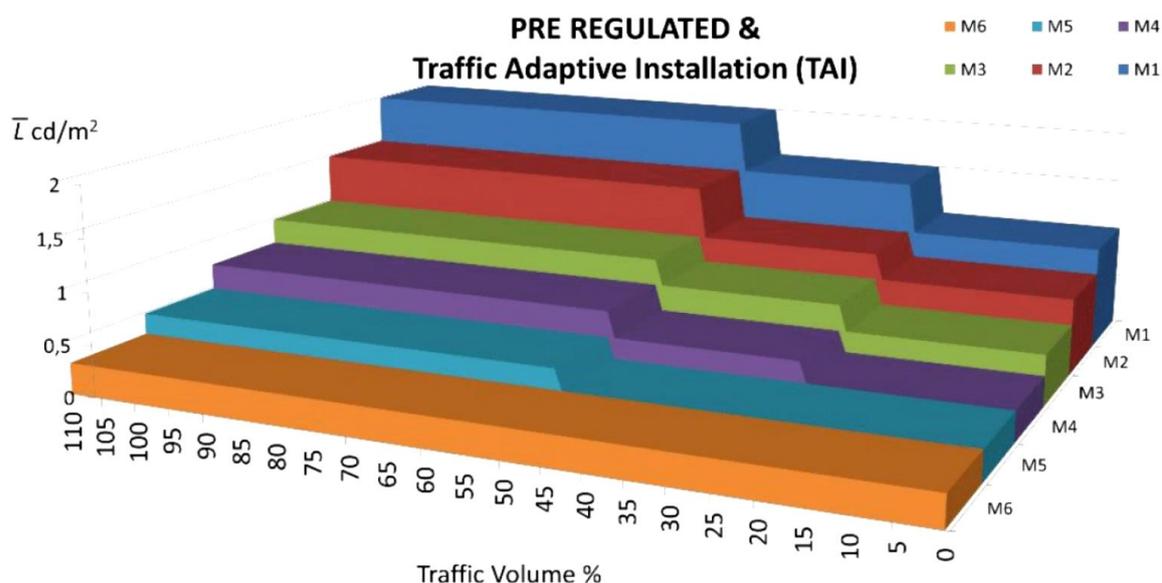


Figura 13 - Regolazione adattiva per gli impianti TAI (Fonte: *Outdoor Adaptive Lighting in the new UNI 11248 Italian Standard and Result of Experience, 2017*)

La seconda soluzione proposta dalla *UNI 11248:2016* è la regolazione degli impianti *FAI* (*Full Adaptive Installations*), la quale consente la gestione intelligente del flusso luminoso in funzione delle reali condizioni ambientali. La definizione della categoria illuminotecnica di esercizio avviene mediante il campionamento continuo del flusso di traffico, delle condizioni atmosferiche e della luminanza del manto stradale (per le categorie illuminotecniche M) o dell'illuminamento (per le categorie illuminotecniche C e P). A differenza della soluzione precedente, in questo caso il calcolo del flusso orario di traffico è più complesso, in quanto bisogna:

- a) calcolare il numero dei veicoli e/o dei pedoni e/o dei velocipedi per un minuto (periodo di campionamento);
- b) moltiplicare per 60 il valore ottenuto al punto precedente, allo scopo di ottenere il flusso orario di traffico;
- c) calcolare la media aritmetica per i primi 10 campioni;
- d) calcolare la media mobile, ripetendo i passaggi precedenti per ogni minuto, scartando il primo campione e aggiungendo l'ultimo campione, così da determinare il flusso di traffico medio sempre su 10 campioni.

La media mobile del flusso orario di traffico consente di valutare, in maniera continua, la riduzione del valore di luminanza media (o illuminamento medio), ottenuto mediante l'interpolazione lineare tra la categoria illuminotecnica di progetto (corrispondente ad un flusso orario di traffico pari al 100%) e l'ultima categoria di esercizio permessa secondo la valutazione dei rischi. Inoltre, nell'eventualità di flusso orario di traffico maggiore del 100% e per le categorie illuminotecniche M, la categoria illuminotecnica di esercizio si ottiene scendendo di una categoria rispetto a quella di progetto, in quanto si presuppone che la velocità dei veicoli in questi casi sia inferiore a quella massima consentita e la densità dei veicoli sia così alta da invalidare il concetto di luminanza media del manto stradale.

Nel caso di modalità di regolazione *FAI*, la norma consente di declassare la categoria illuminotecnica fino a tre livelli, rispetto a quella di progetto, per ottenere un maggior risparmio energetico, a condizione che il sistema monitori non solo il traffico, ma anche gli altri parametri essenziali (condizioni meteorologiche e luminanza/illuminamento del manto stradale) ai fini della gestione dell'impianto:

- se il flusso orario di traffico è inferiore al 50% del valore nominale, è consentita la riduzione di una categoria illuminotecnica;
- se il flusso orario di traffico è inferiore al 25% del valore nominale, è consentita la riduzione di due categorie illuminotecniche;
- se il flusso orario di traffico è inferiore al 12,5% del valore nominale, è prevista la riduzione di tre categorie illuminotecniche.

Se il flusso orario di traffico risulta inferiore a quello dell'ultima categoria illuminotecnica di esercizio prevista, è necessario mantenere l'ultima categoria illuminotecnica di esercizio

permessa. Nel caso in cui tre campionamenti consecutivi del flusso di traffico indichino un valore maggiore del 20% rispetto alla media mobile, il sistema deve portarsi immediatamente al valore di luminanza media (o illuminamento medio) che si ottiene interpolando in maniera lineare la categoria illuminotecnica di progetto (flusso di traffico pari al 100%) e l'ultima categoria illuminotecnica di esercizio individuata. Se il controllo dell'illuminazione stradale dipende dai dati del flusso di traffico, delle condizioni atmosferiche e della luminanza/illuminamento, si ottiene una regolazione lineare, come mostrato in *Figura 14*.

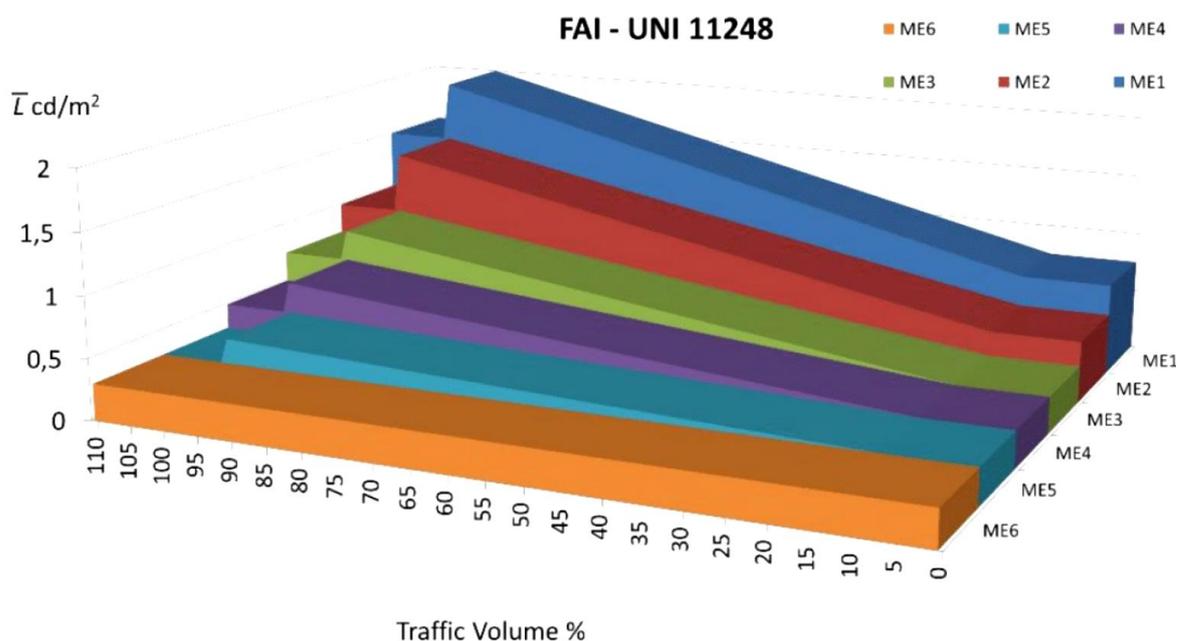


Figura 14 - Regolazione adattiva degli impianti *FAI* (Fonte: *Outdoor Adaptive Lighting in the new UNI 11248 Italian Standard and Result of Experience, 2017*)

Adottando la modalità di regolazione *FAI*, è possibile tenere in considerazione l'invecchiamento delle sorgenti e le reali condizioni delle superfici illuminate, ottenendo una regolazione continua del flusso luminoso emesso dagli apparecchi di illuminazione, così da garantire la corrispondenza tra il valore di luminanza campionata sul manto stradale (o illuminamento) e i valori previsti dal progetto. Le variazioni che il sistema di regolazione adattivo deve compensare sono essenzialmente dovute a:

- decadimento del flusso luminoso generato dalle sorgenti luminose, da sporco o da invecchiamento delle ottiche;
- variazione delle caratteristiche di riflessione del manto stradale;

- variazioni delle condizioni di alimentazione delle sorgenti (se pertinenti);
- variazioni dovute alle condizioni atmosferiche ambientali che incidono sul funzionamento dell'impianto di illuminazione.

3.3 UNI EN 13201-2:2016

La norma *UNI EN 13201-2:2016* delinea, per ogni categoria illuminotecnica, una serie di requisiti fotometrici prestazionali per un'illuminazione urbana adeguata a garantire le esigenze visive degli utenti della strada. La norma definisce:

- i requisiti per il traffico motorizzato;
- i requisiti per le zone di conflitto;
- i requisiti per i pedoni e i ciclisti;
- i requisiti aggiuntivi.

Per armonizzare più generalmente i requisiti, le classi di illuminazione sono state definite dagli stati membri sulla base di standard nazionali e dagli standard *CIE 115*, introducendo la possibilità di una variazione delle uniformità a seconda delle esigenze.

➤ Categorie M: Traffico motorizzato

Le categorie M riguardano i conducenti di veicoli motorizzati su vie di traffico e, in alcuni Paesi, anche su strade urbane che consentono velocità di marcia media o elevata. I principali criteri illuminotecnici fanno riferimento alla luminanza in condizioni di manto stradale asciutto della carreggiata e vengono forniti valori minimi di luminanza media della superficie stradale e dell'uniformità generale e longitudinale. Inoltre, si considera anche l'abbagliamento debilitante, definito mediante l'incremento di soglia, e l'illuminazione delle zone circostanti, calcolata attraverso il rapporto dell'illuminamento ai bordi.

Categoria	Luminanza del manto stradale della carreggiata in condizioni di manto stradale asciutto e bagnato				Abbagliamento debilitante	Illuminazione di contiguità
	Asciutto			Bagnato	Asciutto	Asciutto
	\bar{L} [minima mantenuta] cd/m ²	U_0 [minima]	U_1 [minima]	U_{ow} [minima]	f_{TI} [massima] %	R_{EI} [minima]
M1	2,00	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M2	1,50	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M3	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,30
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,30

Tabella 4 - Categorie illuminotecniche M

➤ Categorie C: Zone di conflitto

Le categorie C riguardano i conducenti di veicoli motorizzati (in relazione a zone di conflitto), che devono prevedere la presenza di altri utenti stradali (come pedoni o ciclisti) o devono muoversi in situazioni di traffico complesse, come intersezioni stradali, rotonde, zone di incolonnamento e così via, in cui le convenzioni per i calcoli della luminanza del manto stradale non valgono o risultano inapplicabili. I principali criteri illuminotecnici si basano sull'illuminamento orizzontale e sono espressi mediante l'uniformità media e generale della luminanza della superficie stradale. Anche se le classi stradali C, al contrario delle classi M, non hanno criteri obbligatori per minimizzare il riverbero, l'Appendice C della *UNI EN 13201-2:2016* fornisce criteri informativi anche per questa classe.

Categoria	Illuminamento orizzontale	
	\bar{E} [minimo mantenuto] lx	U_0 [minimo]
C0	50,00	0,40
C1	30,00	0,40
C2	20,00	0,40
C3	15,00	0,40
C4	10,00	0,40
C5	7,50	0,40

Tabella 5 - Categorie illuminotecniche C basate sull'illuminamento del manto stradale

➤ Categorie P e HS: Pedoni e ciclisti

Le categorie P o le categorie HS sono destinate a pedoni o ciclisti su passaggi pedonali, piste ciclabili, corsie di emergenza e altre zone della strada (come i parcheggi, i cortili scolastici, ecc.). I criteri per le classi stradali P includono un'illuminazione minima media dell'area stradale, e un'illuminazione minima costante dell'area stradale. Inoltre, per permettere il riconoscimento facciale, è necessario considerare criteri aggiuntivi per l'illuminamento del piano verticale (in un dato punto) e un illuminamento minimo semicilindrico (su un piano al di sopra dell'area stradale).

Categoria	Illuminamento orizzontale		Requisito aggiuntivo se è necessario il riconoscimento facciale	
	\bar{E} [minimo mantenuto] lx	E_{min} [mantenuto] lx	$E_{v,min}$ [mantenuto] lx	$E_{sc,min}$ [mantenuto] lx
P1	15,00	3,00	5,0	5,0
P2	10,00	2,00	3,0	2,0
P3	7,50	1,50	2,5	1,5
P4	5,00	1,00	1,5	1,0
P5	3,00	0,60	1,0	0,6
P6	2,00	0,40	0,6	0,2
P7	Prestazione non determinata	Prestazione non determinata		

Tabella 6 - Categorie illuminotecniche P

Per le categorie HS si considera l'illuminamento emisferico, espresso mediante l'illuminamento emisferico medio, e l'uniformità complessiva dell'illuminamento della superficie stradale.

Categoria	Illuminamento orizzontale	
	E_{hs} [minimo mantenuto] lx	U_0 [minimo]
HS1	5,00	0,15
HS2	2,50	0,15
HS3	1,00	0,15
HS4	Prestazione non determinata	Prestazione non determinata

Tabella 7 - Categorie illuminotecniche HS

➤ Categorie aggiuntive

Le classi stradali SC sono una classe aggiuntiva che viene utilizzata esclusivamente laddove il riconoscimento facciale e la sensazione di sicurezza risultino particolarmente importanti. Le categorie SC fanno riferimento all'illuminamento semicilindrico e ne forniscono un valore minimo.

Illuminamento semicilindrico	
Categoria	$E_{sc,min}$ [mantenuto] lx
SC1	10,0
SC2	7,50
SC3	5,00
SC4	3,00
SC5	2,00
SC6	1,50
SC7	1,00
SC8	0,75
SC9	0,50

Tabella 8 - Categorie illuminotecniche SC

Le categorie aggiuntive EV, invece, si utilizzano nel caso di superfici verticali che devono essere percepite molto chiaramente in zone della strada specifiche (ad esempio le zone di intersezione o le stazioni di pedaggio). Le categorie EV si basano sull'illuminamento piano verticale. Per queste categorie, i criteri illuminotecnici fanno riferimento al tipo di utente della strada.

Illuminamento del piano verticale	
Categoria	$E_{v,min}$ [mantenuto] lx
EV1	50,00
EV2	30,00
EV3	10,00
EV4	7,50
EV5	5,00
EV6	0,50

Tabella 9 - Categorie illuminotecniche EV

In aggiunta, l'*Appendice A* della *UNI EN 13201-2:2016* introduce sei diverse classi di intensità luminosa per la riduzione dell'abbagliamento debilitante e per il controllo della luce molesta nei casi in cui il parametro normale (incremento della soglia) non possa essere calcolato.

Categoria	Intensità luminosa massima in direzioni al di sotto della linea orizzontale in cd/klm del flusso di emissione dell'apparecchio di illuminazione			Altri requisiti
	a 70° e oltre	a 80° e oltre	a 90° e oltre	
G*1		200	50	Nessuno
G*2		150	30	Nessuno
G*3		100	20	Nessuno
G*4	500	100	10	Intensità luminose per angoli maggiori di 95° pari a zero
G*5	350	100	10	Intensità luminose per angoli maggiori di 95° pari a zero
G*6	350	100	0	Intensità luminose per angoli maggiori di 90° pari a zero

Tabella 10 - Categorie di intensità luminosa

Le classi G*1, G*2 e G*3 corrispondono ai concetti tradizionali di “semi-cut-off” e “cut-off”, mentre G*4, G*5, e G*6 corrispondono al “full cut-off”. Le classi per il discomfort glare sono specificate da D1 a D6 e sono mostrati nella tabella sottostante:

Categoria	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Indice di abbagliamento massimo	-	7000	5500	4000	2000	1000	500

Tabella 11 - Categorie dell'indice di abbagliamento

3.4 UNI EN 13201-3:2016

La norma *UNI EN 13201-3:2016* definisce le modalità di calcolo, ovvero le convenzioni e gli algoritmi, che devono essere adottati per valutare le prestazioni fotometriche degli impianti di illuminazione stradale, in conformità ai parametri descritti dalla *UNI EN 13201-2:2016*. Nella versione aggiornata al 2016 è stato definito l'algoritmo di calcolo, sono state eliminate alcune discrepanze nel calcolo dei *TI* e, infine, è stato introdotto il calcolo di R_{EI} ¹³ come parametro per caratterizzare l'illuminazione nelle zone limitrofe alla carreggiata (in sostituzione del "Sr"¹⁴). La norma specifica il numero di decimali da adottare nei risultati numerici: si arrotonda a due cifre decimali dopo la virgola per tutte le grandezze fotometriche, ad esclusione degli illuminamenti orizzontali fra 10 e 20 lx e maggiori di 20 lx.

Al fine di definire le prestazioni fotometriche degli impianti di illuminazione stradale, è necessario conoscere i parametri coinvolti nella descrizione del modello, la loro variabilità e la tolleranza consentita. I dati fotometrici sono dunque necessari per il calcolo delle caratteristiche di qualità dell'illuminamento e vengono calcolati mediante l'adozione delle tabelle di intensità (*I-table*), che indicano l'intensità luminosa emessa dagli apparecchi di illuminazione in tutte le direzioni rilevanti, e della tabella del coefficiente ridotto della luminanza (*r-table*), che esprime le proprietà della luce riflessa dalla superficie della strada.

In particolare, le quantità fotometriche da tenere in considerazione per valutare le caratteristiche di qualità dell'illuminazione stradale (luminanza media, uniformità generale, uniformità longitudinale, incremento di soglia) sono la luminanza e l'illuminamento. Il calcolo delle quantità fotometriche può essere effettuato attraverso l'adozione di formule matematiche equivalenti e prendendo in considerazione l'area rilevante definita dalla *UNI EN 13201-3:2016*. L'area rilevante rappresenta la regione compresa da due apparecchi di illuminazione posizionati sulla stessa linea ed è costituita da diversi punti di calcolo uniformemente distribuiti; nel caso in cui fossero installate più linee di apparecchi illuminanti e la spaziatura differisse tra le varie linee, la norma specifica di considerare l'area rilevante compresa tra gli apparecchi più distanti.

¹³ Edge illuminance Ratio o Rapporto di bordo

¹⁴ Surround Ratio o Rapporto di contiguità

In direzione longitudinale, la spaziatura e il numero dei punti di calcolo della luminanza o dell'illuminamento è influenzata dalle dimensioni della carreggiata e dall'interdistanza tra i due pali. La distanza tra i punti di calcolo in direzione longitudinale può essere calcolata con la seguente formula:

$$D = \frac{S}{N} \quad [m]$$

dove:

- D è la distanza tra i punti in direzione longitudinale, espressa in metri;
- S è l'interdistanza tra i due pali, espressa in metri;
- N è il numero di punti di calcolo in direzione longitudinale, con i seguenti valori:
 - se l'interdistanza è inferiore a 30 m, allora è necessario avere 10 punti di calcolo per ogni riga;
 - se l'interdistanza è maggiore di 30 m, allora il numero di punti di calcolo è identificato dal più piccolo numero intero che fornisca un valore $D \leq 3$ m.

In direzione trasversale, lo spazio tra i punti si calcola con la formula:

$$d = \frac{W_L}{3} \quad [m]$$

dove:

- d è la distanza tra i punti in direzione trasversale, espressa in metri;
- W_L è la larghezza della corsia, espressa in metri.

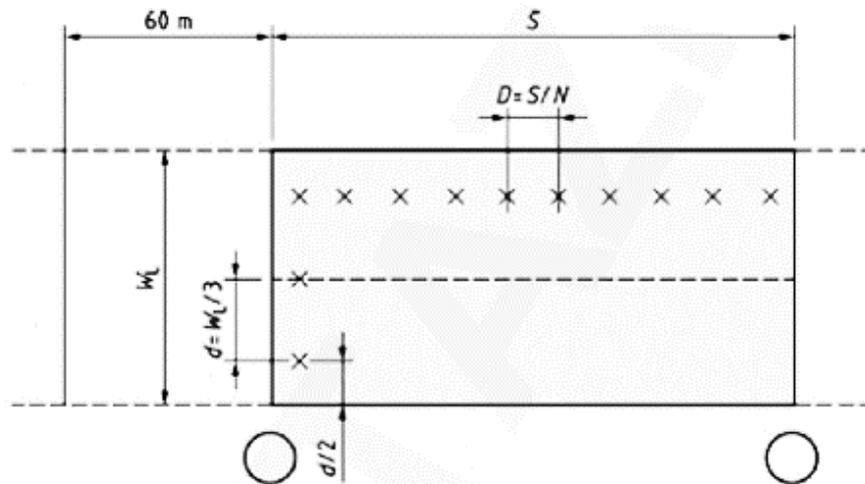


Figura 15 - Posizione dei punti di calcolo relativi ad una corsia

Per il calcolo della luminanza, la misura deve essere effettuata ad un'altezza di 1,5 metri sopra il livello della strada, ad una distanza di 60 metri dalla prima linea di delimitazione dell'area rilevante e al centro di ogni corsia. Il calcolo della luminanza media, dell'uniformità globale della luminanza e dell'incremento di soglia deve essere effettuato per l'intera carreggiata per ogni posizione dell'osservatore, mentre l'uniformità longitudinale della luminanza deve essere calcolata per ogni linea centrale della corsia.

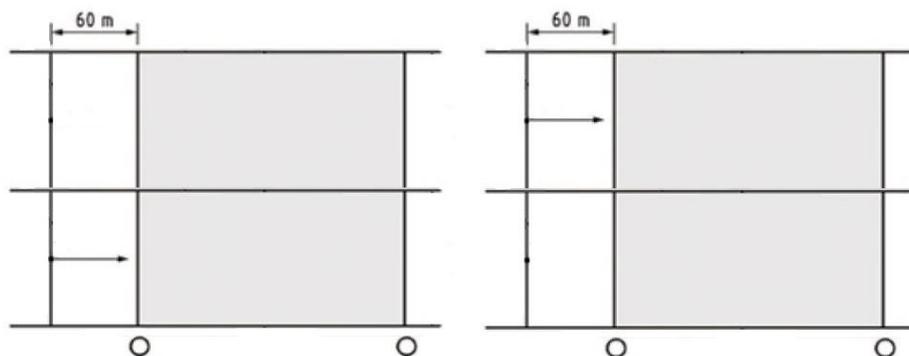


Figura 16 - Posizione dell'osservatore per il calcolo della luminanza

Per quanto concerne la valutazione dell'illuminamento, la norma *UNI EN 13201-3:2016* analizza e definisce la posizione dei punti di calcolo per quattro differenti tipologie di illuminamento, in funzione del criterio progettuale scelto secondo la *UNI EN 13201-2:2016*:

- 1) illuminamento orizzontale (i punti di calcolo devono essere posizionati in un piano a livello del suolo);

- 2) illuminamento emisferico (i punti di calcolo devono essere posizionati in un piano a livello del suolo);
- 3) illuminamento semi-cilindrico (i punti di calcolo dell'area rilevante devono essere posizionati in un piano ad un'altezza di 1,5 m sopra il livello del suolo);
- 4) illuminamento verticale (i punti di calcolo dell'area rilevante devono essere posizionati in un piano ad un'altezza di 1,5 m sopra il livello del suolo).

L'area rilevante per la valutazione dell'illuminamento viene definita in maniera analoga a quella per il calcolo della luminanza. Per quanto concerne i punti di calcolo però, mentre in direzione longitudinale non si riscontra alcuna differenza rispetto alla definizione avanzata per il calcolo della luminanza, in direzione trasversale si segue la formula:

$$d = \frac{W_t}{n} \quad [m]$$

dove:

- d è la distanza tra i punti in direzione trasversale, espressa in metri;
- W_t è la larghezza della carreggiata o dell'area rilevante, espressa in metri;
- n è il numero di punti in direzione trasversale con un valore maggiore o uguale a 3 ed è il più piccolo numero intero per cui si abbia $d \leq 1,5$ m.

Dopo aver delimitato l'area rilevante, determinato i punti di calcolo ed effettuato le misure secondo quanto riportato dalla *UNI EN 13201-3:2016*, è possibile procedere con il calcolo delle caratteristiche di qualità legate alla luminanza o all'illuminamento, tenendo in considerazione il numero di cifre decimali definite secondo la *UNI EN 13201-2:2016*:

- la luminanza media è definita come la media aritmetica del valore di luminanza calcolato in ogni punto della griglia di calcolo;
- l'uniformità generale è data dal rapporto tra il valore più basso di luminanza, per ogni punto di calcolo, e la luminanza media;
- l'uniformità longitudinale è calcolata come il rapporto tra il valore più basso della luminanza nella direzione longitudinale e quello più alto;
- l'incremento di soglia viene calcolato mediante le formule equivalenti e il processo di calcolo forniti dalla norma;

- il rapporto di illuminamento dei bordi (R_{EI}) è dato dal minimo valore dato dal rapporto tra l'illuminamento orizzontale medio lungo la linea longitudinale adiacente al bordo ed esterno alla carreggiata e l'illuminamento orizzontale medio corrispondente alla linea longitudinale compresa nella carreggiata.

La norma *UNI EN 13201-3:2016* specifica che i valori operativi della luminanza media, dell'uniformità generale della luminanza e dell'uniformità longitudinale della luminanza devono essere quelli più bassi calcolati per ogni posizione dell'osservatore, mentre il valore operativo dell'incremento di soglia deve essere quello massimo calcolato.

3.5 UNI EN 13201-4:2016

La norma *UNI EN 13201-4:2016* specifica le condizioni di misura e le procedure per la valutazione dei parametri relativi alla qualità fotometrica del sistema di illuminazione. Per esempio, viene definita l'equazione per il calcolo dell'illuminamento emisferico e la procedura per la misura dell'incremento di soglia. Inoltre, la norma definisce i requisiti specifici della misurazione in accordo allo scopo di quest'ultima e dell'accuratezza desiderata, stabilisce le convenzioni per la valutazione dell'incertezza di misura e fornisce informazioni sull'analisi della tolleranza nel progetto di illuminazione. Verificare il rispetto dei requisiti standard di progetto, monitorare il sistema di illuminazione e analizzare le discrepanze tra le condizioni di illuminazione reali e quelle di progetto sono solo alcuni degli obiettivi che si possono raggiungere seguendo le indicazioni proposte in questa norma.

In funzione dello scopo delle misurazioni del sistema di illuminazione stradale, è possibile differenziare quattro situazioni:

- misurazioni nella fase finale della prova, atte a verificare il rispetto dei requisiti normativi e/o delle aspettative di progetto;
- misurazioni durante la vita utile del sistema di illuminazione stradale, necessarie per quantificare la degradazione delle prestazioni del sistema di illuminazione stradale e indicare se vi sia o meno la necessità di effettuare la manutenzione degli apparecchi;
- misurazioni per l'illuminazione stradale adattiva, con lo scopo di monitorare il flusso luminoso degli apparecchi illuminanti per l'illuminazione stradale adattiva;

- misurazioni per la conoscenza delle discrepanze, per verificare la variazione rispetto ai requisiti normativi e/o alle aspettative di progetto oppure valutare l'influenza dell'ambiente circostante.

A seconda dello scopo, le procedure, i requisiti e le caratteristiche del sistema di misura da considerare sono differenti. In ogni caso, le misurazioni, solitamente, vengono fatte quando le condizioni di illuminazione sono stazionarie, per cui è necessario effettuare le misure dopo un certo periodo di utilizzo del sistema di illuminazione stradale (nel caso di impianti nuovi) oppure dopo un certo periodo dopo l'accensione.

Per quanto concerne le modalità di misura, la norma *UNI EN 13201-4:2016* individua due sistemi: uno statico e uno dinamico. Ciascuno di questi sistemi può essere scelto in funzione dell'accuratezza richiesta nei risultati, di eventuali vincoli legati a questioni di sicurezza o di condizioni locali e/o temporanee. Per esempio, il sistema di misura dinamico può misurare la lunghezza totale di una installazione per l'illuminazione stradale in un tempo minore rispetto alla misura con il sistema statico. Il valore massimo di incertezza accettabile viene scelto considerando i requisiti nazionali o l'influenza di questa incertezza nelle azioni decisionali.

Gli strumenti adottati per la misura dei parametri fotometrici devono avere caratteristiche in accordo alla *UNI EN 13032-1*¹⁵ per tutti i parametri rilevanti. In particolare, la luminanza viene misurata mediante un misuratore di luminanza (luminanzometro), mentre l'illuminamento viene misurato mediante un misuratore di illuminamento (luxmetro).

¹⁵ *UNI EN 13032-1:2012* Luce e illuminazione - Misurazione e presentazione dei dati fotometrici di lampade e apparecchi di illuminazione - Parte 1: Misurazione e formato di file



Figura 17 - Esempi di luminanzometro e luxmetro (Fonte: *KONICA MINOLTA*)

Se è richiesto, la calibrazione e le caratteristiche fotometriche del rilevatore devono tenere in considerazione la temperatura dell'aria, le condizioni di umidità relativa dell'aria durante la misura e l'emissione spettrale degli apparecchi di illuminazione nella regione del visibile. Per ogni tipo di luminanzometro, è necessario considerare l'influenza della luce proveniente dalle sorgenti esterne ed è raccomandato che l'angolo sotteso dalla superficie stradale misurata non sia maggiore di 2 minuti di arco sul piano verticale e di 20 minuti di arco sul piano orizzontale, mentre il valore minimo non deve essere inferiore a 1 minuto di arco. Inoltre, se la misura viene fatta ad una distanza minore rispetto alla posizione dell'osservatore definita dalla norma *UNI EN 13201-3:2016*, il cono del misuratore della luminanza non dovrebbe essere maggiore di 30 minuti di arco e l'area della misura non dovrebbe essere maggiore di 0,5 m nella direzione trasversale e 2,5 m in quella longitudinale.

Inoltre, bisogna tenere in considerazione l'incertezza della misura, la quale può dipendere:

- dall'accuratezza degli strumenti di misura;
- dall'accuratezza delle coordinate di riferimento dell'area di misura (se rilevante);
- dall'influenza della procedura di misurazione;
- dall'influenza dei metodi di elaborazione dei dati;
- dalle caratteristiche del sistema di illuminazione e dalla stabilità dei parametri fotometrici durante le misurazioni;
- dalle condizioni di alimentazione elettrica (non valutate);
- dalle condizioni meteorologiche (non valutate);
- dalle condizioni ambientali (non valutate).

In generale, si possono evidenziare tre macro-gruppi di componenti che caratterizzano l'incertezza della misura:

- quelli che riguardano le caratteristiche del sistema di misurazione e l'influenza delle procedure di misura;
- quelli che riguardano l'influenza delle caratteristiche nominali e il layout del sistema di illuminazione stradale misurato;
- quelli che riguardano l'influenza delle caratteristiche istantanee del sistema di illuminazione stradale misurato e delle condizioni ambientali e meteorologiche.

Le misurazioni devono comprendere l'intera lunghezza della strada servita dal sistema di illuminazione e tutte le sue condizioni; se, però, le caratteristiche del sistema di illuminazione sono costanti per tutta la lunghezza dell'installazione, si può selezionare un numero di zone rilevanti in cui effettuare le misurazioni. Queste ultime devono essere fatte quando le condizioni di illuminazione sono stazionarie (è necessario aspettare un certo periodo di tempo dopo l'accensione) e le condizioni climatiche non devono influenzare significativamente le misurazioni. I fattori che potrebbero influenzare l'accuratezza degli strumenti di misura della luce sono:

1. la temperatura dell'aria, in quanto potrebbe influenzare la calibrazione degli strumenti e l'accuratezza della misura;
2. la condensa sulla superficie di trasmissione della luce o sugli strumenti di misura;
3. la velocità del vento, che potrebbe causare l'oscillazione e la vibrazione degli strumenti o dei pali.

Per tenere in considerazione l'influenza delle condizioni atmosferiche sulle prestazioni degli strumenti di misura si utilizzano dei fattori di correzione. Inoltre, per i sistemi dinamici, è necessario specificare la velocità media dei veicoli durante la fase di misura e, per la valutazione dell'incertezza, tenere in considerazione i fattori di correzione eventualmente introdotti.

Per il calcolo della luminanza (e dell'illuminamento), la posizione dei punti di calcolo e dell'osservatore deve essere conforme a quanto descritto dalla *UNI EN 13201-3:2016* e l'influenza dell'accuratezza di questi parametri deve essere considerata nel calcolo dell'incertezza della misura. Nel caso della luminanza, la misura può essere fatta ad una

distanza e ad un'altezza minore del punto di osservazione rispetto a quanto prescritto dalla norma, purché l'angolo di vista del videofotometro sia pari a $(89 \pm 0,5)^\circ$ rispetto alla normale alla superficie stradale. Inoltre, i punti di calcolo che cadono all'interno della segnaletica stradale orizzontale (linee di delimitazione o attraversamento pedonale), così come quelli che cadono all'interno dell'ombra generata da un oggetto, non vanno considerati per il calcolo della luminanza media (o dell'illuminamento medio) e dell'uniformità della luminanza, ma devono essere riportati nel documento finale.

A seguito della fase di misura, è necessario redigere un report, nel quale devono essere riportati i seguenti aspetti:

4. gli obiettivi della misura;
5. tutte le informazioni raccolte durante le misurazioni;
6. i dettagli degli strumenti utilizzati, il loro numero e le loro condizioni di calibrazione;
7. i dettagli riguardo le condizioni meteorologiche, ambientali e di alimentazione elettrica;
8. un riferimento o una descrizione della procedura adottata per le misurazioni e per l'elaborazione dei dati, compresa la valutazione dell'incertezza della misura;
9. i risultati delle misurazioni, insieme alla loro incertezza;
10. se la misura non viene fatta per l'intera lunghezza dell'installazione, spiegare le ragioni e le conseguenze della scelta delle zone rilevanti;
11. le azioni adottate per prevenire o tenere in considerazione la porzione di luce diretta e riflessa proveniente dall'ambiente circostante.

3.6 UNI EN 13201-5:2016

La norma *UNI EN 13201-5:2016* definisce le modalità di calcolo degli indicatori delle prestazioni energetiche per gli impianti di illuminazione stradale. I parametri principali sono:

- l'indicatore di densità di potenza (*PDI*), D_P
- l'indicatore di consumo energetico annuale (*AECD*), D_E
- l'efficienza dell'impianto di illuminazione, η_{inst}

L'indicatore di densità di potenza, misurato in $W/(lx\ m^2)$, indica l'energia necessaria per un impianto di illuminazione pubblica, nel rispetto dei requisiti di illuminazione pertinenti specificati nella *UNI EN 13201-2:2016*. L'equazione per calcolare il *PDI* è:

$$D_P = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i \cdot A_i)} \quad \left[\frac{W}{lx\ m^2} \right]$$

dove:

- P è la potenza totale del sistema di illuminazione, la quale include sia la potenza operativa di tutti i punti individuali di illuminazione (fonti luminose e qualsiasi apparecchio associato), sia quella di apparecchi che non fanno parte dei punti individuali di illuminazione ma che sono necessari per il loro funzionamento (come sistemi di controllo centralizzati e interruttori);
- E_i è l'illuminamento medio orizzontale mantenuto, misurato in lx , di ogni sotto-area. L'illuminamento può essere derivato da fattori che sono già stati stabiliti per selezionare la classe di illuminazione della strada;
- A_i è la dimensione della sotto-area illuminata dall'installazione luminosa ed è misurata in m^2 ;
- n è il numero delle sotto-aree da illuminare.

Per le classi di illuminazione stradale che non usano un illuminamento medio orizzontale costante (come classi di illuminazione stradale diverse da M), la *UNI EN 13201-5:2016* fornisce specifiche linee guida per la conversione.

Dato che le classi di illuminazione solitamente cambiano a seconda delle diverse stagioni, il *DPI* dovrebbe essere calcolato separatamente per ogni classe principale. Per comparare le differenze di consumo energetico tra due diversi assetti, non solo per una particolare classe di illuminazione stradale ma in un intero anno di funzionamento, è necessario calcolare l'*AECl*. A questo scopo è necessario differenziare l'anno in periodi di funzionamento in cui si applicano diversi valori per P . L'indice di consumo energetico annuale, misurato in Wh/m^2 , indica il consumo di energia durante l'anno. L'equazione per calcolare l'*AECl* è:

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j \cdot t_j)}{A} \quad \left[\frac{Wh}{m^2} \right]$$

dove:

- P_j è la potenza totale del sistema di illuminazione, in W , associata al periodo j-esimo di funzionamento;
- t_j è la durata del periodo j-esimo di funzionamento, misurato in h , quando la potenza P_j si è consumata;
- A è la dimensione dell'area illuminata dall'installazione luminosa ed è misurata in m^2 ;
- m è il numero di periodi con diversi valori operativi di potenza P_j .

Questi due parametri vengono applicati a tutte le aree di traffico che rientrano nelle categorie M , P e C definite dalla *UNI EN 13201-2:2016* e devono essere utilizzati contemporaneamente. Sono utili per quantificare il potenziale risparmio che si potrebbe ottenere incrementando le prestazioni dell'impianto e riducendo l'impatto ambientale.

L'efficienza dell'impianto di illuminazione permette di comparare differenti soluzioni di illuminazione stradale e tecnologie per lo stesso progetto illuminotecnico. Allo scopo di massimizzare il risparmio energetico è necessario scegliere in maniera corretta la classe di illuminazione durante la fase di progetto, soddisfare i criteri specificati nella *UNI EN 13201-2:2016* durante la fase di progetto, riducendo il sovradimensionamento e scegliendo accuratamente gli apparecchi di illuminazione e le sorgenti di luce, spaziando in maniera opportuna i punti di illuminazione.

CAPITOLO 4 - Caso studio: Comune di Savigliano

4.1 Premessa

A causa degli elevati costi di gestione dell'illuminazione pubblica, molte città italiane, negli ultimi anni, hanno intrapreso la strada dell'efficienza energetica, riqualificando (totalmente o in parte) gli impianti di illuminazione stradale del territorio. Gli interventi realizzati riguardano principalmente l'installazione di corpi illuminanti ad alta efficienza in impianti di illuminazione esistenti e l'adozione di sistemi di telecontrollo del flusso luminoso. In un'ottica "smart", anche il Comune di Savigliano (in provincia di Cuneo) nel 2011 ha intrapreso un percorso di riqualificazione dei propri impianti di illuminazione, al fine di ottenere benefici in termini di risparmio energetico e di sicurezza per i residenti. Il rinnovamento degli impianti è stato affidato all'azienda di illuminazione *Schröder*, la quale è stata incaricata di sostituire i vecchi apparecchi di illuminazione obsoleti con nuovi apparecchi a tecnologia LED, integrati con un modulo di telecontrollo. In particolare:

- nelle strade principali e secondarie sono state adottate armature *Ampera*;
- per i parchi e le zone pedonali sono stati utilizzati gli apparecchi *Isla LED*;
- nel centro storico sono presenti le lanterne modello *Valentino LED*;
- la zona industriale è stata dotata di apparecchi *Axia*;
- solo in alcune zone specifiche sono stati impiegati gli apparecchi *Teceo*.

Attraverso un processo di ammodernamento tecnologico e funzionale, ogni punto luce del Comune di Savigliano può essere telecontrollato per monitorare costantemente il funzionamento e per adeguare il flusso luminoso ai requisiti normativi, in funzione delle condizioni del traffico e degli orari. Inoltre, grazie all'uniformità della luce sulle strade, è possibile migliorare l'individuazione dei percorsi e la percezione degli ostacoli, garantendo una maggiore sicurezza. La maggior parte dei punti luce presenti nel comune sono gestiti dal sistema *Owlet Nightshift* e solo una minor parte è coordinata dal sistema *Owlet IoT*. I due sistemi si differenziano per la presenza del concentratore di segmento (la cui funzione verrà indicata nei paragrafi seguenti) e per il sistema di auto-attivazione e registrazione della posizione geografica di ogni apparecchio di illuminazione.

Al fine di massimizzare la riduzione dei consumi e dell'inquinamento luminoso, di migliorare la viabilità e la sicurezza sulle strade, ma anche di valorizzare la città dal punto di vista estetico e urbanistico, anche Savigliano si sta muovendo verso la progettazione e la realizzazione di una nuova infrastruttura intelligente per l'illuminazione pubblica. Nel 2018, la società certificata Esco *Ardea Energia* (società del gruppo Egea) in partenariato con *Eurix*¹⁶ ed *Environment Park*¹⁷, ha presentato con successo il progetto sperimentale *ELF*¹⁸, finalizzato all'implementazione di un sistema di telecontrollo di recente sviluppo (ma non ancora immesso sul mercato) dei corpi illuminanti secondo la norma *UNI 11248:2016*. Nello specifico, il Comune di Savigliano ha messo a disposizione la propria infrastruttura di corpi illuminanti a LED per testare l'applicazione in campo delle tecniche di regolazione adattiva *FAI*.

Una delle difficoltà principali dell'applicazione della regolazione adattiva consiste nello sforzo di ridurre il consumo energetico, garantendo allo stesso tempo che i costi di controllo e manutenzione non superino i costi di installazione. Gli obiettivi del progetto *ELF* sono:

1. combinare l'utilizzo dei sensori a basso costo con il sistema di telegestione per ottimizzare il consumo energetico ed aumentare l'affidabilità degli impianti di illuminazione;
2. verificare l'applicabilità dell'illuminazione adattiva di tipo *FAI* in situazioni reali urbane;
3. testare l'efficacia della strumentazione e delle procedure per la misura della luminanza del manto stradale attraverso una valutazione indiretta (con posizione dell'osservatore e aree di misura diverse da quelle definite dalla normativa *UNI EN 13201-3:2016*);
4. ricavare il fattore correttivo *k* da implementare nell'algoritmo di applicazione della *FAI* per riportare il valore di luminanza letto dal sensore al valore definito secondo la *UNI EN 13201-3:2016*, direttamente confrontabile con i requisiti normativi.

¹⁶ *EURIX* è un'azienda ICT orientata alla progettazione e alla realizzazione di soluzioni software basate su tecnologie innovative.

¹⁷ *Environment Park* è una Spa ad azionariato pubblico che si occupa dei temi del risparmio energetico, dello smaltimento dei rifiuti, delle energie pulite e offre consulenza tecnica e soluzioni di mercato sui settori Green Building (edilizia sostenibile), Plasma Nano-Tech (nanotecnologie al plasma), Green Chemistry (trattamento biomasse), Advanced Energy (produzione e stoccaggio di energia) e Clean Tech (trasferimento tecnologico).

¹⁸ *ELF* è l'acronimo per "Improving Efficiency of street Lighting through Intelligent Dimming and Radio-Frequency data connection".

L'adozione di questo sistema su una rete capillare di corpi illuminanti permette l'introduzione di ulteriori servizi quali il monitoraggio ambientale (inquinamento, allagamento, ecc.) e servizi di pubblica sicurezza (quali identificazione di incidenti stradali, degrado della segnaletica orizzontale, identificazione delle condizioni di traffico o di pericolo, ecc.). Al fine di gestire in maniera "intelligente" il flusso luminoso, ovvero regolarlo in funzione delle reali condizioni circostanti, sono stati disposti dei sensori per l'acquisizione in tempo reale dei dati relativi al flusso di traffico, alla luminanza del manto stradale (in quanto le categorie illuminotecniche trattate appartengono alle classi M) e alle condizioni atmosferiche. I dispositivi di acquisizione dei dati adottati sono:

- la sonda per l'acquisizione dei valori di luminanza media (della casa *Delta Ohm* modello *HD 2021T6*);
- il contatore del numero di veicoli (dell'azienda *AXIS* modello *P1447-LE*);
- il sensore per la valutazione delle condizioni ambientali (umidità relativa dell'aria, temperatura dell'aria, presenza di pioggia).

La sonda di luminanza *HS 2021T6* dell'azienda *DELTA OHM* è stata scelta in quanto rappresentava un giusto compromesso tra il costo di acquisto e l'adozione di un sistema già calibrato per la misura della grandezza fotometrica (luminanza), caratterizzato da un'incertezza di misura accettabile (pari al 5%). Questa sonda misura la luminanza in un angolo di 20° e permette di rilevare un valore compreso tra 0 cd/m² e 64 cd/m² (il range di misura è stato richiesto specificatamente per questo caso studio per avere maggiore sensibilità ai valori bassi di luminanza); inoltre, il dispositivo consente di convertire la luminanza in un segnale di tensione (da 0 a 10 V).



Figura 18 - Sonda di luminanza della ditta Delta Ohm modello HD 2021T6

La scelta della videocamera per il conteggio dei veicoli è ricaduta sul modello *P1447-LE* della ditta *AXIS* per l'elevata affidabilità dello strumento e la compatibilità con il software di analisi dei dati *Citilog SmartCam-td*.



Figura 19 - Videocamera per il conteggio dei veicoli ditta *AXIS* modello *P1447-LE*



Figura 20 - Area individuata dal software *Citilog SmartCam-td* per il conteggio dei veicoli

Le strade esaminate e sulle quali sono stati installati i sensori sono la SP 20 (nello specifico, il tratto considerato è denominato Corso Romita) e Via Torre de Cavalli. Torre de Cavalli rappresenta una zona industriale poco trafficata durante il periodo di accensione dell'impianto di illuminazione ed è stata la scelta iniziale per l'applicazione della *FAI* perché di minor complessità e di minor rischio durante le prime sperimentazioni in campo, rispetto ad una strada più interna al centro urbano.

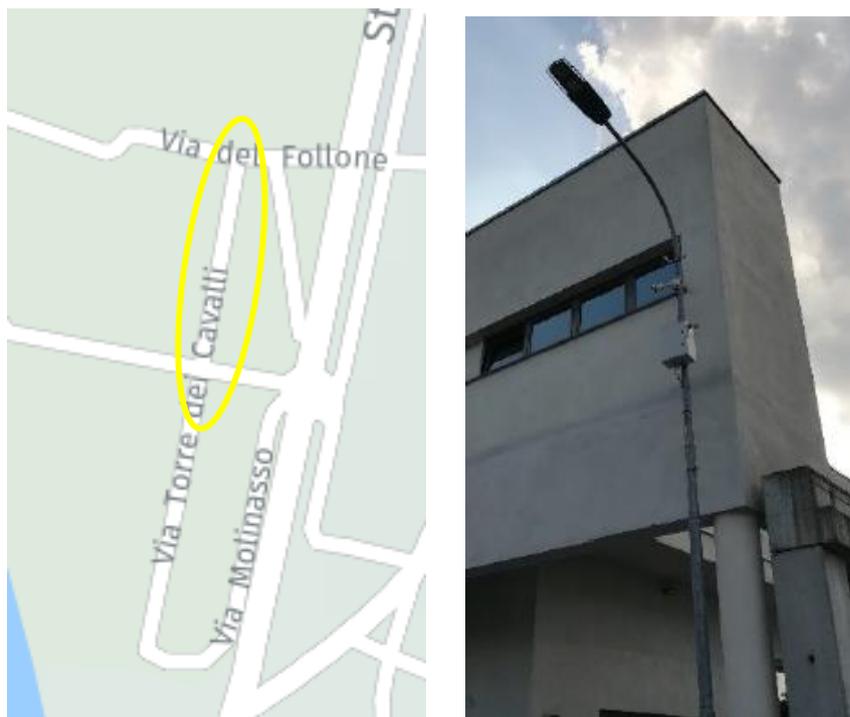


Figura 21 - Installazione sensori Torre de Cavalli

La SP 20 è stata aggiunta successivamente per verificare la possibilità di applicazione della *FAI* in una zona a maggior traffico veicolare e più complessa per condizioni d'uso e di illuminazione.

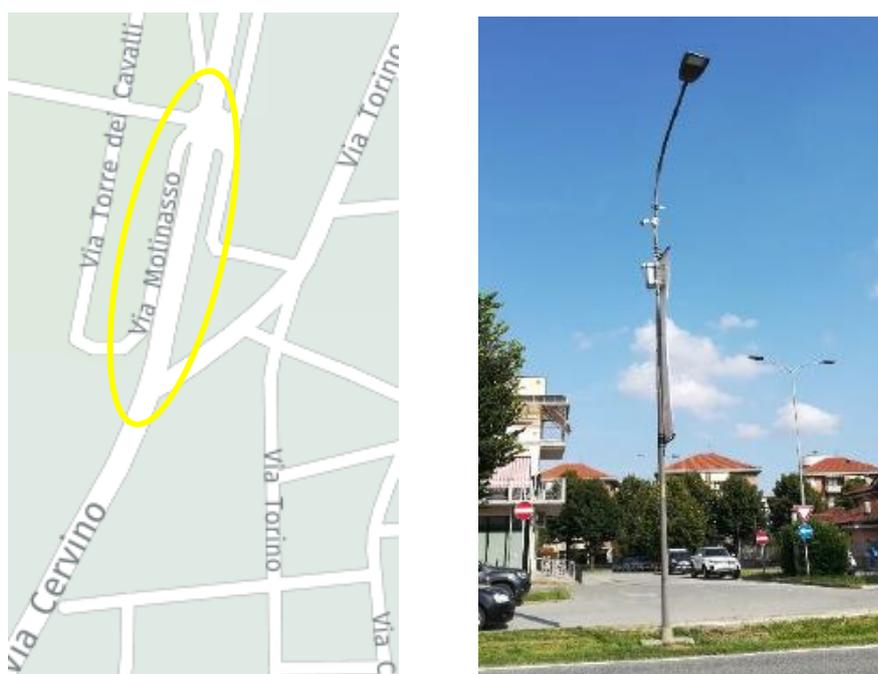


Figura 22 - Installazione sensori Corso Romita

Tenuto conto che entrambe le tipologie di strade sono caratterizzate da traffico motorizzato (categorie illuminotecniche M), il sistema di raccolta dati attualmente in funzione effettua diverse misurazioni ogni 60 secondi (i dati vengono acquisiti circa ogni 2 secondi), ma restituisce, per ogni minuto, i valori relativi ai seguenti parametri:

1. corsia sulla quale sono state effettuate le misure;
2. data e ora della misura ;
3. numero di veicoli per ogni corsia;
4. valore medio della luminanza, mediata sul minuto;
5. condizione di asfalto asciutto o bagnato;
6. temperatura dell'aria;
7. umidità relativa dell'aria.

L'acquisizione e l'analisi di questi parametri sono necessari per l'applicazione della regolazione adattiva, in quanto, come più volte detto, nel caso di *TAI* la definizione della categoria illuminotecnica di esercizio è basata sul campionamento del solo flusso orario di traffico, mentre per la *FAI* la definizione della categoria illuminotecnica di esercizio avviene mediante il campionamento continuo del flusso di traffico, delle condizioni atmosferiche e della luminanza del manto stradale (per le categorie illuminotecniche M). Per entrambe le modalità di regolazione, il conteggio dei veicoli deve essere elaborato per ottenere un flusso orario veicolare, basato sul valore massimo dei veicoli campionati per ogni corsia.

4.2 Sistema di telecontrollo dell'illuminazione pubblica di Savigliano

Il tratto della SP 20 è coordinato dal sistema di gestione remota *Owlet Nightshift*, il quale consente il monitoraggio, il controllo e la gestione in tempo reale della rete di illuminazione. Mediante questo sistema, è possibile controllare ogni punto luce in maniera individuale in qualsiasi momento, in quanto la gestione avviene tramite Internet con un semplice browser web. Inoltre, ogni dispositivo è caratterizzato da una posizione geografica, grazie al sistema di localizzazione GPS, e la comunicazione bidirezionale permette di verificare lo stato operativo del sistema, il consumo energetico e i possibili guasti.

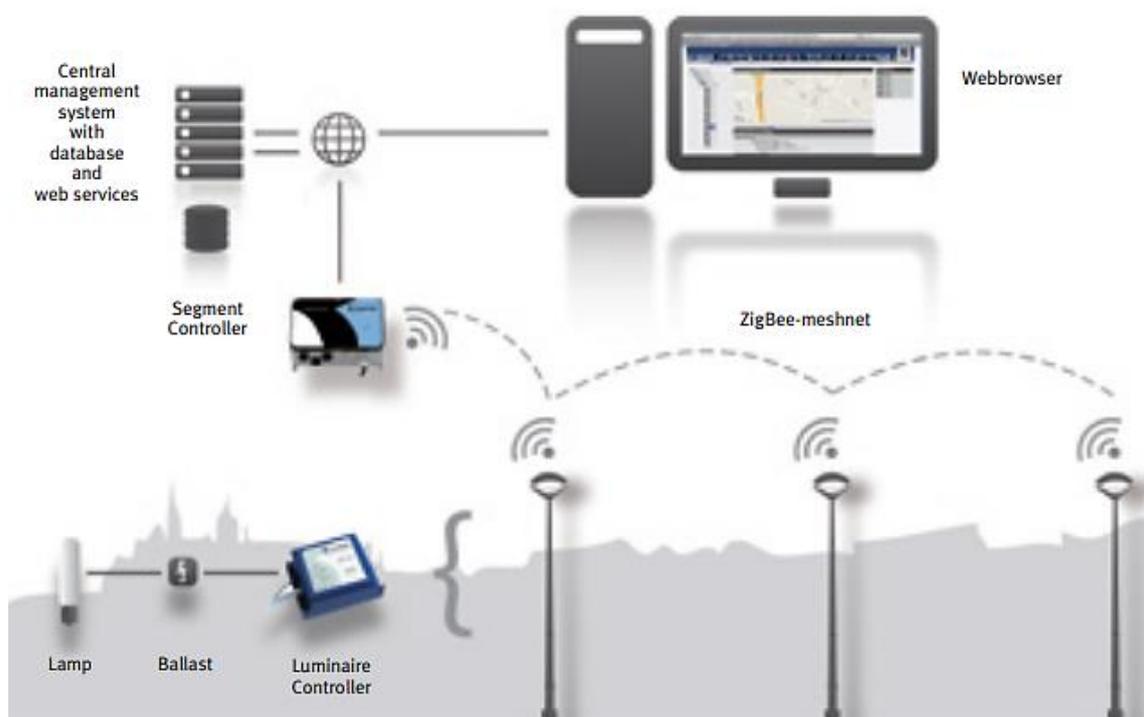


Figura 23 - Rete interoperabile *Owlet Nightshift* (Fonte: *Schröder*)

Grazie alla sua tecnologia open source Zigbee, il sistema *Nightshift* può essere sfruttato per integrare numerose funzionalità che vanno ben oltre l'illuminazione. Ogni apparecchio di illuminazione servito da questo sistema è provvisto di un controllore “*LuCo*”, in grado di monitorare i parametri caratteristici di funzionamento. Ogni controllore è in grado di comunicare attraverso la linea ZigBee ed è provvisto di un localizzatore GPS. Il *LuCo* è dotato di una funzionalità di sicurezza che, in caso di guasti, riporta il funzionamento ad una programmazione predefinita (basata sul ciclo astronomico di alba/tramonto), così da assicurare che l'impianto di illuminazione non si spenga e continui a garantire un flusso luminoso in qualsiasi condizione. Inoltre, è dotato di un algoritmo che compensa automaticamente il decadimento della luminosità dell'apparecchio dovuta all'usura, incrementando in maniera controllata (in relazione alle ore di funzionamento) la percentuale di flusso emesso, così da garantire la costanza nel tempo delle prestazioni richieste dalla categoria illuminotecnica.

L'attività di monitoraggio permette di registrare i dati relativi al voltaggio, alla corrente, al fattore di potenza, alle ore di funzionamento e al consumo totale di energia del dispositivo. Questi dati vengono inviati ad intervalli regolari al controllore di segmento “*Seco*”, il quale

ha il compito di analizzarli. Quest'ultimo ha anche il compito di inoltrare i comandi relativi alla regolazione del flusso luminoso emesso e di verificarne l'esecuzione, sulla base dei feedback ricevuti.



Figura 24 - Esempio di LuCo (Fonte: *Schröder*)



Figura 25 - Esempio di SeCo (Fonte: *Schröder*)

La gestione del sistema di illuminazione avviene tramite un Browser Web, che può essere utilizzato da un computer o da un dispositivo mobile.

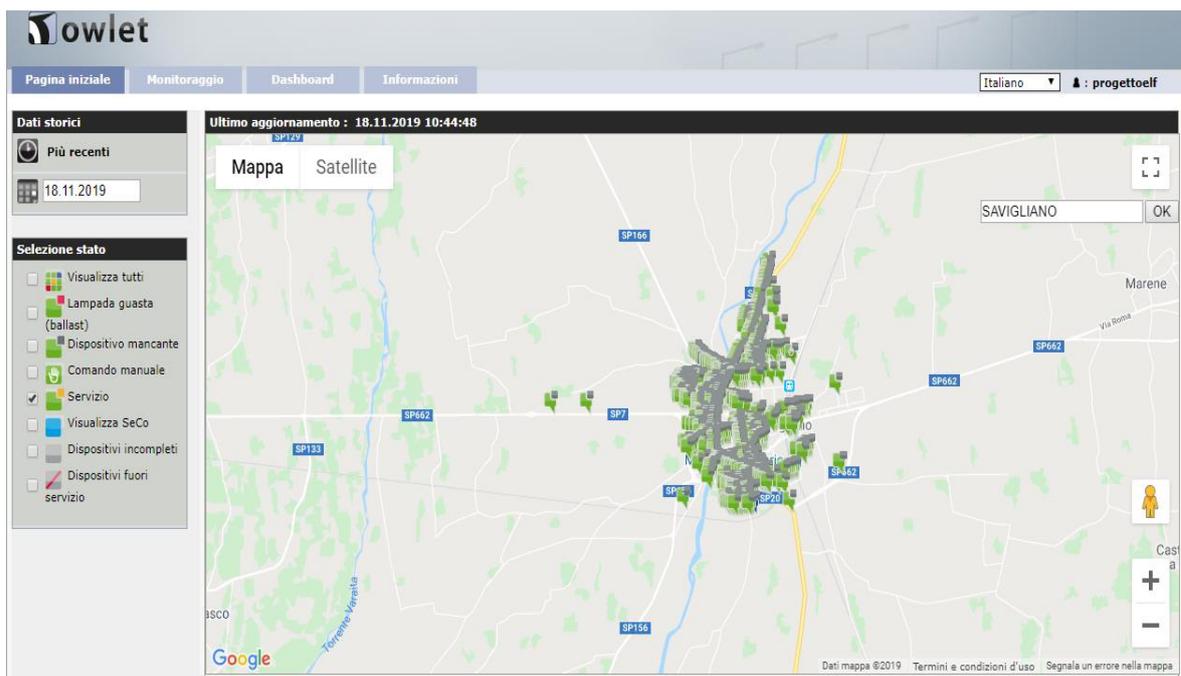


Figura 26 - Pagina Web del sistema *Owlet Nightshift*

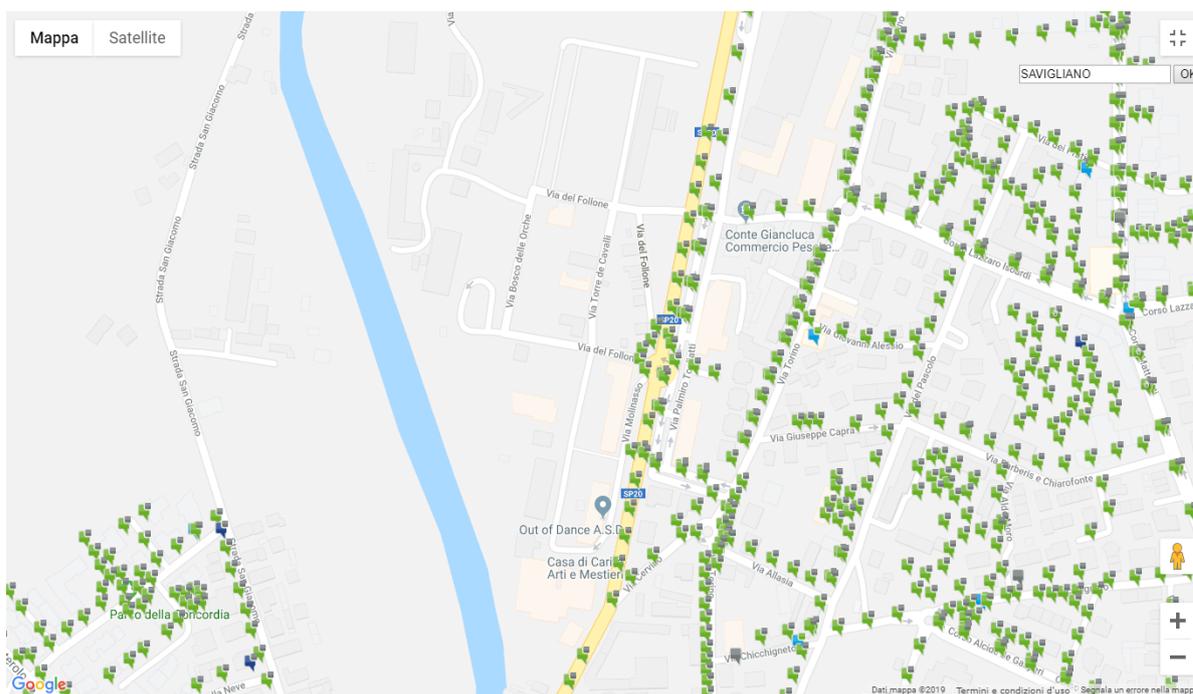


Figura 27 - Dispositivi controllati dal sistema *Owlet Nightshift*

Attualmente, il flusso luminoso relativo all'apparecchio illuminante sul quale è posto il sensore (così come gli altri dispositivi della stessa linea di controllo) segue un ciclo di regolazione pre-programmato, che si differenzia per i giorni festivi e quelli feriali, in cui l'accensione e lo spegnimento sono regolati da un orologio astronomico. L'andamento del

livello di regolazione del flusso luminoso emesso dagli apparecchi di illuminazione del tratto di Corso Romita è mostrato nella *Figura 28*.

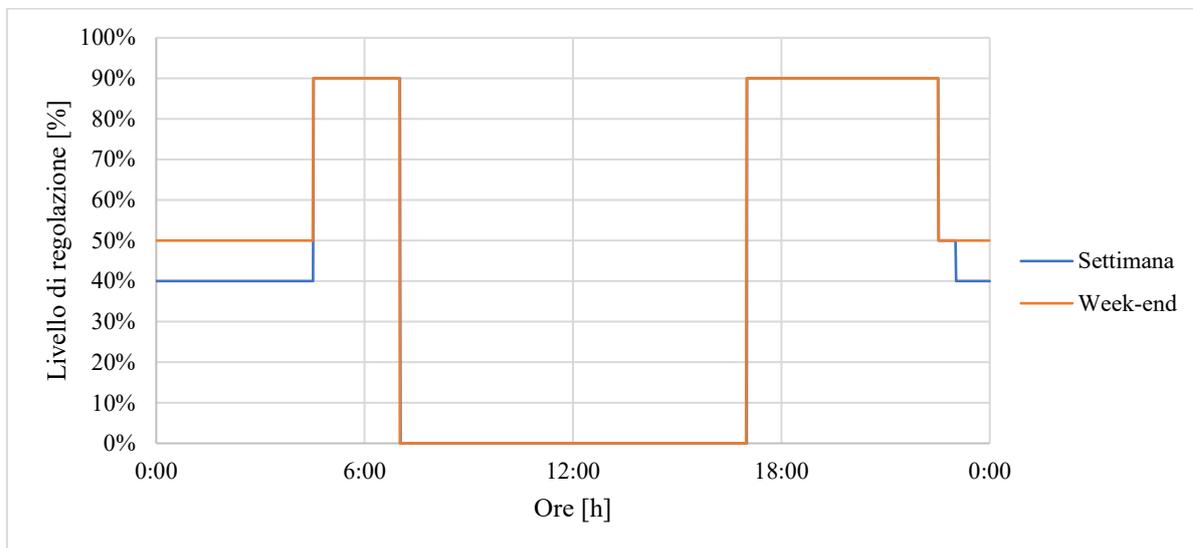


Figura 28 - Esempio di profilo di regolazione del flusso luminoso

L'impianto di illuminazione stradale di Via Torre de Cavalli, invece, è controllato dal sistema di gestione remota *Owlet IoT*, volto a monitorare, misurare e gestire la rete di illuminazione dell'area industriale del Comune di Savigliano. Questo sistema di telegestione è costituito da una rete locale mesh (tra gli apparecchi di illuminazione e i sensori) e una rete per la comunicazione con i server di sistema. Mediante una comunicazione bidirezionale, è possibile controllare lo stato di funzionamento, il consumo energetico ed eventuali guasti. Grazie alla combinazione di un'antenna GPS integrata e un processo intelligente di auto-attivazione, non richiede nessun intervento da parte dell'installatore e non necessita di un concentratore di segmento (a differenza del caso precedente). La localizzazione degli apparecchi viene indicata su una mappa di OpenStreetMaps con differenti colori e forme in base allo stato di attività o inattività delle sorgenti luminose. Tramite la struttura a matrice, vi è la possibilità di collegare un singolo sensore a molteplici apparecchi oppure molteplici sensori ad un solo apparecchio.

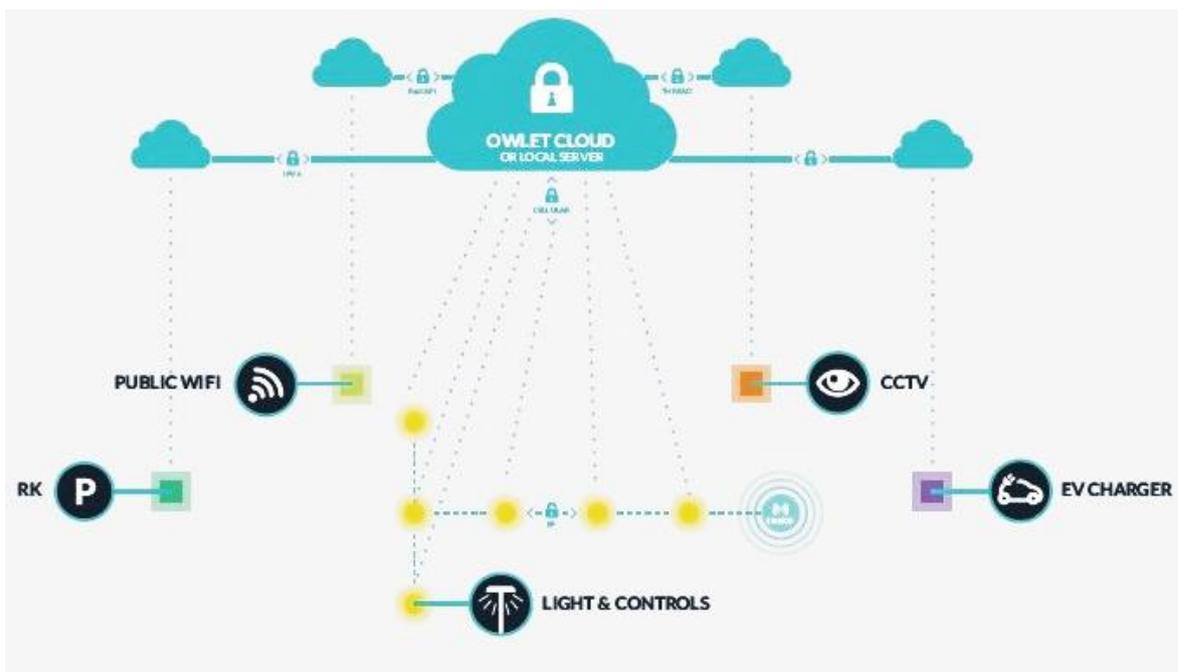


Figura 29 – Sistema *Owlet IoT* (Fonte: *Schröder*)

Il sistema di telegestione *Owlet IoT* consente di ottenere un'ottima prestazione visiva e di aumentare il risparmio energetico, grazie ai comandi di accensione e regolazione forniti dal profilo di regolazione a sistema; inoltre, l'orologio astronomico unitamente alla fotocellula integrata evitano che possa verificarsi un blackout completo durante la notte. La gestione del sistema avviene attraverso l'accesso con credenziali e password ed è possibile utilizzare l'applicazione tramite computer, smartphone o tablet. Infine, i report riguardanti l'installazione e il monitoraggio sono pianificati in base alle esigenze dell'utente.

Il sistema è basato su standard aperti e può consentire lo sviluppo delle piattaforme *Smart City*, in quanto permette anche lo scambio dei dati con i sistemi paralleli, come i sensori per la gestione del traffico, i sistemi per il monitoraggio ambientale (rilevatori di temperatura dell'aria, di rumori o di emissioni) o i dispositivi di sicurezza. Inoltre, vi è l'opportunità di integrare il sistema con dispositivi aggiuntivi come la "rilevazione furto cavi", basati su algoritmi specifici, per aumentare i vantaggi offerti dal sistema e migliorare l'esperienza dell'utente.

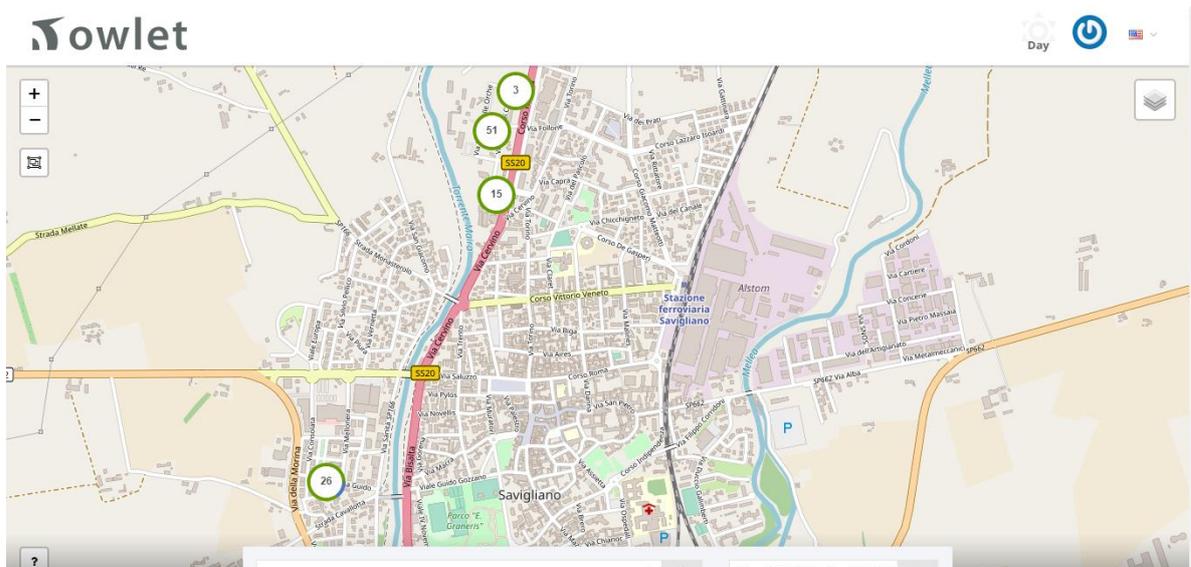


Figura 30 - Dispositivi controllati dal sistema Owlet IoT

Attualmente, il flusso luminoso relativo all'apparecchio illuminante segue un ciclo di regolazione pre-programmato (costante per ogni giorno della settimana), che è mostrato in *Figura 31*.

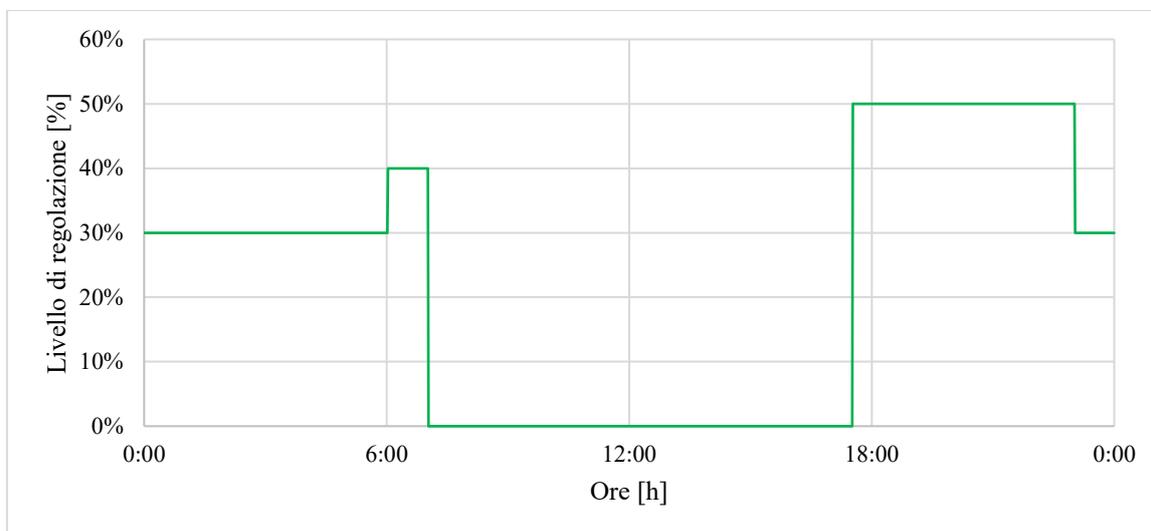


Figura 31 - Esempio di profilo di regolazione del flusso luminoso

4.3 Classificazione delle strade e analisi dei rischi

Per definire la categoria illuminotecnica di ingresso, è stato necessario individuare le zone di studio della strada, in cui i parametri di influenza fossero omogenei e, per ogni zona di studio, è stato necessario individuare il tipo di strada. Per la definizione della categoria illuminotecnica di progetto, è necessario svolgere l'analisi dei rischi, che consiste nella valutazione dei parametri di influenza costanti nel lungo periodo e degli aspetti legati al contenimento dei consumi energetici e dell'inquinamento luminoso. Infine, per identificare una o più categorie di esercizio, si deve considerare la variabilità nel tempo dei parametri di influenza e specificare le condizioni che rendono corretto il funzionamento dell'impianto.

❖ *SP 20*

Facendo riferimento alle analisi già condotte dal Politecnico di Torino nell'ambito del progetto *ELF*, emerge che la SP 20 può essere classificata come una strada urbana di quartiere di tipo E (secondo la *UNI 11248:2016*) e la categoria illuminotecnica di ingresso corrispondente è la *M3*.

Tipo di strada	Descrizione del tipo della strada	Limiti di velocità [km/h]	Categoria illuminotecnica di ingresso
E	Strade urbana di quartiere	50	M3

Tabella 12 - Estratto del Prospetto 1 della UNI 11248:2016 relativo alla "*Classificazione delle strade e individuazione della categoria illuminotecnica di ingresso per l'analisi dei rischi*"

La seguente tabella mostra un estratto del Prospetto C.1 dell'Appendice C della *UNI 11248:2016* relativo alla correlazione tra l'esigenza illuminotecnica e la tipologia di strada (in questo caso strada urbana di quartiere).

Tipo di strada	Descrizione del tipo di strada	N° Minimo Carreggiate indipendenti	N° Minimo di Corsie per senso di marcia	N° di sensi di marcia	Portata max. di servizio per corsia (veicoli/ora)	Ulteriori requisiti minimi, caratteristiche e chiarimenti
E	Strade urbane di quartiere	1	1	2	800	Proseguimento delle strade di tipo C "extraurbane secondarie" nella rete urbana. Strade provinciali, regionali e statali con corsie di manovra e parcheggi esterni alla carreggiata.
			2	1		

Tabella 13 - Estratto del Prospetto C.1 della UNI 11248:2016 "Caratteristiche riassuntive dei tipi di strada così come descritte nel Prospetto 1 e definite dall'art. 2 del codice stradale e D.M. 5/11/2001, N° 6792"

Per definire la categoria illuminotecnica di progetto, sono stati dunque valutati i principali parametri di influenza costanti nel lungo periodo, come proposto dalla *UNI 11248:2016*.

Parametro di influenza considerato	Riduzione massima della categoria illuminotecnica	Esito dell'analisi	Riduzione della categoria illuminotecnica
Complessità del campo visivo normale	1	Elevata, a causa della presenza di insegne luminose pubblicitarie e di attività commerciali	0
Assenza o bassa densità di zone di conflitto	1	Presenza elevata di intersezioni a raso, rotonde e accessi laterali ad abitazioni ed edifici commerciali; presenza di attraversamenti pedonali sia in prossimità delle rotonde, sia lungo il tratto stradale	0
Segnaletica cospicua nelle zone conflittuali	1	Presenza di segnali relativi agli attraversamenti pedonali; mancata segnalazione del probabile cambio del limite di velocità, rispetto al tratto precedente	0

Segnaletica stradale attiva	1	Non presente, ad eccezione del rilevatore di velocità ubicato nei pressi del tratto finale a sud-ovest	0
Assenza di pericolo di aggressione	1	Pericolo di aggressione assente, soprattutto nel tratto stradale preso in esame, in quanto non vi è una sezione dedicata ai pedoni; i passaggi pedonali sono illuminati da un impianto dedicato	0
Indice di resa cromatica $Ra \geq 60$	1	Gli apparecchi LED presentano sicuramente un valore di indice di resa cromatica superiore e 60	0,5
Rapporto $S/P \geq 1,1$		Gli apparecchi LED presentano generalmente un rapporto S/P di circa 2,1	

Tabella 14 - Parametri di influenza costanti nel lungo periodo considerati per l'analisi dei rischi

Avendo presente che la norma richiede che la somma del valore della riduzione di tutti i parametri di influenza generalmente costanti nel lungo periodo sia ridotta al più grande intero minore o uguale alla somma stessa, è stato valutato che la categoria illuminotecnica di progetto risultava essere la medesima di quella di ingresso, ovvero la *M3*. I requisiti prestazionali richiesti dalla norma *UNI EN 13201-2:2016* per la categoria illuminotecnica di progetto *M3* sono mostrati nella Tabella 15.

Categoria	Luminanza del manto stradale della carreggiata in condizioni di manto stradale asciutto e bagnato				Abbagliamento debilitante	Illuminazione di contiguità
	Asciutto			Bagnato	Asciutto	Asciutto
	\bar{L} [minima mantenuta] cd/m ²	U_0 [minima]	U_I [minima]	U_{ow} [minima]	f_{TI} [massima] %	REI [minima]
M3	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,30

Tabella 15 - Estratto del Prospetto 1 della UNI EN 13201-2:2016 relativo ai "Requisiti prestazionali delle Categorie Illuminotecniche M"

Per la definizione della categoria illuminotecnica (o delle categorie illuminotecniche) di esercizio è necessario valutare i parametri di influenza variabili nel tempo in modo periodico o casuale. Questo processo consiste nel confronto tra il flusso di traffico orario reale e la portata massima di servizio per questa tipologia di strada. A partire dalla categoria illuminotecnica di progetto individuata per questo caso studio, nel caso di *TAI* la riduzione massima concessa è pari a 2 categorie illuminotecniche per un flusso orario di traffico inferiore al 25% della portata di servizio e 1 categoria illuminotecnica per un flusso orario di traffico inferiore al 50% della portata di servizio o per una riduzione della complessità nella tipologia di traffico. Per gli impianti adattivi denominati *FAI*, alle riduzioni precedenti si aggiunge una ulteriore riduzione della categoria illuminotecnica per flussi di traffico minori del 12,5% del flusso orario di traffico nominale. Riassumendo:

Applicazione della modalità di regolazione <i>TAI</i>			
Categoria illuminotecnica di ingresso	Categoria illuminotecnica di progetto	Categoria illuminotecnica di esercizio	
		Flusso di traffico minore del 50% di quello nominale	Flusso di traffico minore del 25% di quello nominale
M3	M3	M4	M5

Applicazione della modalità di regolazione <i>FAI</i>				
Categoria illuminotecnica di ingresso	Categoria illuminotecnica di progetto	Categoria illuminotecnica di esercizio		
		Flusso di traffico minore del 50% di quello nominale	Flusso di traffico minore del 25% di quello nominale	Flusso di traffico minore del 12,5% di quello nominale
M3	M3	M4	M5	M6

❖ **Via Torre de Cavalli**

Facendo riferimento alle analisi dei rischi già condotte dal Politecnico di Torino nell'ambito del progetto *ELF*, emerge che Via Torre de Cavalli può essere classificata come una strada locale urbana di tipo F (secondo la *UNI 11248:2016*) e la corrispondente categoria illuminotecnica di ingresso è la *M4*.

Tipo di strada	Descrizione del tipo della strada	Limiti di velocità [km/h]	Categoria illuminotecnica di ingresso
F	Strade locali urbane	50	M4

Tabella 16 - Estratto del Prospetto 1 della UNI 11248:2016 relativo alla "Classificazione delle strade e individuazione della categoria illuminotecnica di ingresso per l'analisi dei rischi"

La seguente tabella mostra un estratto del Prospetto C.1 dell'Appendice C della *UNI 11248:2016* relativo alla correlazione tra l'esigenza illuminotecnica e la tipologia di strada (in questo caso strada extraurbana secondaria).

Tipo di strada	Descrizione del tipo di strada	N° Minimo Carreggiate indipendenti	N° Minimo di Corsie per senso di marcia	N° di sensi di marcia	Portata max. di servizio per corsia (veicoli/ora)	Ulteriori requisiti minimi, caratteristiche e chiarimenti
F	Strade locali urbane	1	1	1 o 2	800	Strade locali diverse da strade di tipo D e, quali strade residenziali, artigianali, centro cittadino, centro storico, ecc.

Tabella 17 - Estratto del Prospetto C.1 della UNI 11248:2016 "Caratteristiche riassuntive dei tipi di strada così come descritte nel Prospetto 1 e definite dall'art. 2 del codice stradale e D.M. 5/11/2001, N° 6792"

Analogamente al caso precedente, per definire la categoria illuminotecnica di progetto di Via Torre de Cavalli, sono stati valutati i principali parametri di influenza costanti nel lungo periodo, come proposto dalla *UNI 11248:2016*.

Parametro di influenza considerato	Riduzione massima della categoria illuminotecnica	Esito dell'analisi	Riduzione della categoria illuminotecnica
Complessità del campo visivo normale	1	Normale	0,5
Assenza o bassa densità di zone di conflitto	1	Presenza elevata di intersezioni a raso nell'intera zona e di diverse tipologie di utenti	0

Segnaletica cospicua nelle zone conflittuali	1	Presenza di segnaletica non particolarmente cospicua nelle zone di conflitto (in particolare non sono presenti cartelli di avviso in prossimità dei passaggi pedonali)	0
Segnaletica stradale attiva	1	Non presente	0
Assenza di pericolo di aggressione	1	Presente, in quanto l'area risulta essere in una zona marginale ed isolata	0
Indice di resa cromatica $Ra \geq 60$	1	Gli apparecchi LED presentano sicuramente un valore di indice di resa cromatica superiore e 60	0,5
Rapporto S/P $\geq 1,1$		Gli apparecchi LED presentano generalmente un rapporto S/P di circa 2,1	

Tabella 18 - Parametri di influenza costanti nel lungo periodo considerati per l'analisi dei rischi

Poiché la norma richiede che la somma del valore della riduzione di tutti i parametri di influenza generalmente costanti nel lungo periodo sia ridotta al più grande intero minore o uguale alla somma stessa, è stato valutato che la categoria illuminotecnica di progetto poteva essere declassata di una categoria rispetto a quella di ingresso. La categoria illuminotecnica di progetto è stata identificata con la M5.

Categoria	Luminanza del manto stradale della carreggiata in condizioni di manto stradale asciutto e bagnato				Abbagliamento debilitante	Illuminazione di contiguità
	Asciutto		Bagnato		Asciutto	Asciutto
	\bar{L} [minima mantenuta] cd/m ²	U_0 [minima]	U_1 [minima]	U_{ow} [minima]	f_{π} [massima] %	REI [minima]
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,30

Tabella 19 - Estratto del Prospetto 1 della UNI EN 13201-2:2016 relativo ai "Requisiti prestazionali delle Categorie Illuminotecniche M"

Anche in questo caso, per la definizione della categoria illuminotecnica (o delle categorie illuminotecniche) di esercizio è necessario valutare i parametri di influenza variabili nel tempo in modo periodico o casuale. A partire dalla categoria illuminotecnica di progetto individuata per Via Torre de Cavalli, nel caso di *TAI* la riduzione massima concessa è pari a 2 categorie illuminotecniche per un flusso orario di traffico inferiore al 25% della portata di servizio e 1 categoria illuminotecnica per un flusso orario di traffico inferiore al 50% della portata di servizio o per una riduzione della complessità nella tipologia di traffico. Inoltre, per gli impianti adattivi denominati *FAI*, alle riduzioni precedenti si potrebbe aggiungere una ulteriore riduzione della categoria illuminotecnica per flussi di traffico minori del 12,5% del flusso orario di traffico nominale, ma poiché la categoria di esercizio minima è la *M6*, in ogni caso la riduzione massima concessa sarà di due categorie illuminotecniche. Riassumendo:

Applicazione della modalità di regolazione <i>TAI</i>			
Categoria illuminotecnica di ingresso	Categoria illuminotecnica di progetto	Categoria illuminotecnica di esercizio	
		Flusso di traffico minore del 50% di quello nominale	Flusso di traffico minore del 25% di quello nominale
M4	M5	M6	M6

Applicazione della modalità di regolazione <i>FAI</i>				
Categoria illuminotecnica di ingresso	Categoria illuminotecnica di progetto	Categoria illuminotecnica di esercizio		
		Flusso di traffico minore del 50% di quello nominale	Flusso di traffico minore del 25% di quello nominale	Flusso di traffico minore del 12,5% di quello nominale
M4	M5	M6	M6	M6

4.4 Procedura per il calcolo della luminanza per il caso studio di Savigliano

Come specificato in precedenza, nel caso di traffico motorizzato (categorie illuminotecniche di ingresso M) il parametro da considerare per la valutazione delle prestazioni fotometriche è la luminanza. La luminanza (generalmente indicata con il simbolo L) rappresenta il rapporto tra l'intensità luminosa di una sorgente nella direzione di un osservatore e la superficie

emittente apparente così come viene vista dall'osservatore stesso. Facendo riferimento alla procedura descritta dalla norma *UNI EN 13201-3:2016* relativa al calcolo delle prestazioni fotometriche e considerando che, in questo caso, la sonda di luminanza è posta solo su un palo, è necessario valutare la luminanza media dell'area di calcolo individuata da due apparecchi di illuminazione consecutivi, con l'osservatore posto a 60 metri dalla prima riga trasversale di calcolo, ad un'altezza pari a 1,5 metri e al centro di ogni corsia di marcia.

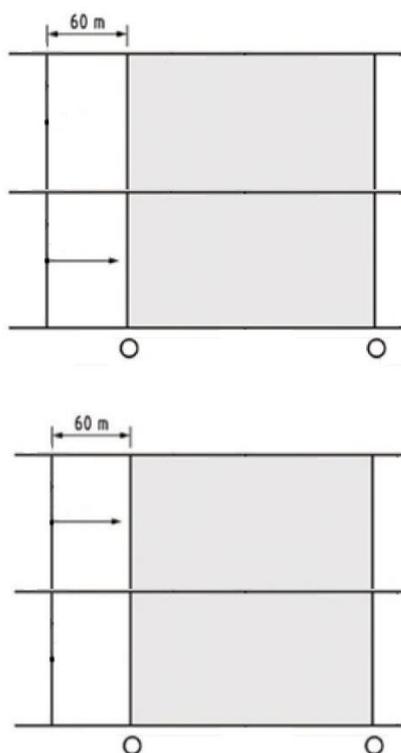


Figura 32 - Calcolo della luminanza media secondo la UNI EN 13201-3:2016

All'atto pratico, però, non è possibile seguire la metodologia indicata dalla norma, in quanto significherebbe montare il dispositivo di rilevazione al centro di ogni corsia di marcia, ostacolando così il flusso dei veicoli. Per ragioni logistiche, le sonde di luminanza sono state installate sui pali (in maniera tale da limitarne lo sporco e per evitarne il danneggiamento a seguito di atti vandalici) secondo le seguenti caratteristiche:

- Corso Romita

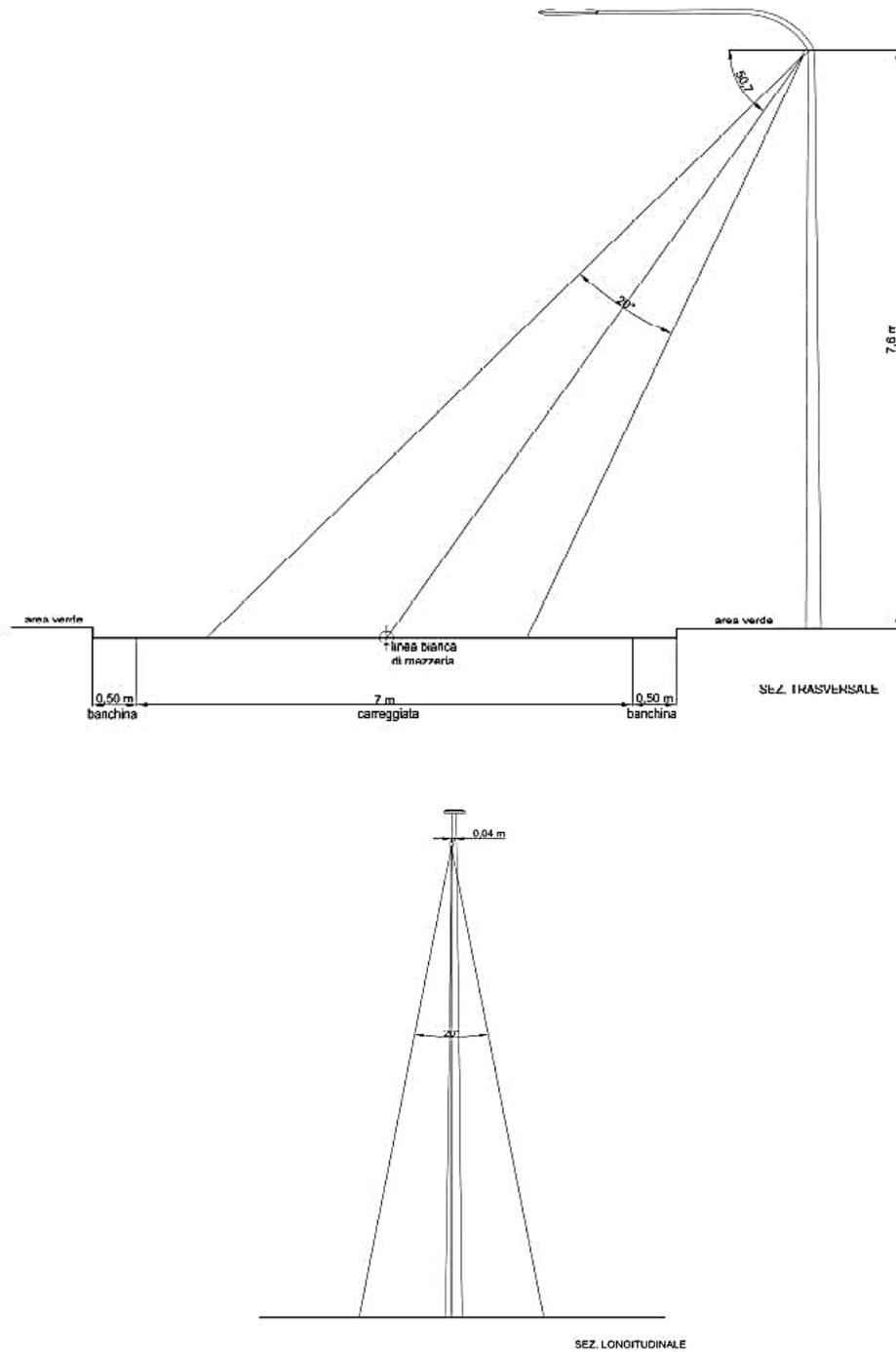


Figura 33 - Rappresentazione dell'installazione della sonda di luminanza per corso Romita

Altezza di montaggio del sensore [m]	Inclinazione della sonda	Apertura del fascio della sonda	Scostamento della staffa di montaggio rispetto all'asse del palo [m]
7,6	50,7°	20°	0,04

- Via Torre de Cavalli

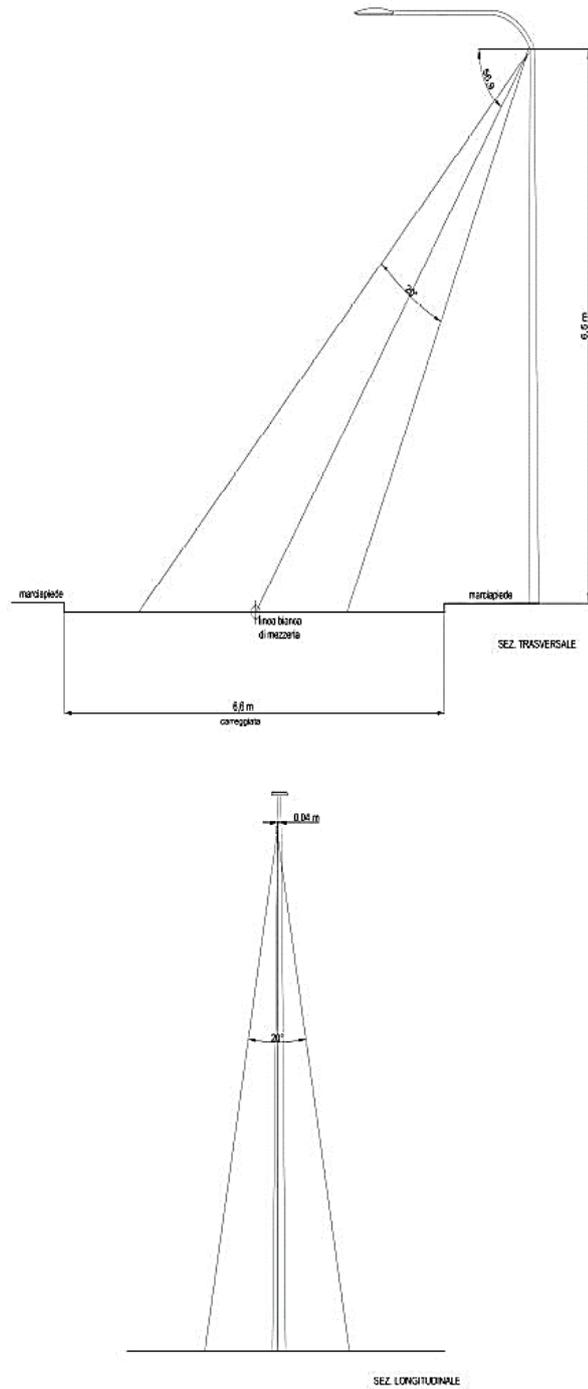


Figura 34 - Rappresentazione dell'installazione della sonda di luminanza per Via Torre de Cavalli

Altezza di montaggio del sensore [m]	Inclinazione della sonda	Apertura del fascio della sonda	Scostamento della staffa di montaggio rispetto all'asse del palo [m]
6,5	56,9°	20°	0,04

Inoltre, l'area di calcolo della luminanza media misurata dal sensore installato sul lampione è costituita da un'ellisse, a differenza di quanto indicato dalla norma, la quale invece definisce un'area di calcolo rettangolare. Una rappresentazione che mette in evidenza questo scostamento è mostrata nelle figure seguenti.

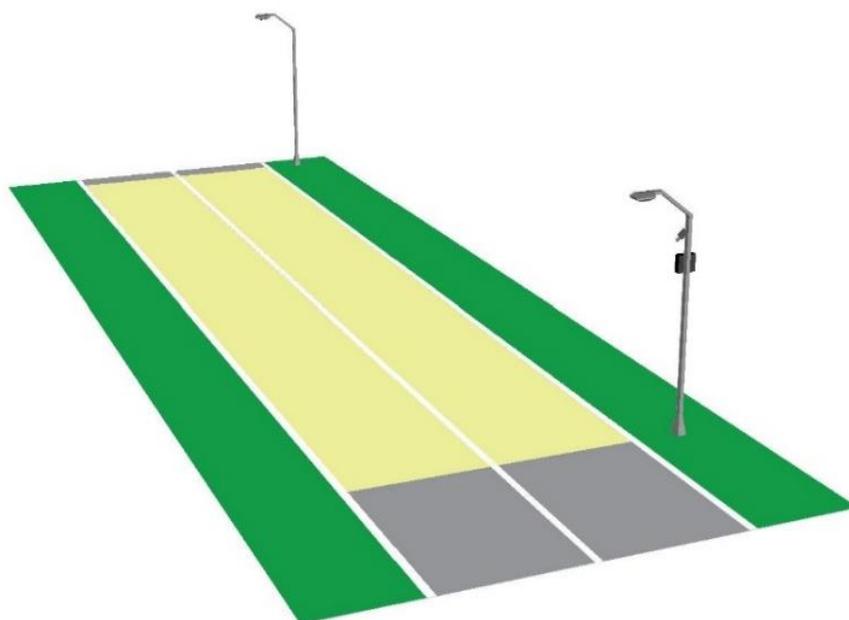


Figura 35 - Area rilevante per il calcolo della luminanza media secondo la *UNI EN 13201-3:2016*

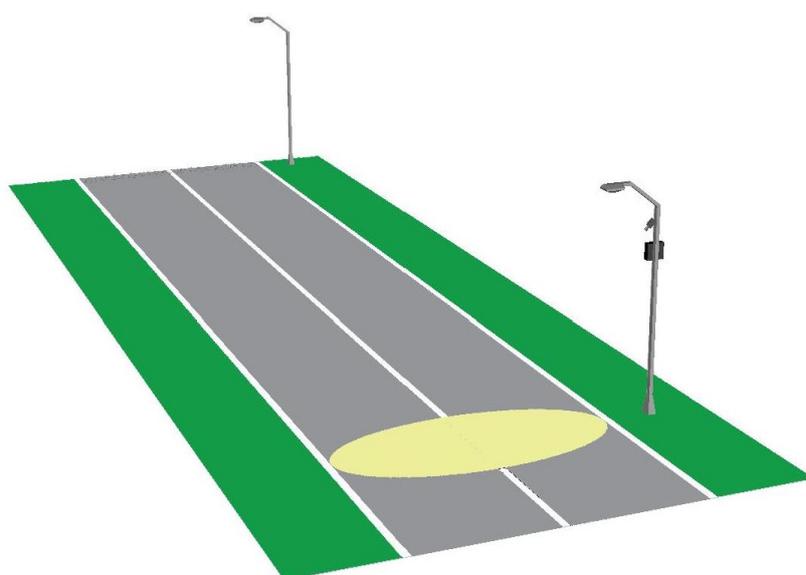


Figura 36 - Area rilevante considerata dalla sonda per il calcolo della luminanza media

Per tenere in considerazione la differente geometria individuata per il calcolo della luminanza media e la diversa posizione dell'osservatore nei confronti di quest'ultima, è stato definito un fattore di correlazione k da implementare nell'algoritmo di applicazione della *FAI* per riportare il valore di luminanza letta dal sensore al valore definito secondo la *UNI EN 13201-3:2016*, direttamente confrontabile con i requisiti normativi. Tale parametro è stato definito come il rapporto tra la luminanza letta dal sensore montato sul palo e la luminanza ottenuta mediante le misure con il videofotometro effettuate secondo la geometria e la procedura definite dalla *UNI EN 13201-3:2016*:

$$k = \frac{L_s}{L_v} [-]$$

dove:

- L_s è la luminanza della sonda installata sui pali;
- L_v è la luminanza valutata con il videofotometro (secondo la *UNI EN 13201-3:2016*).

4.5 Calcolo della parametro di correlazione k per il caso di Savigliano

La definizione del parametro di correlazione k è necessario per l'applicazione in campo della regolazione adattiva *FAI*, in quanto è fondamentale modificare il valore della luminanza media L_s misurata dalla sonda installata sui pali, in maniera tale da ottenere un valore confrontabile con i requisiti normativi, definito L_{norm} e calcolato come rapporto tra il valore di luminanza L_s e il parametro di correlazione k . Al fine di calcolare il fattore di correlazione k (relativo alla diversa geometria dell'area di calcolo e alla diversa posizione dell'osservatore), sono state effettuate le misure della luminanza media secondo quanto descritto dalla *UNI EN 13201-3:2016*, seguendo le fasi indicate:

1. è stata individuata l'area rilevante per il calcolo della luminanza media secondo le indicazioni della norma;
2. è stata effettuata l'acquisizione dell'immagine dell'area rilevante mediante il videofotometro, posizionando lo strumento al centro della corsia di destra, ad un'altezza di 1,5 metri e ad una distanza pari a 60 metri rispetto alla linea di delimitazione dell'area;

3. nello stesso minuto, è stato letto, in tempo reale, il valore della luminanza media valutata dal sensore posto sul lampione;
4. è stata effettuata l'acquisizione dell'immagine dell'area rilevante mediante il videofotometro, posizionando lo strumento al centro della corsia di sinistra, ad un'altezza di 1,5 metri e ad una distanza pari a 60 metri rispetto alla linea di delimitazione dell'area;
5. nello stesso minuto, è stato letto, in tempo reale, il valore della luminanza media calcolata dal sensore posto sul lampione;
6. si sono ripetute le misure (per entrambe le corsie) per i diversi livelli di regolazione del flusso luminoso.

Infatti, per evidenziare l'influenza del flusso luminoso degli apparecchi di illuminazione sul valore della luminanza misurata dal sensore, sono stati considerati diversi livelli di regolazione del flusso luminoso degli impianti di illuminazione stradale circoscritti all'area interessata. Il fotometro adottato per l'acquisizione delle immagini, equipaggiato con un sensore *CMOS Canon APS-C*, è mostrato in *Figura 37*.



Figura 37 - Fotometro utilizzato per la misurazione della luminanza dotato di sensore CMOS Canon APS-C (Fonte: www.directindustry.it)

L'area rilevante rappresenta la regione compresa da due apparecchi di illuminazione posizionati sulla stessa linea ed è costituita da diversi punti di calcolo uniformemente distribuiti. La definizione dell'area rilevante e dei punti di calcolo è riportata nella *UNI EN 13201-3:2016*.

In direzione longitudinale, la distanza tra i punti di calcolo può essere calcolata con la seguente formula:

$$D = \frac{S}{N} \quad [m]$$

dove:

- D è la distanza tra i punti in direzione longitudinale, espressa in metri;
- S è l'interdistanza tra i due pali, espressa in metri;
- N è il numero di punti di calcolo in direzione longitudinale, con i seguenti valori:
 - se l'interdistanza è inferiore a 30 m, allora è necessario avere 10 punti di calcolo per ogni riga;
 - se l'interdistanza è maggiore di 30 m, allora il numero di punti di calcolo è identificato dal più piccolo numero intero che fornisca un valore $D \leq 3$ m.

In direzione trasversale, lo spazio tra i punti si calcola con la formula:

$$d = \frac{W_L}{3} \quad [m]$$

dove:

- d è la distanza tra i punti in direzione trasversale, espressa in metri;
- W_L è la larghezza della corsia, espressa in metri.

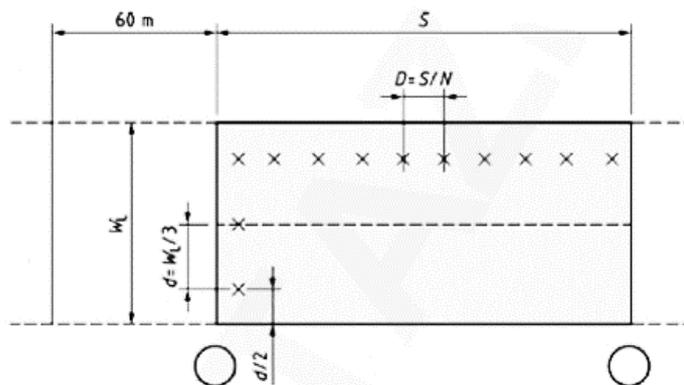


Figura 38 - Posizione dei punti di calcolo relativi ad una corsia

Le immagini acquisite con il videofotometro sono state elaborate mediante il programma “Lmk LabSoft”: è stata individuata ed evidenziata l’area rilevante (“Measured grid”) ed è stato effettuato un raddrizzamento dell’area mediante la funzione “street view”, la quale introduce e posiziona automaticamente i punti di calcolo (in funzione di quanto indicato dalla norma UNI EN 13201-3:2016), restituendo il valore della luminanza media (in cd/m^2). Un esempio dell’applicazione di questa procedura è mostrato in *Figura 39*.

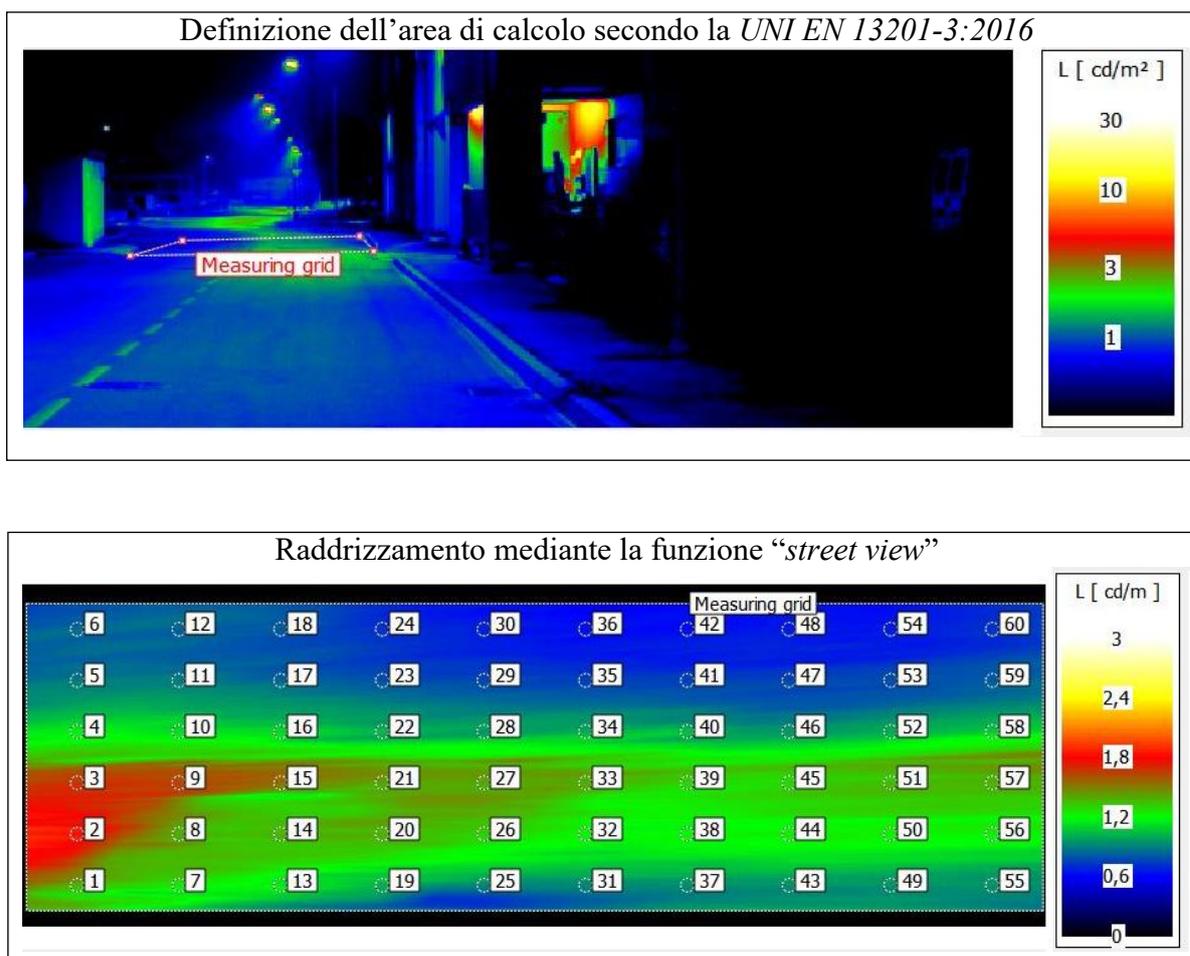


Figura 39 - Esempio di elaborazione con “Lmk LabSoft”

A causa dell’attraversamento pedonale nella SP 20 posto in prossimità dell’area rilevante sottoposta ad analisi e dell’inquinamento luminoso generato dalla luce parassita proveniente dagli edifici, è stato scelto di agire diversamente per il caso di Corso Romita e per il caso di Via Torre de Cavalli.

4.5.1 Corso Romita

Il tratto di Corso Romita nel quale è stato installato il sensore è costituito da una carreggiata e da due corsie (una per ogni senso di marcia); non presenta piste ciclabili né corsie di emergenza, ma è caratterizzato da un attraversamento pedonale segnalato e illuminato separatamente, posizionato in prossimità del corpo illuminante su cui è installato il sensore.



Figura 40 - Sistema di illuminazione di un tratto di Corso Romita

In questo caso, la presenza dei segnali stradali ostacolava in maniera significativa il calcolo della luminanza media secondo la norma *UNI EN 13201-3:2016*; durante il raddrizzamento, infatti, i punti di calcolo ricadevano all'interno dei segnali stradali (anch'essi raddrizzati dal processo di analisi dell'immagine), alterando così il valore calcolato della luminanza media.



Figura 41 - Particolare dell'attraversamento (Fonte: *Google Maps*)

Per questo motivo, la valutazione della luminanza, per ogni livello di regolazione del flusso luminoso (in questo caso sono stati scelti il 10%, il 50% e il 90%), è stata eseguita secondo le seguenti fasi:

1. è stata calcolata la luminanza media solo per l'area relativa alla corsia di destra, con l'osservatore posto al centro della corsia di destra, ad un'altezza di 1,5 metri e posto a 60 metri dall'area rilevante (*Figura 42*);
2. è stata calcolata la luminanza media solo per l'area relativa alla corsia di sinistra, con l'osservatore posto al centro della corsia di sinistra, ad un'altezza di 1,5 metri e posto a 60 metri dall'area rilevante (*Figura 43*);
3. il valore della luminanza media ($L_{v,med}$) è stato calcolato come media dei due valori ottenuti.

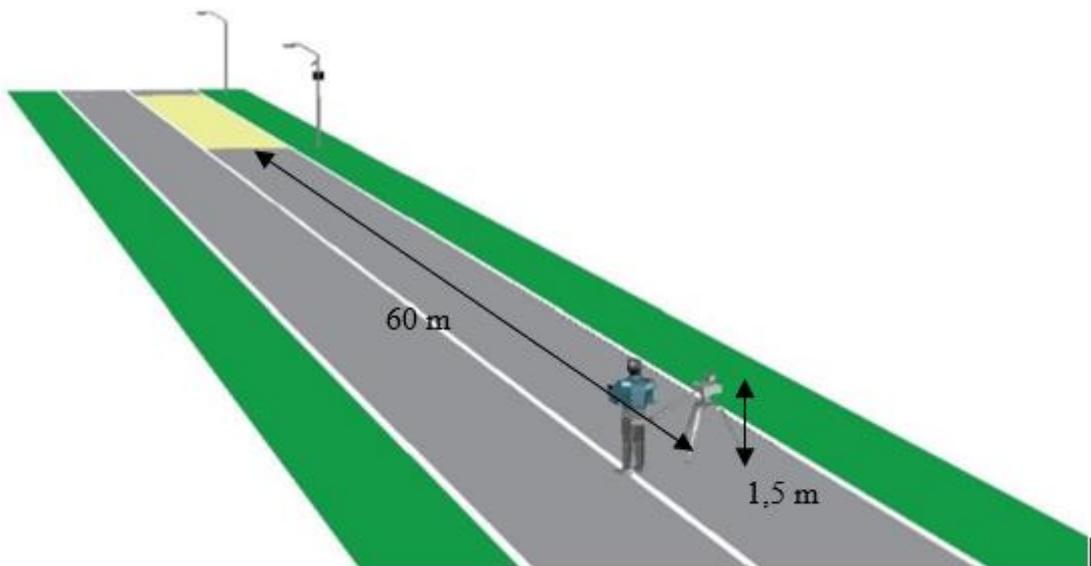


Figura 42 - Acquisizione immagine con il videofotometro dalla corsia di destra nel caso di Corso Romita

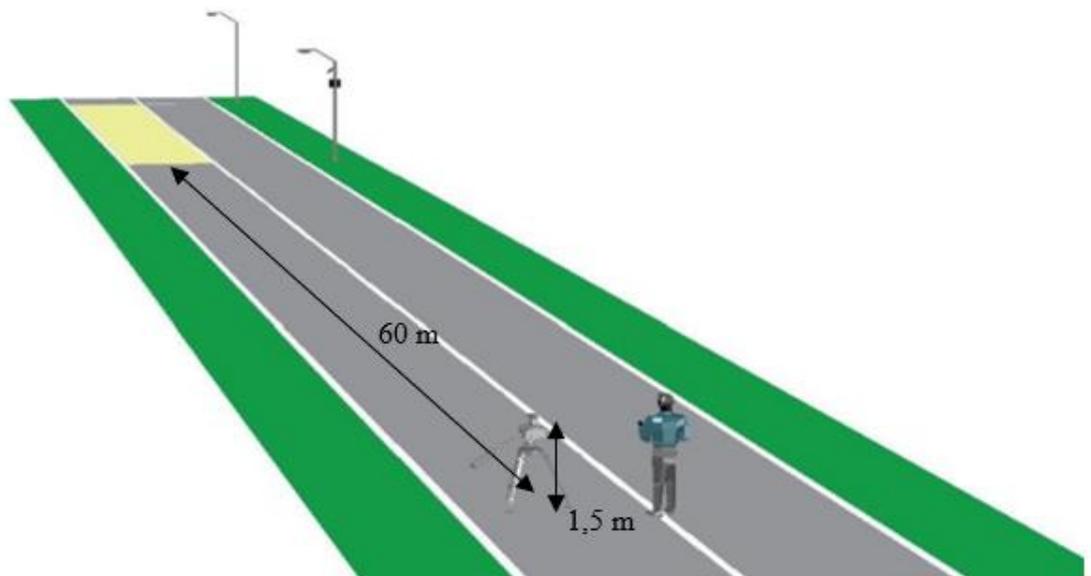
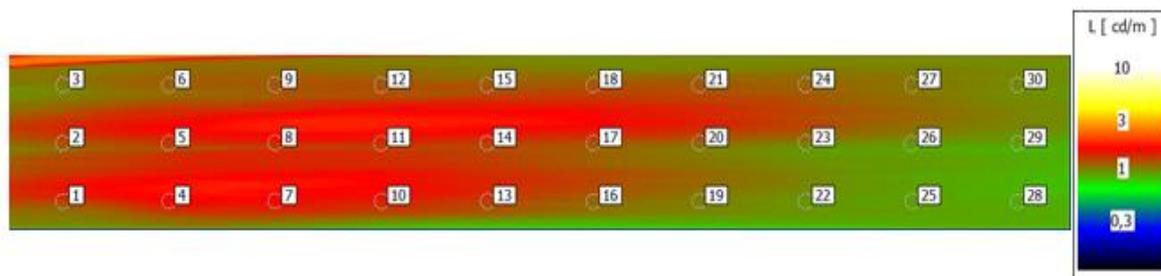


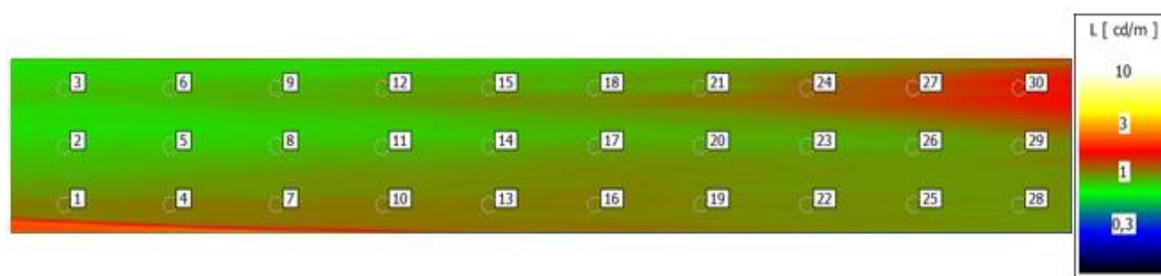
Figura 43 - Acquisizione immagine con il videofotometro dalla corsia di sinistra nel caso di Corso Romita

Le immagini acquisite attraverso il videofotometro sono state successivamente elaborate mediante il programma “*Lmk LabSoft*”, secondo quanto descritto precedentemente, ed è stata applicata la funzione “street view”, ottenendo il valore della luminanza in ogni punto di calcolo e il valore della luminanza media dell’area di riferimento (in cd/m^2).



Number of grid lines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	L_Max	L_Min	L_Avg	Lengthwise Uniformity	Overall Uniformity
3	1.04	1.14	1.17	1.19	1.17	1.19	1.17	1.13	1.06	0.981	1.19	0.981	1.18	0.822	0.742
2	1.21	1.34	1.43	1.39	1.32	1.24	1.14	1.03	0.951	0.904	1.43	0.904		0.635	
1	1.31	1.57	1.58	1.46	1.3	1.13	1.03	0.947	0.904	0.872	1.58	0.872		0.554	

Figura 44 – Esempio di elaborazione con *LabSoft* per la corsia di destra (livello di regolazione del flusso luminoso pari al 10%)



Number of grid lines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	L_Max	L_Min	L_Avg	Lengthwise Uniformity	Overall Uniformity
3	0.798	0.822	0.855	0.88	0.902	0.906	0.934	1.12	1.25	1.45	1.45	0.798	0.956	0.551	0.82
2	0.784	0.792	0.806	0.838	0.863	0.901	0.898	0.893	0.903	0.951	0.951	0.784		0.825	
1	1.02	1.05	1.04	1.04	1.04	1.03	1.01	0.987	0.969	0.967	1.05	0.967		0.924	

Figura 45 – Esempio di elaborazione con *LabSoft* per la corsia di sinistra (livello di regolazione del flusso luminoso pari al 10%)

In funzione dei valori di luminanza ottenuti mediante l'elaborazione delle immagini acquisite attraverso il fotometro e quelli registrati dalla sonda di luminanza installata sul palo, è stato possibile calcolare il fattore di correlazione k per ogni livello di regolazione del flusso luminoso per il caso di Corso Romita, dividendo il valore della luminanza della sonda L_s per il valore della luminanza minima $L_{v,med}$ (Tabella 20).

Livello di regolazione del flusso luminoso	Posizione	Luminanza sonda, L_s [cd/m ²]	Luminanza videofotometro, L_v [cd/m ²]	Luminanza media, $L_{v,med}$ [cd/m ²]	k [-]
10%	Destra	0,91	1,18	1,07	0,852
10%	Sinistra	0,91	0,97		
50%	Destra	1,58	2,02	1,74	0,904
50%	Sinistra	1,58	1,46		
90%	Destra	2,50	3,34	2,86	0,874
90%	Sinistra	2,50	2,38		

Tabella 20 - Valutazione del parametro k nel caso di Corso Romita

Tenendo in considerazione l'incertezza di misura associata ai due strumenti (precisamente il 5% nel caso della sonda di luminanza sul palo e il 4,7% del videofotometro), è stato valutato il range di tollerabilità della variazione del fattore di correlazione k (Figura 46).

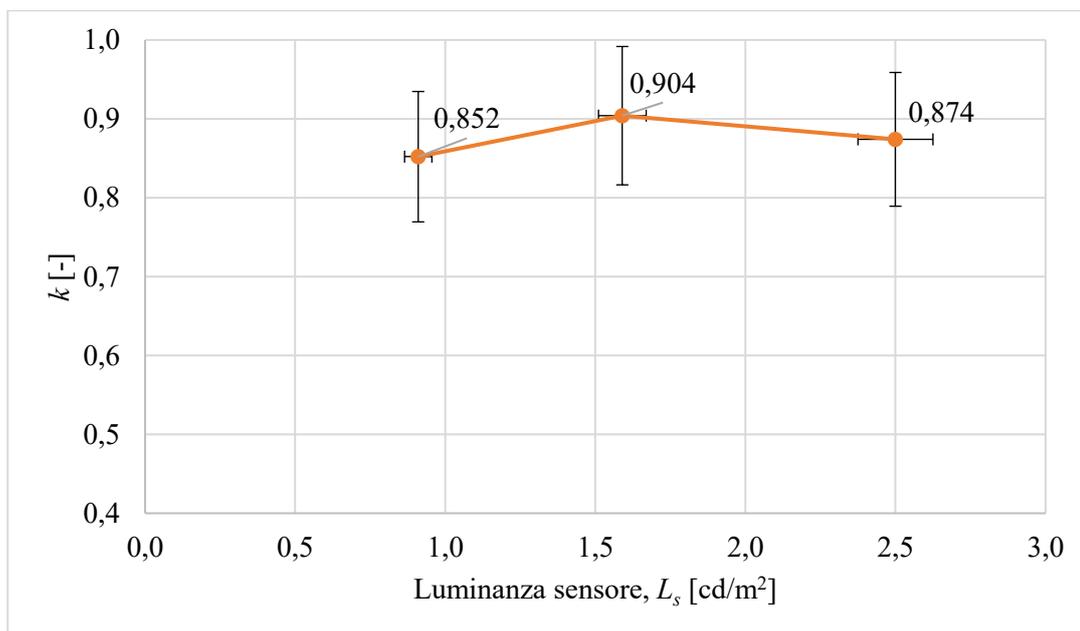


Figura 46 - Andamento del fattore di correlazione k

È stato valutato che le variazioni relative al fattore di correlazione k per i tre livelli di regolazione del flusso luminoso potessero essere associati esclusivamente all'incertezza degli strumenti. Per ragioni cautelative, al fine di considerare la situazione più sfavorevole (quindi un valore di luminanza L_{norm} minore) il parametro di correlazione k scelto per relazionare le

due modalità di calcolo della luminanza media è stato il valore maggiore del fattore di correlazione calcolato per i diversi livelli di regolazione del flusso luminoso, ovvero 0,90. Dividendo il valore della luminanza media L_s per il parametro di correlazione k individuato, si ottiene un valore di luminanza L_{norm} direttamente confrontabile con i requisiti prestazionali (ovvero la luminanza minima mantenuta) definiti dalla *UNI EN 13201-2:2016* per le varie categorie di esercizio per Corso Romita.

4.5.2 Via Torre de Cavalli

Via Torre de Cavalli appartiene ad un'area industriale ed è classificata come strada extraurbana secondaria di tipo C (con limite di velocità pari a 50 km/h). È costituita da una carreggiata e da due corsie (una per ogni senso di marcia) e non presenta né piste ciclabili né corsie di emergenza.

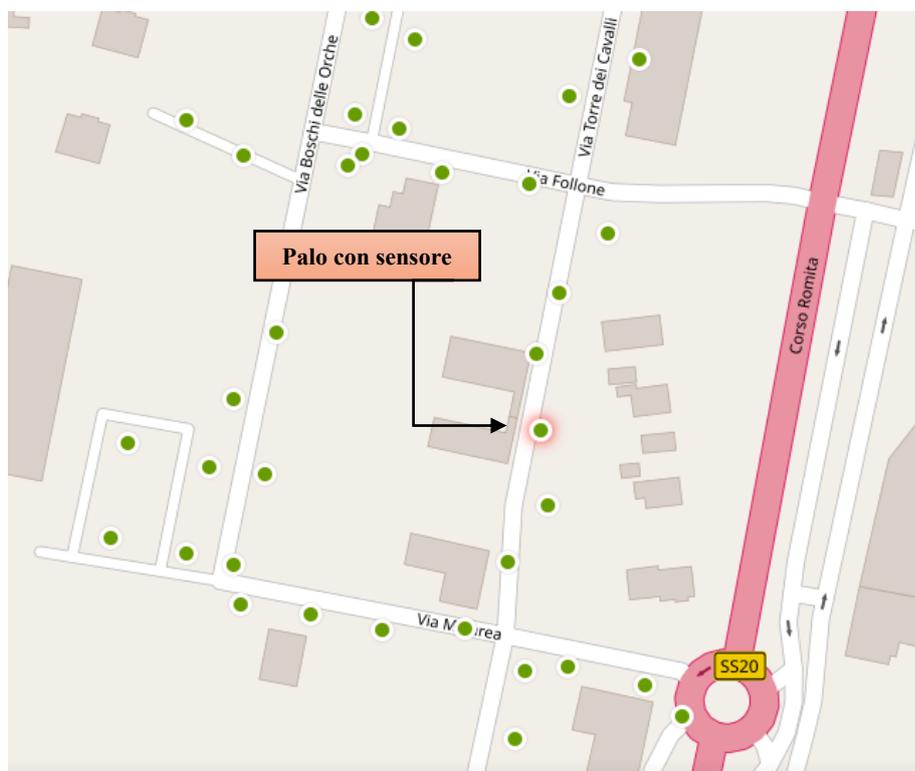


Figura 47 - Sistema di illuminazione della zona di Torre de Cavalli

A causa della luce parassita proveniente dall'edificio in prossimità del palo sul quale è installata la sonda di luminanza, è stato scelto di modificare la posizione dell'area rilevante per il calcolo della luminanza media rispetto a quanto indicato dalla *UNI EN 13201-3:2016*.



Figura 48 - Particolare dell'inquinamento luminoso in Via Torre de Cavalli (Fonte: *Google Maps*)

Infatti, nel caso di Via Torre de Cavalli, è stata considerata come area di calcolo la regione delimitata dalla mezza interdistanza tra il palo munito di sensori e il palo subito seguente e dalla mezza interdistanza tra il palo munito di sensori e il palo precedente. Tale scelta è stata frutto di un'analisi sull'influenza dell'inquinamento luminoso generato da fattori esterni (come appunto quella appena descritta) sul valore della luminanza calcolata con il videofotometro: la traslazione dell'area rilevante come precedentemente evidenziato, ha permesso di tenere in considerazione l'influenza di questi fattori "alteranti" sia sull'area definita dalla norma *UNI EN 13201-3:2016* che sull'area di calcolo della luminanza media della sonda.

Nel caso di Via Torre de Cavalli, la valutazione della luminanza, per ogni livello di regolazione del flusso luminoso (in questo caso sono stati scelti il 10%, il 30% e il 100%), è stata eseguita secondo le seguenti fasi:

1. è stata calcolata la luminanza media dell'intera carreggiata, con l'osservatore posto al centro della corsia di destra, ad un'altezza di 1,5 metri e posto a 60 metri dall'area rilevante (*Figura 49*);

2. è stata calcolata la luminanza media dell'intera carreggiata, con l'osservatore posto al centro della corsia di sinistra, ad un'altezza di 1,5 metri e posto a 60 metri dall'area rilevante (Figura 50);
3. come valore della luminanza media ($L_{v,min}$) è stato considerato il minimo dei risultati ottenuti.

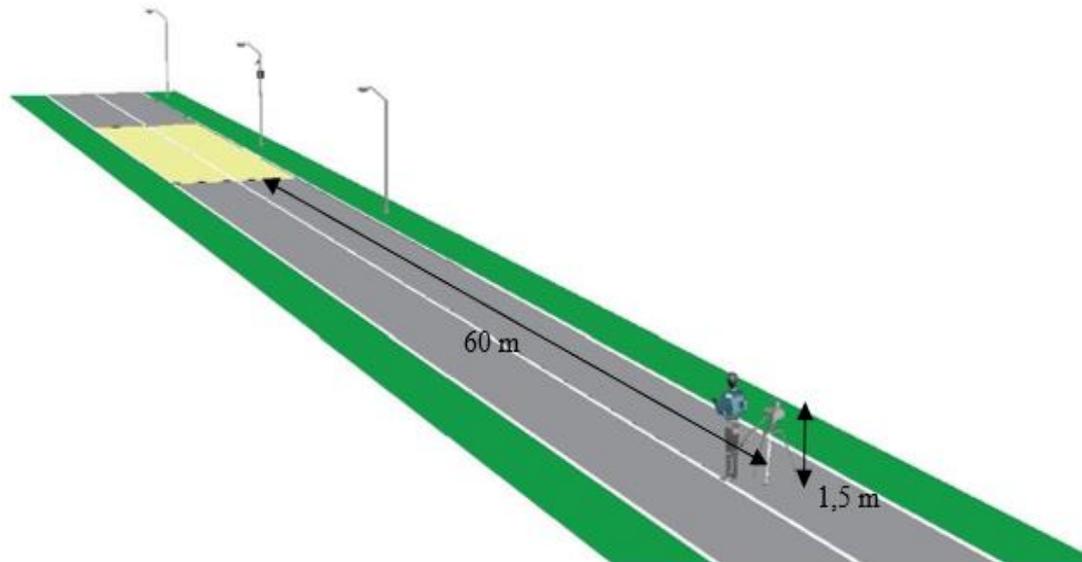


Figura 49 - Acquisizione immagine con il videofotometro dalla corsia di destra nel caso di Via Torre de Cavalli

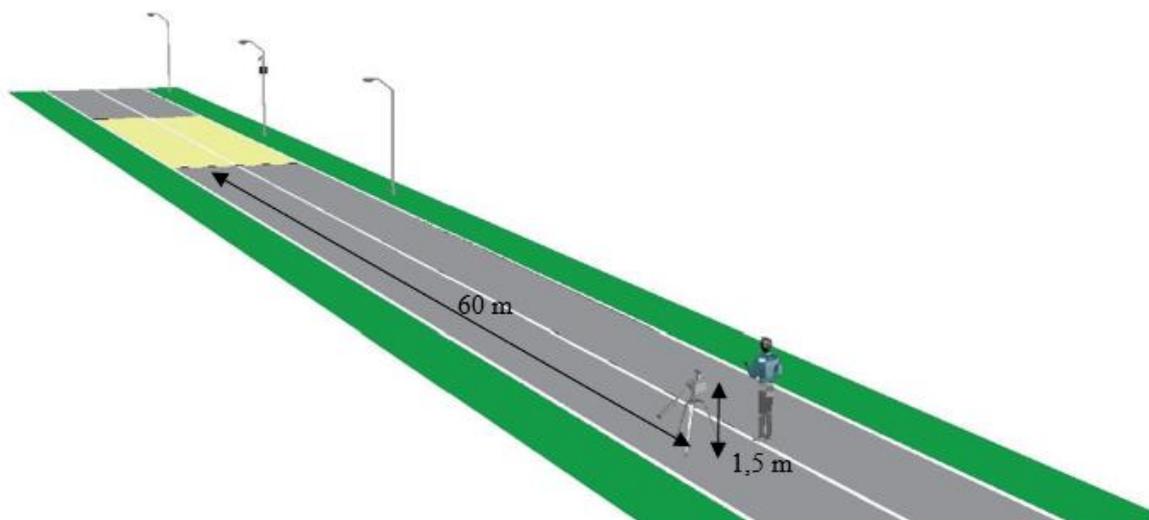


Figura 50 - Acquisizione immagine con il videofotometro dalla corsia di sinistra nel caso di Via Torre de Cavalli

Le immagini acquisite attraverso il videofotometro sono state successivamente elaborate mediante il programma “*Lmk LabSoft*” ed è stata applicata la funzione “street view”, ottenendo il valore della luminanza in ogni punto di calcolo e il valore della luminanza media dell’area di riferimento (in cd/m^2).

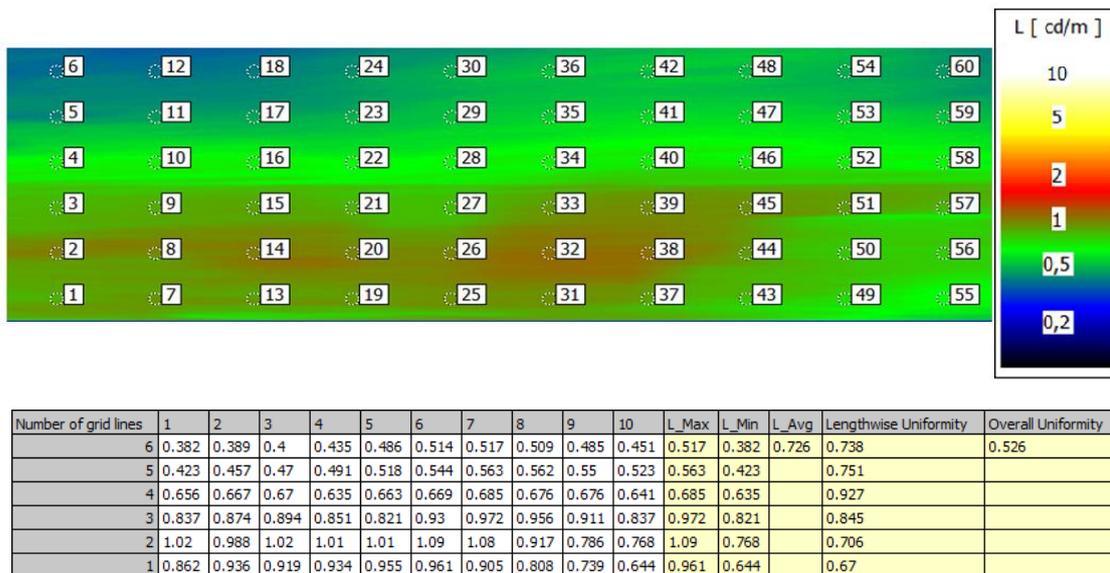


Figura 51 – Esempio di elaborazione con *LabSoft* per la corsia di destra (livello di regolazione del flusso luminoso pari al 10%)

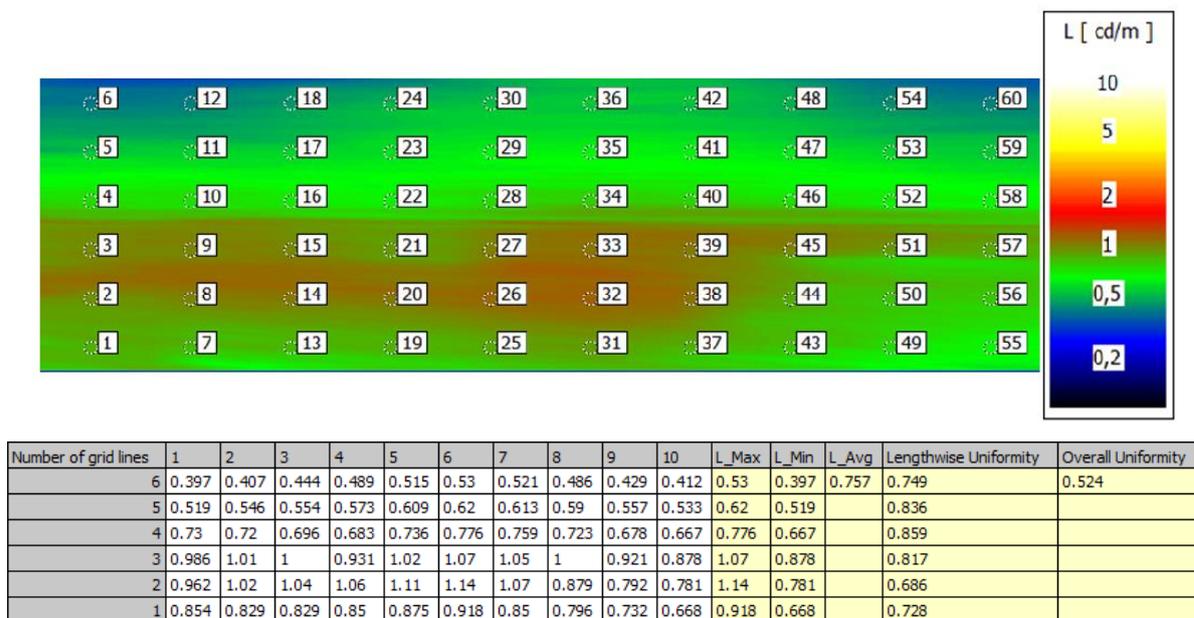


Figura 52 – Esempio di elaborazione con *LabSoft* per la corsia di sinistra (livello di regolazione del flusso luminoso pari al 10%)

In funzione dei valori di luminanza ottenuti mediante l'elaborazione delle immagini acquisite attraverso il videofotometro e quelli registrati dalla sonda di luminanza installata sul palo, è stato possibile calcolare un fattore di correlazione k per ogni livello di regolazione del flusso luminoso, dividendo il valore della luminanza della sonda L_s per il valore della luminanza minima $L_{v,min}$.

Livello di regolazione del flusso luminoso	Posizione	Luminanza sonda, L_s [cd/m ²]	Luminanza videofotometro, L_v [cd/m ²]	Luminanza minima, $L_{v,min}$ [cd/m ²]	k [-]
10%	Destra	0,68	0,73	0,73	0,934
10%	Sinistra	0,68	0,76		
30%	Destra	1,08	1,26	1,26	0,857
30%	Sinistra	1,08	1,35		
100%	Destra	2,48	3,10	3,10	0,800
100%	Sinistra	2,49	3,40		

Tabella 21 - Valutazione del parametro k nel caso di Via Torre de Cavalli

Tenendo in considerazione l'incertezza di misura associata ai due strumenti (precisamente il 5% nel caso della sonda di luminanza sul palo e il 4,7% del videofotometro), è stato valutato il range di tollerabilità della variazione del fattore di correlazione k (Figura 53).

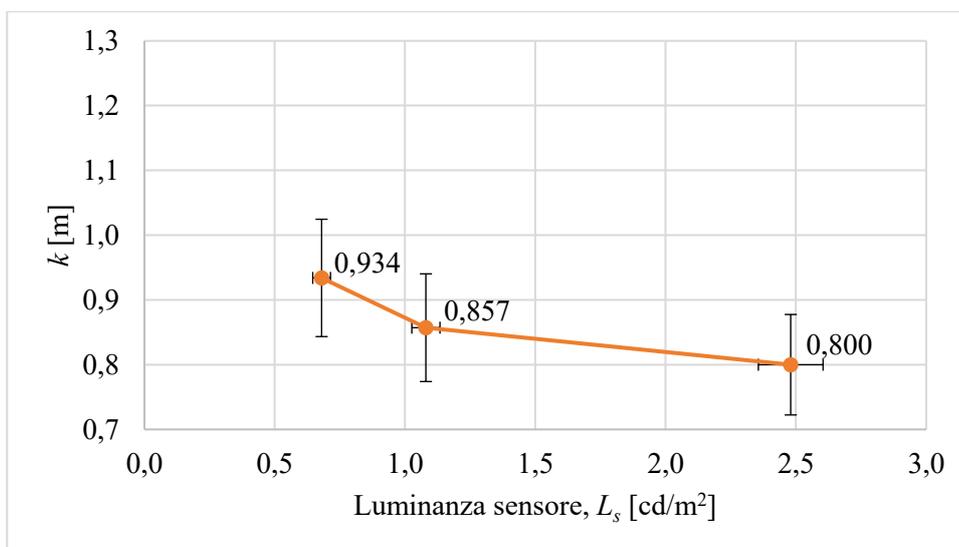


Figura 53 - Andamento del fattore di correlazione k

È stato valutato che anche in questo caso le variazioni relative al fattore di correlazione k per i tre livelli di regolazione del flusso luminoso potessero essere associati esclusivamente all'incertezza degli strumenti. Per ragioni cautelative, al fine di considerare la situazione più sfavorevole (quindi un valore di luminanza L_{norm} minore), il parametro di correlazione k scelto per relazionare le due modalità di calcolo della luminanza media è stato il valore maggiore del fattore di correlazione calcolato per i diversi livelli di regolazione del flusso luminoso, ovvero 0,93. Dividendo il valore della luminanza media L_s per il parametro di correlazione k individuato, si ottiene un valore di luminanza L_{norm} direttamente confrontabile con i requisiti prestazionali (ovvero la luminanza minima mantenuta) definiti dalla *UNI EN 13201-2:2016* per le varie categorie di esercizio per Via Torre de Cavalli.

4.6 Analisi dei dati

L'analisi dei dati raccolti dai sensori installati sui due pali (luminanza media della sonda, numero di veicoli, temperatura dell'aria, umidità dell'aria e condizione di asfalto asciutto o bagnato) è molto importante per la valutazione dell'influenza reciproca delle condizioni al contorno e dell'effettiva influenza di questi parametri sulle prestazioni dell'impianto di illuminazione pubblica del Comune di Savigliano.

L'applicazione della regolazione adattiva richiede che siano noti i dati relativi al flusso veicolare orario e, nel caso di *FAI*, anche della luminanza del manto stradale e delle condizioni atmosferiche. Il vantaggio rispetto ai cicli di funzionamento pre-programmati è che effettuando misurazioni in ogni momento le regolazioni dei flussi non si basano su dati statistici, ma sulle effettive condizioni ambientali.

Come già detto, i dati raccolti vengono mediati sul minuto di acquisizione e vengono diversificati per le due corsie di marcia. Considerando l'intero periodo durante il quale sono stati raccolti i dati (10 settimane, dall'11 settembre al 19 novembre), è stata compiuta un'analisi approfondita per verificare la relazione tra la variazione della luminanza misurata dalla sonda posizionata sui pali e il mutamento delle condizioni esterne. Per esempio, la *Figura 54* mette a confronto l'andamento del valore della luminanza nel caso di asfalto bagnato e nel caso di asfalto asciutto: si può notare come la presenza di asfalto bagnato

modifichi in maniera ragguardevole il valore medio della luminanza della sonda rispetto al caso di asfalto asciutto.

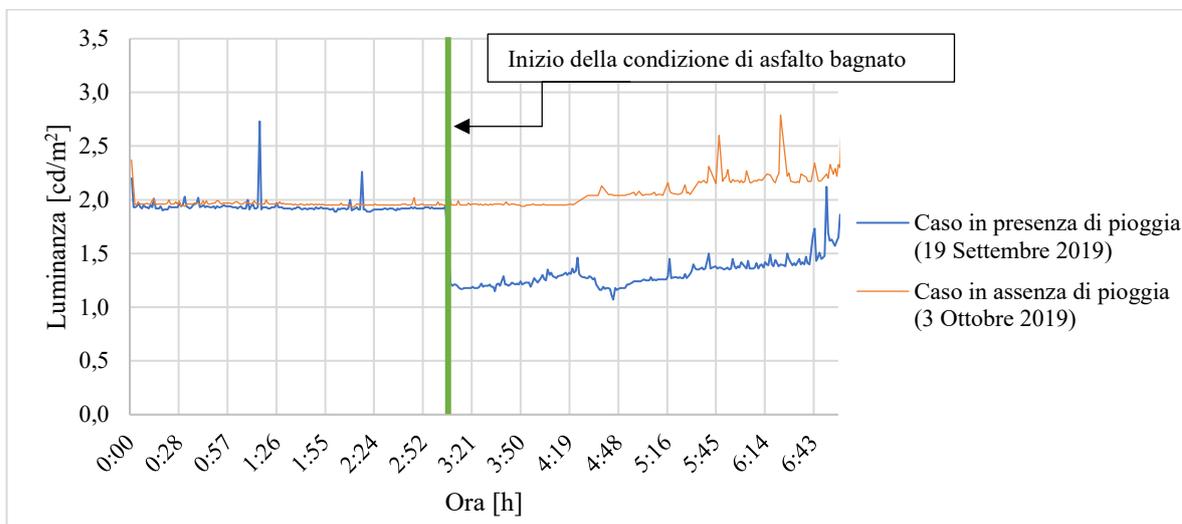


Figura 54 - Influenza della condizione di asfalto bagnato sul valore della luminanza (Corso Romita)

In caso di pioggia o di condizioni avverse, la norma definisce che è compito del progettista individuare la strategia di regolazione da attuare. In linea con quanto enunciato dalla norma, nel caso di Savigliano è stato scelto di transire in via cautelativa a una gestione non adattiva in caso di precipitazioni atmosferiche o nebbia. Così facendo, il flusso luminoso non viene ridotto quando la sicurezza non lo consente: in caso di strada bagnata, infatti, avviene una variazione del valore e dell'uniformità della luminanza, mentre in caso di neve potrebbe verificarsi il fenomeno dell'abbagliamento.

Per quanto riguarda la valutazione della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa, non è stata individuata alcuna relazione diretta tra la variazione di questi parametri e il mutamento del valore della luminanza letta dalla sonda.

È stata valutata l'influenza del numero di veicoli/minuto totali sulla variazione del valore della luminanza registrato dalla sonda installata sui pali, per diverse condizioni di traffico.

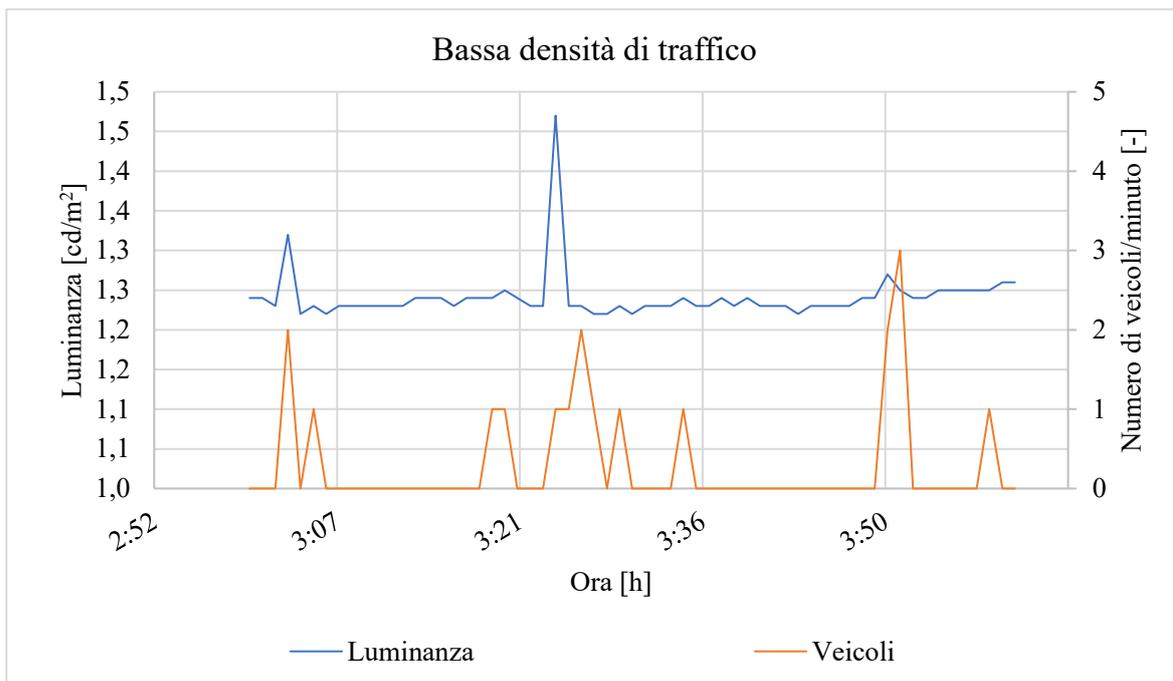


Figura 55 - Influenza del numero di veicoli/minuto sul valore della luminanza (Corso Romita 07/10/2019)

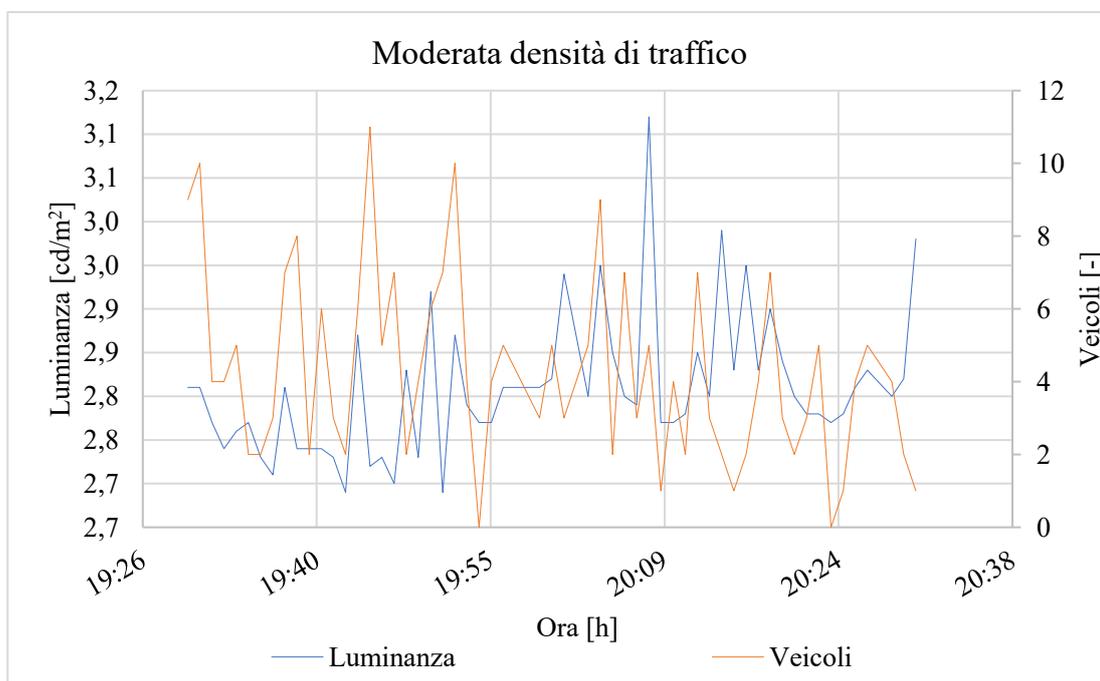


Figura 56 - Influenza del numero di veicoli/minuto sul valore della luminanza (Corso Romita 06/10/2019)

Si può notare come l'incremento del valore di luminanza non sia direttamente proporzionale con il numero dei veicoli/minuto, il che può essere legato a diversi fattori, come ad esempio:

1. la tipologia di veicolo;
2. la velocità del veicolo;
3. l'uso di luci abbaglianti o anabbaglianti;
4. la presenza di pedoni sull'attraversamento pedonale che bloccano momentaneamente il traffico.

Infine, è possibile confrontare l'andamento del valore della luminanza con quello del flusso luminoso emesso dagli apparecchi di illuminazione pubblica, attualmente controllati seguendo una regolazione pre-programmata secondo step orari.

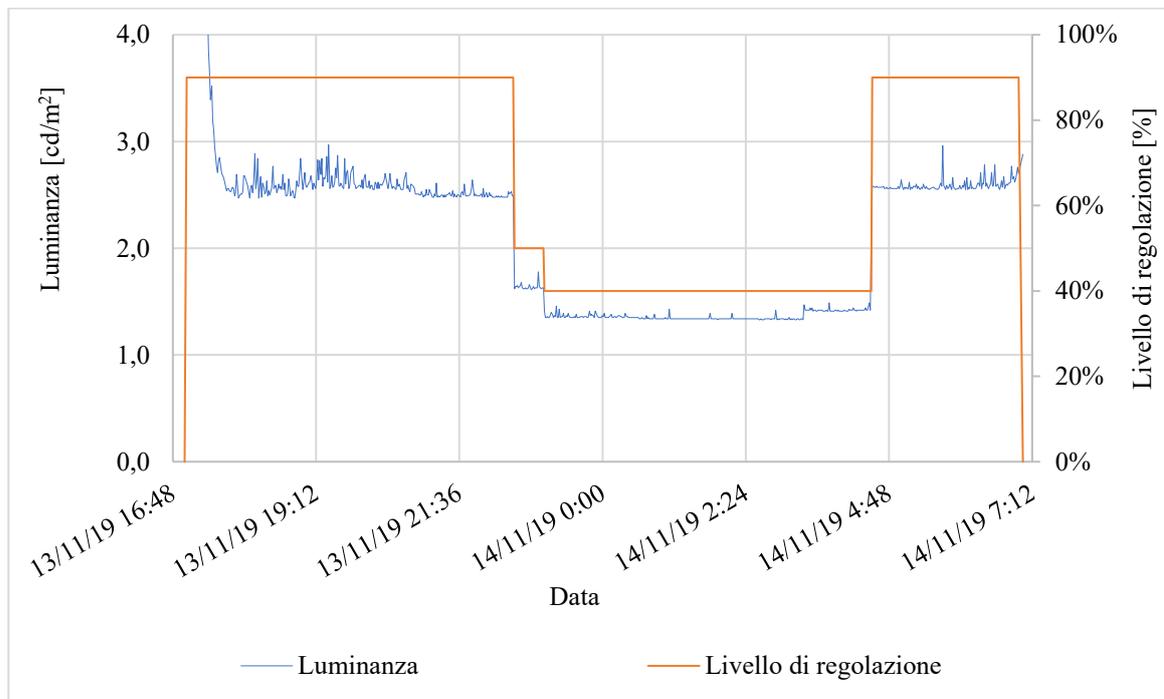


Figura 57 - Relazione tra la luminanza e il livello di regolazione del flusso luminoso (Corso Romita)

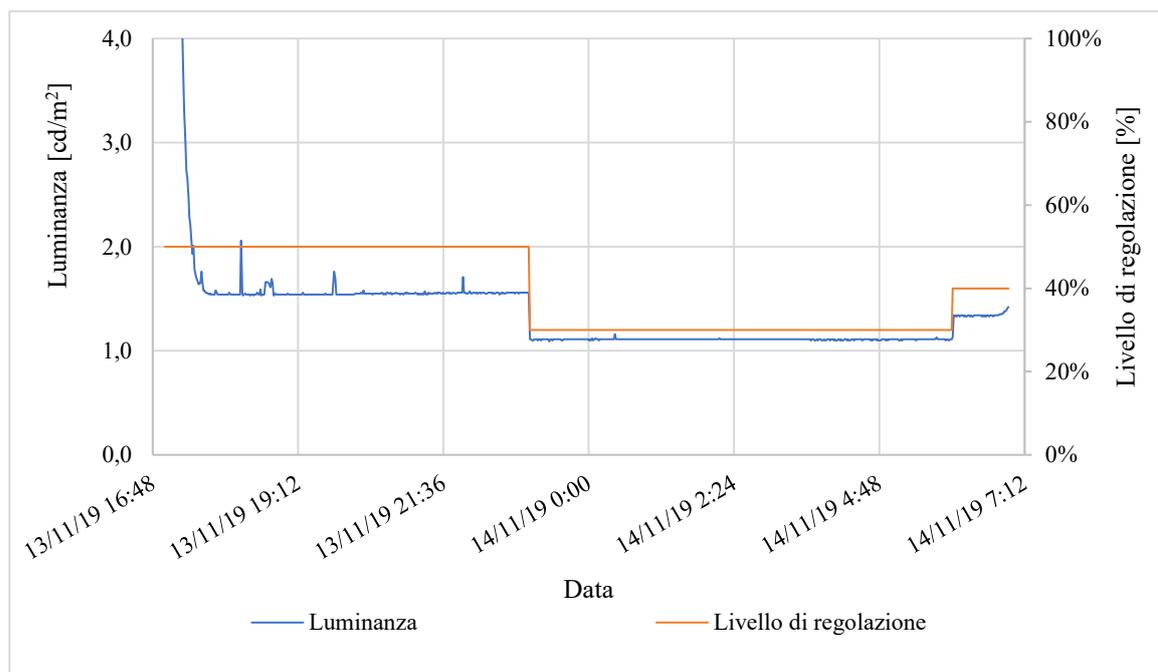


Figura 58 - Relazione tra la luminanza e il livello di regolazione del flusso luminoso (Via Torre de Cavalli)

4.7 Applicazione della regolazione adattiva

Dal momento che il progetto, ad oggi, non risulta completato e non è stata ancora avviata la fase di implementazione in campo della regolazione adattiva di tipo *FAI*, le due modalità di regolazione sono state applicate solo in maniera sperimentale. Difatti, l'unico input considerato nell'algoritmo per calcolare gli andamenti della luminanza minima mantenuta richiesta dalla norma *UNI EN 13201-2:2016* è stato il flusso orario di traffico. Al fine di ricostruire un flusso settimanale orario veicolare di riferimento, per ognuna delle due strade, sono stati analizzati i dati acquisiti dal contatore dei veicoli relativi al monitoraggio continuo di 10 settimane (dall'11 settembre al 19 novembre).

La procedura per la definizione del numero di veicoli/minuto ha richiesto:

1. il confronto del numero dei veicoli/minuto per la corsia di destra e di sinistra di ogni giorno delle 10 settimane, prendendo come valore finale quello maggiore dei due per ogni minuto;

2. il confronto dei valori massimi dei veicoli, minuto per minuto, relativi allo stesso giorno della settimana (lunedì, martedì, mercoledì, ecc.);
3. l'identificazione dei due andamenti settimanali dei veicoli/minuto, considerando una volta il maggiore dei valori massimi dei conteggi/minuto per ogni giorno della settimana e una volta il valore medio dei valori massimi.

Una volta ottenuti questi valori, è stato possibile ricavare i quattro andamenti del flusso orario dei veicoli (considerando il flusso massimo e quello medio per ognuna delle due modalità di regolazione) seguendo le indicazioni riportate nell'Appendice D della *UNI 11248:2016*.

4.7.1 Implementazione della *TAI*

Nel caso degli impianti *TAI* (*Traffic Adaptive Installations*), la definizione della categoria illuminotecnica (o delle categorie illuminotecniche) di esercizio è basata sul campionamento del solo flusso orario di traffico. Il flusso orario di traffico (sia quello medio che quello massimo) è stato calcolato per tutto il periodo di accensione dell'impianto di illuminazione, adottando la seguente procedura:

- a) è stato valutato il numero dei veicoli per un periodo di 10 minuti (definito periodo di conteggio);
- b) è stato moltiplicato per sei il conteggio ottenuto allo step precedente.

Calcolando la percentuale di traffico veicolare orario rispetto alla portata massima di servizio indicata dal Prospetto C.1 dell'Appendice C della *UNI 11248* (pari a 800 veicoli/ora), si ottengono gli andamenti mostrati nelle figure seguenti.

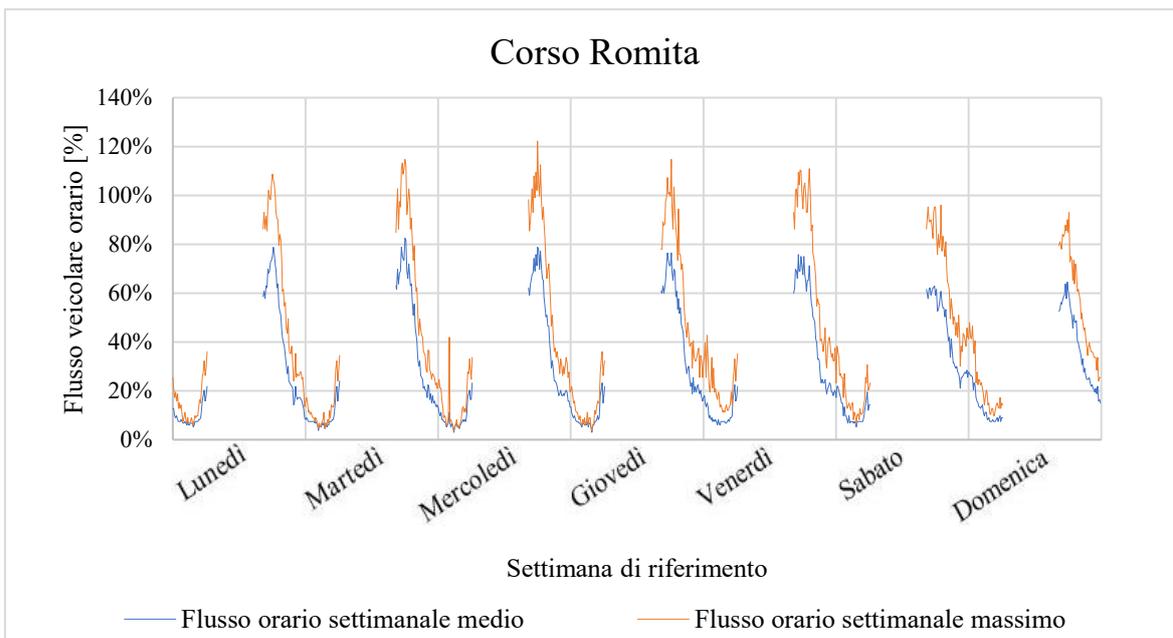


Figura 59 - Percentuale di flusso veicolare orario per l'applicazione della TAI per Corso Romita

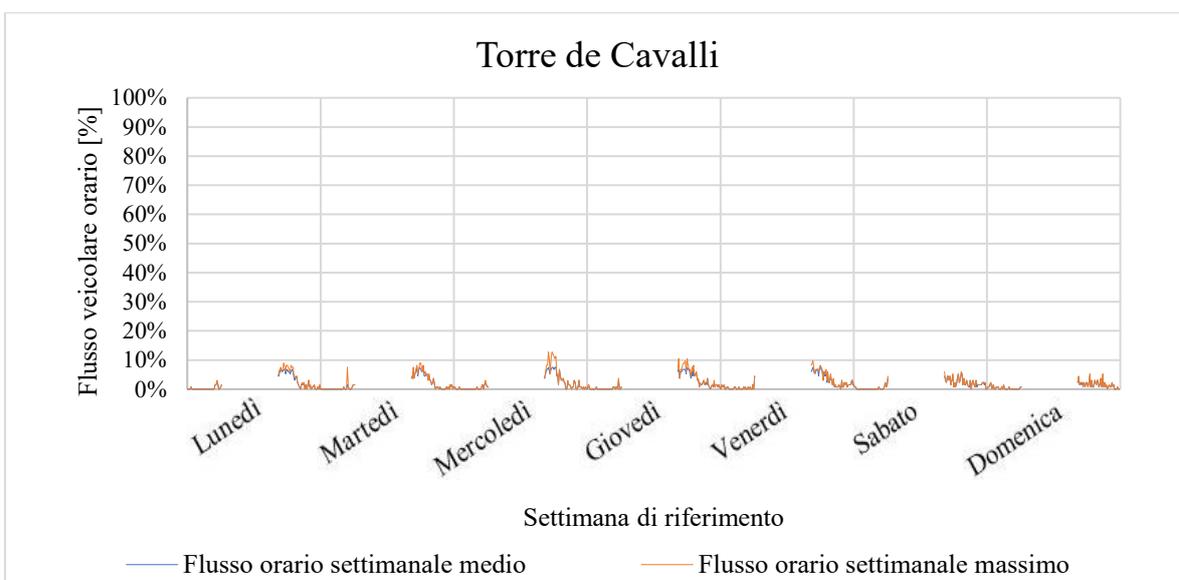


Figura 60 - Percentuale di flusso veicolare orario per l'applicazione della TAI per Via Torre de Cavalli

Durante tutto il periodo di campionamento, è richiesto che venga mantenuto il flusso orario di traffico ammesso per la variazione della categoria illuminotecnica. Per ogni periodo di conteggio, è possibile intervenire modificando una sola categoria illuminotecnica per ottenere la categoria illuminotecnica di esercizio. Inoltre, la norma specifica che:

- se la variazione prevede una riduzione di una categoria illuminotecnica rispetto a quella di progetto, essa viene attivata solo se due campionamenti consecutivi prevedono una riduzione della categoria illuminotecnica;
- se la variazione prevede un incremento della categoria illuminotecnica rispetto a quella di progetto, essa viene attivata al primo campionamento che prevede un incremento della categoria illuminotecnica.

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati dell'applicazione teorica della *TAI* per Corso Romita per un periodo di accensione dell'impianto di illuminazione pubblica di Savigliano (tra lunedì e martedì) delle due settimane di riferimento considerate. La riduzione massima concessa applicando la regolazione adattiva agli impianti *TAI* è pari a 2 categorie illuminotecniche.

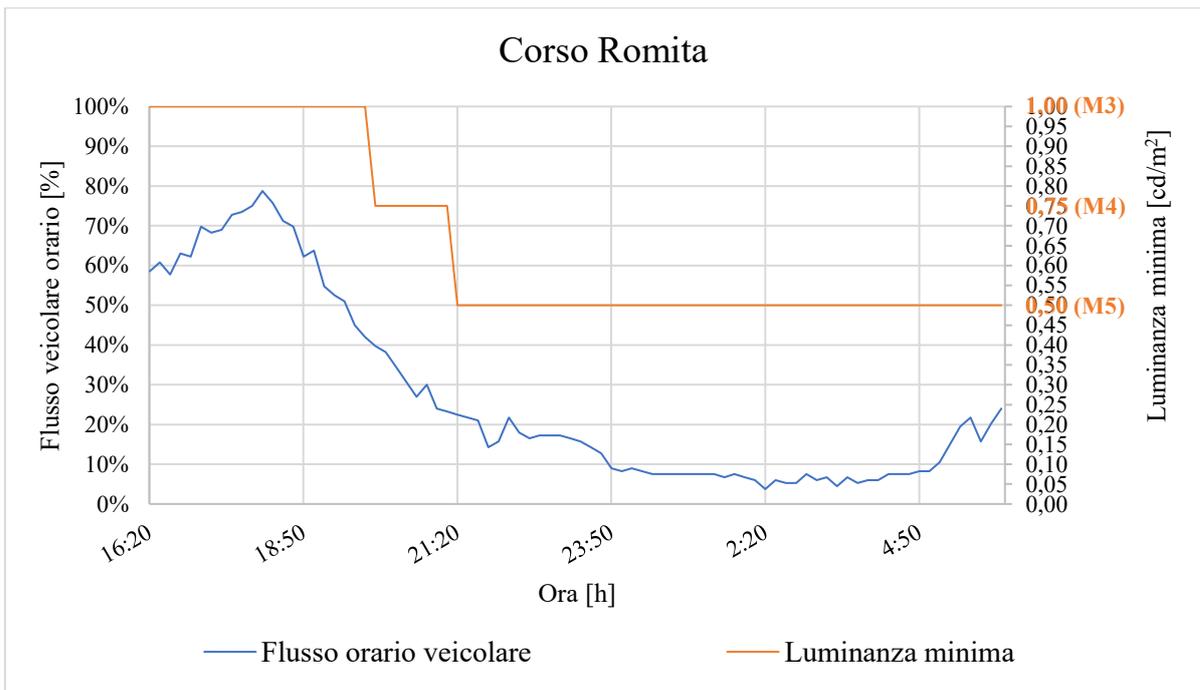


Figura 61 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla *UNI EN 13201-2:2016* (Flusso orario di riferimento medio)

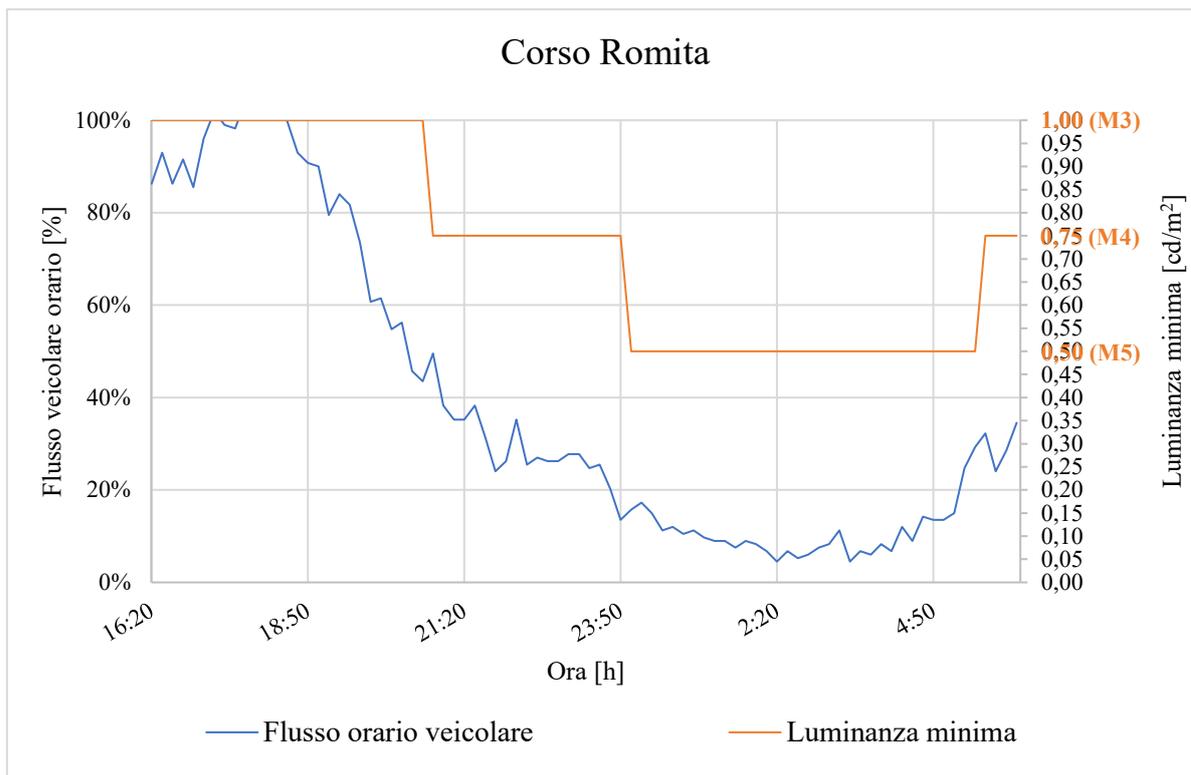


Figura 62 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla *UNI EN 13201-2:2016* (Flusso orario di riferimento massimo)

Partendo dalla categoria illuminotecnica di progetto *M3* (a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $1,00 \text{ cd/m}^2$), il confronto tra il flusso orario veicolare relativo alla settimana di riferimento e la portata massima di servizio (espressa in veicoli/ora) definita dalla *UNI 11248* consente di ottenere le categorie illuminotecniche di esercizio attraverso un processo di declassamento:

- qualora la categoria iniziale fosse la *M3*, se per due campionamenti consecutivi (pari a 20 minuti) la percentuale del flusso veicolare orario fosse inferiore al 50 % della portata nominale, allora è consentito passare ad una categoria illuminotecnica inferiore, ovvero la *M4* (a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $0,75 \text{ cd/m}^2$);
- qualora la categoria iniziale fosse la *M4*, se per due campionamenti consecutivi (pari a 20 minuti) la percentuale del flusso veicolare orario fosse inferiore al 25 % della portata nominale, allora è consentito passare ad una categoria illuminotecnica inferiore, ovvero la *M5* (a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $0,50 \text{ cd/m}^2$).

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati dell'applicazione teorica della *TAI* per Via Torre de Cavalli per un periodo di accensione dell'impianto di illuminazione pubblica di Savigliano (tra lunedì e martedì) delle due settimane di riferimento considerate.

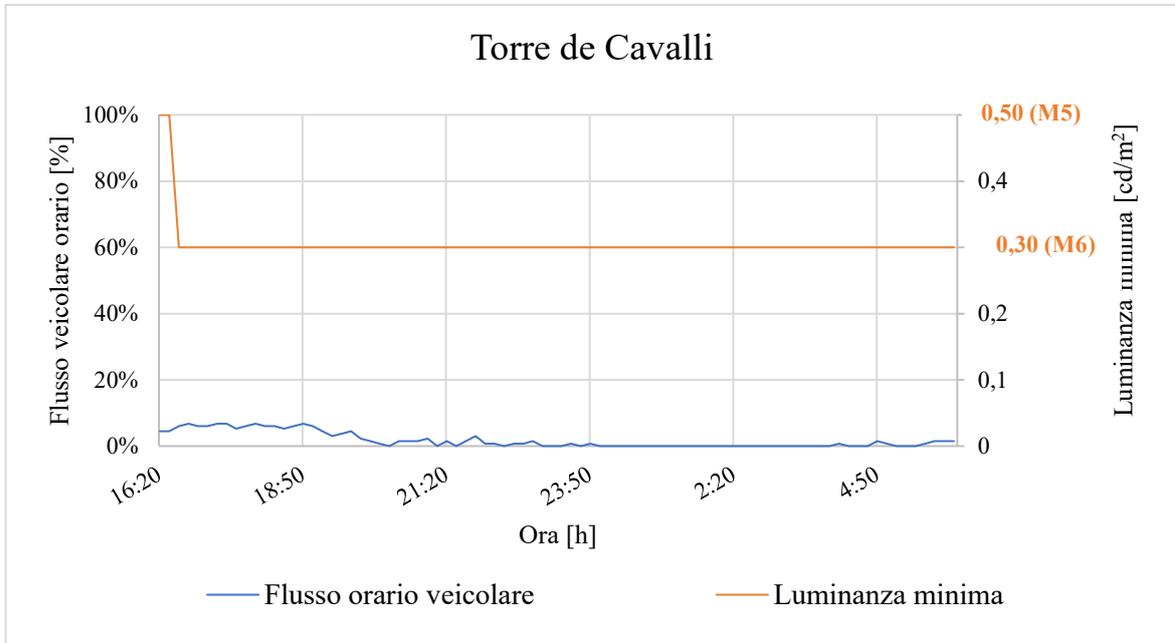


Figura 63 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla *UNI EN 13201-2:2016* (Flusso orario di riferimento medio)

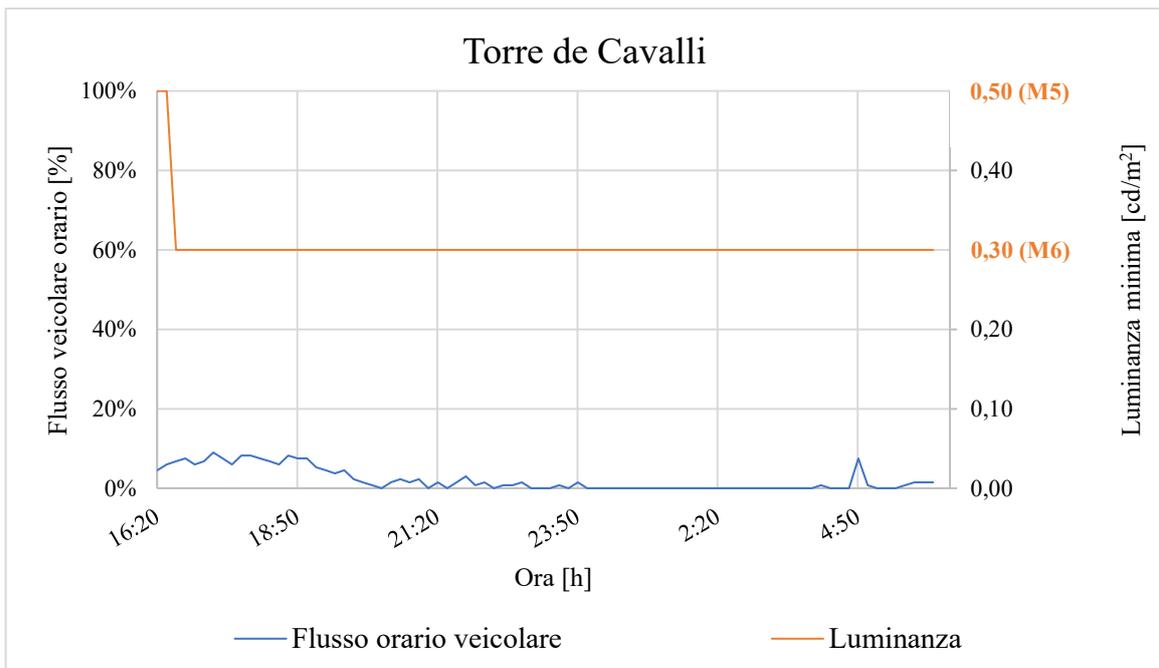


Figura 64 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla *UNI EN 13201-2:2016* (Flusso orario di riferimento massimo)

Partendo dalla categoria illuminotecnica di progetto *M5* (a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $0,50 \text{ cd/m}^2$), il confronto tra il flusso orario veicolare relativo alla settimana di riferimento e la portata massima di servizio (definita dalla *UNI 11248* e espressa in veicoli/ora) consente di ottenere la categoria illuminotecnica di esercizio attraverso un processo di declassamento. In questo caso, se per due campionamenti consecutivi la percentuale del flusso veicolare orario è inferiore al 50 % della portata nominale, allora è consentito passare ad una categoria illuminotecnica inferiore, ovvero la *M6* (a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $0,30 \text{ cd/m}^2$), la quale rappresenta la categoria illuminotecnica di esercizio minima.

4.7.2 Implementazione dell'algoritmo *FAI*

La definizione della categoria illuminotecnica (o delle categorie illuminotecniche) di esercizio per gli impianti *FAI* (*Full Adaptive Installations*) avviene mediante il campionamento continuo del flusso di traffico, delle condizioni atmosferiche e della luminanza del manto stradale. Nell'ambito del progetto *ELF, Eurix* si è occupata dello sviluppo dell'algoritmo di base per la regolazione adattiva *FAI* dell'illuminazione stradale previsto dalla normativa *UNI 11248:2016*. È stato definito un processo decisionale che potesse determinare, minuto per minuto, il valore ottimale della potenza delle lampade dell'impianto di illuminazione del Comune di Savigliano, tenendo conto dei dati raccolti dai sensori relativi al flusso di traffico, alle condizioni meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa dell'aria, asfalto asciutto o bagnato) e alla luminanza del manto stradale.

Le fasi principali del processo decisionale adottato dall'algoritmo per il controllo dell'illuminazione pubblica in ottica di regolazione adattiva sono:

Fase 1 - Determinazione dei parametri di input

Gli input necessari per la regolazione adattiva *FAI* di un tratto di impianto di illuminazione sono:

1. i conteggi di traffico veicolare al minuto per ciascuna delle corsie servite dall'impianto di illuminazione;
2. la misura della luminanza media del tratto di strada illuminato e la sua incertezza relativa di misura;
3. l'informazione sulla presenza/assenza di fenomeni metereologici impattanti l'affidabilità delle misure e/o richiedenti una strategia di regolazione meno spinta;
4. il flusso orario nominale di traffico per il tratto di strada illuminato;
5. la categoria illuminotecnica di progetto e la minima categoria illuminotecnica di esercizio, attribuite al tratto di strada illuminato secondo il documento di analisi dei rischi.

Fase 2 - Determinazione del flusso orario di traffico

Per gli impianti di illuminazione adattivi con la funzionalità *CP – Constant Performance* (ovvero i sistemi denominati *FAI*), il flusso orario di traffico deve essere determinato mediante la seguente procedura:

- a) conteggiare per 1 minuto i veicoli in transito lungo ciascuna delle corsie servite dal singolo impianto di illuminazione;
- b) calcolare la media aritmetica degli ultimi 10 campioni, ossia degli ultimi 10 minuti, per ciascuna delle corsie servite (media mobile);
- c) scegliere come rappresentativo il valore massimo dei conteggi medi al minuto sulle corsie;
- d) moltiplicare per 60 il conteggio medio massimo al minuto al fine di stimare il flusso orario di traffico.

Calcolando la percentuale di traffico veicolare orario rispetto alla portata massima di servizio indicata dal Prospetto C.1 dell'Appendice C della *UNI 11248*, si ottengono gli andamenti mostrati nelle figure seguenti.

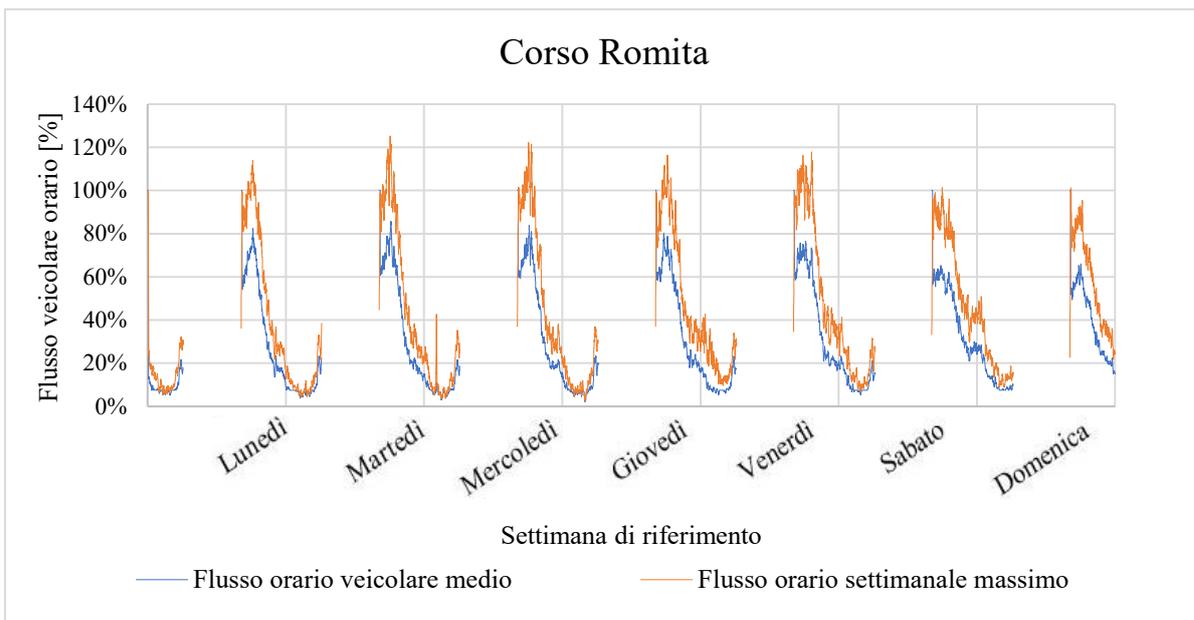


Figura 65 - Percentuale di flusso veicolare orario per l'applicazione della *FAI* per Corso Romita

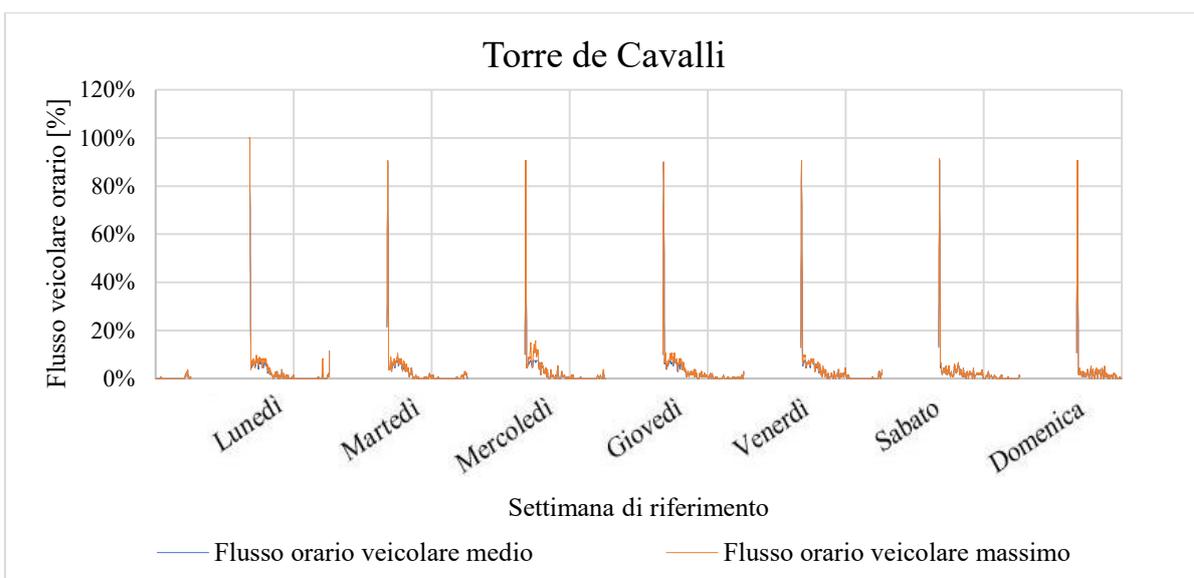


Figura 66 - Percentuale di flusso veicolare orario per l'applicazione della *FAI* per Via Torre de Cavalli

Fase 3 - Determinazione della luminanza ottimale

Il valore stimato del flusso orario di traffico determina continuamente (minuto per minuto) il valore di luminanza media da attuare, ottenuto mediante l'interpolazione lineare tra la luminanza della categoria illuminotecnica di progetto (corrispondente a un flusso orario di traffico pari al 100%) e la luminanza dell'ultima categoria di

esercizio permessa, in base a quanto stabilito nella valutazione dei rischi. Oltre al flusso orario di traffico, il sistema di regolazione deve anche tenere conto dell'occorrenza di precipitazioni meteorologiche o nebbia, che rappresentano delle condizioni debilitanti notturne; infatti, in caso di pioggia non è possibile adottare una regolazione adattiva.

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati dell'applicazione della *FAI* per Corso Romita, considerando come input solo il flusso orario di traffico, per un periodo di accensione dell'impianto di illuminazione pubblica di Savigliano (tra lunedì e martedì) delle due settimane di riferimento considerate.

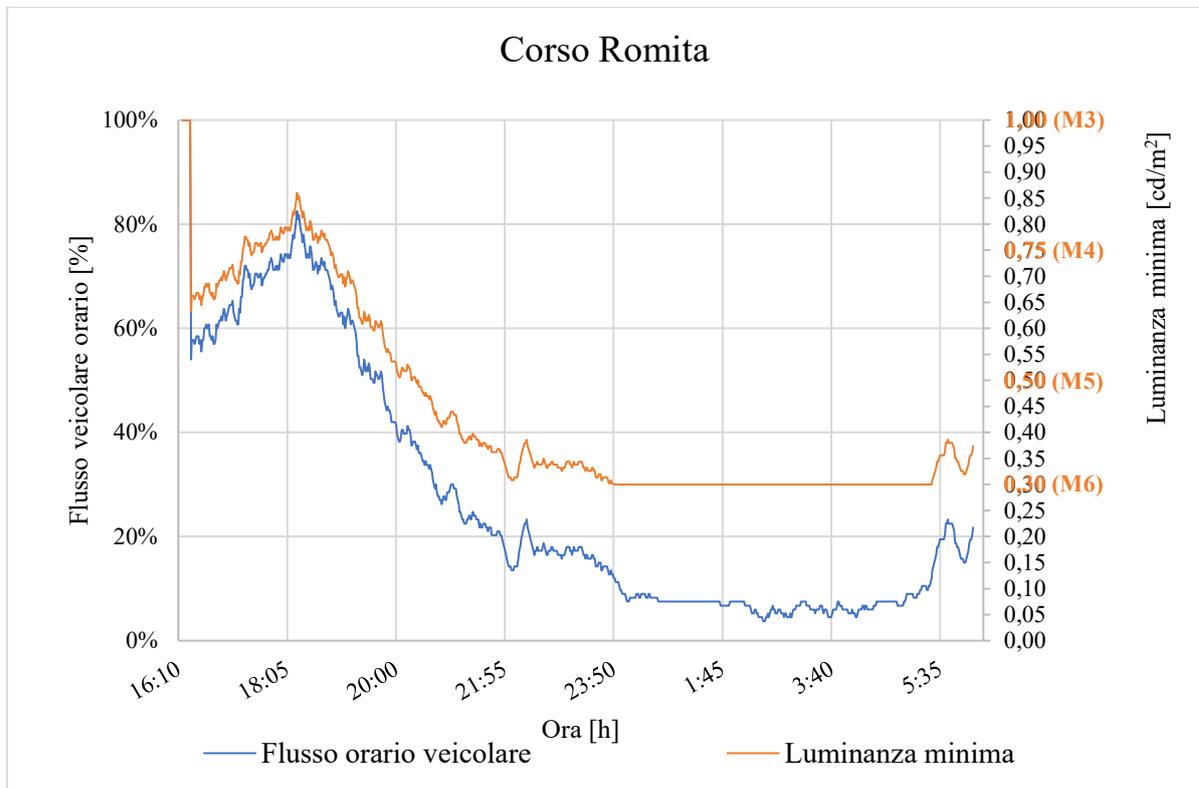


Figura 67 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla *UNI EN 13201-2:2016* (Flusso orario di riferimento medio)

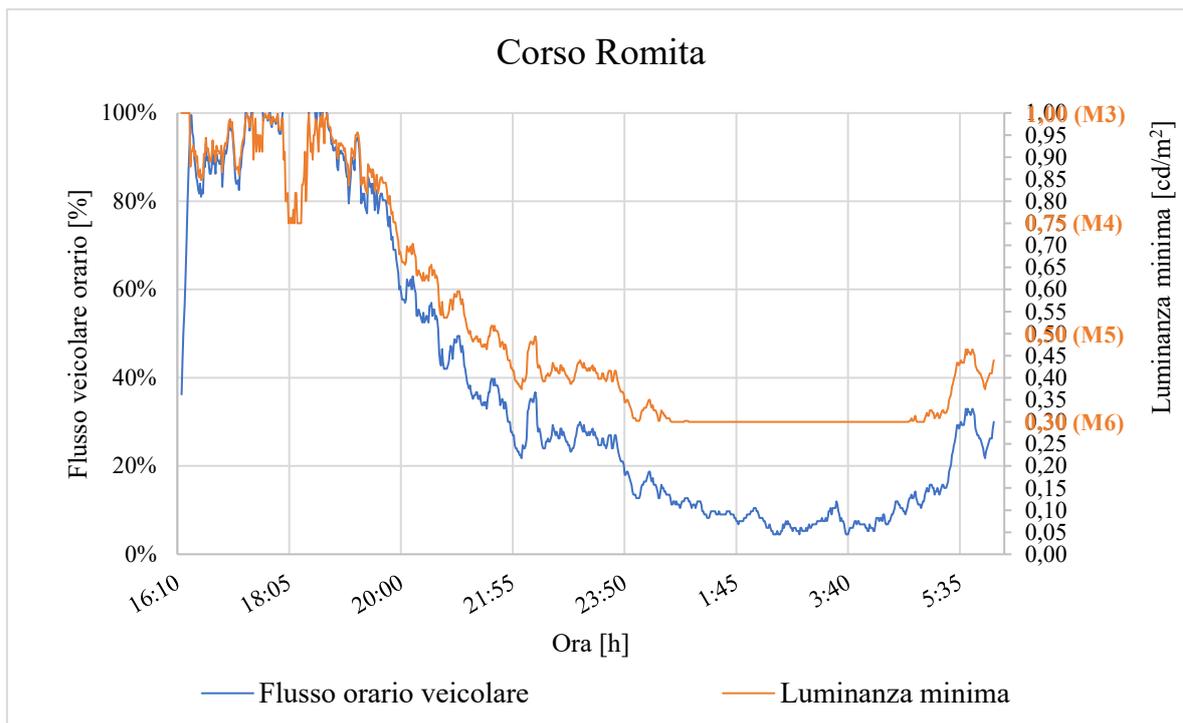


Figura 68 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla *UNI EN 13201-2:2016* (Flusso orario di riferimento massimo)

Nel caso di applicazione della regolazione adattiva per gli impianti *FAI*, la media mobile del flusso orario di traffico consente di valutare, in maniera continua, la riduzione del valore di luminanza media ottenuto mediante l'interpolazione lineare tra la categoria illuminotecnica di progetto (in questo caso la *M3*, a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $1,00 \text{ cd/m}^2$) e l'ultima categoria di esercizio permessa secondo la valutazione dei rischi (in questo caso la *M6*, a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $0,30 \text{ cd/m}^2$). La riduzione massima concessa applicando la regolazione adattiva agli impianti *FAI* è pari a 3 categorie illuminotecniche.

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati dell'applicazione della *FAI* per Via Torre de Cavalli, considerando come input solo il flusso orario di traffico, per un periodo di accensione dell'impianto di illuminazione pubblica di Savigliano (tra lunedì e martedì) delle due settimane di riferimento considerate.

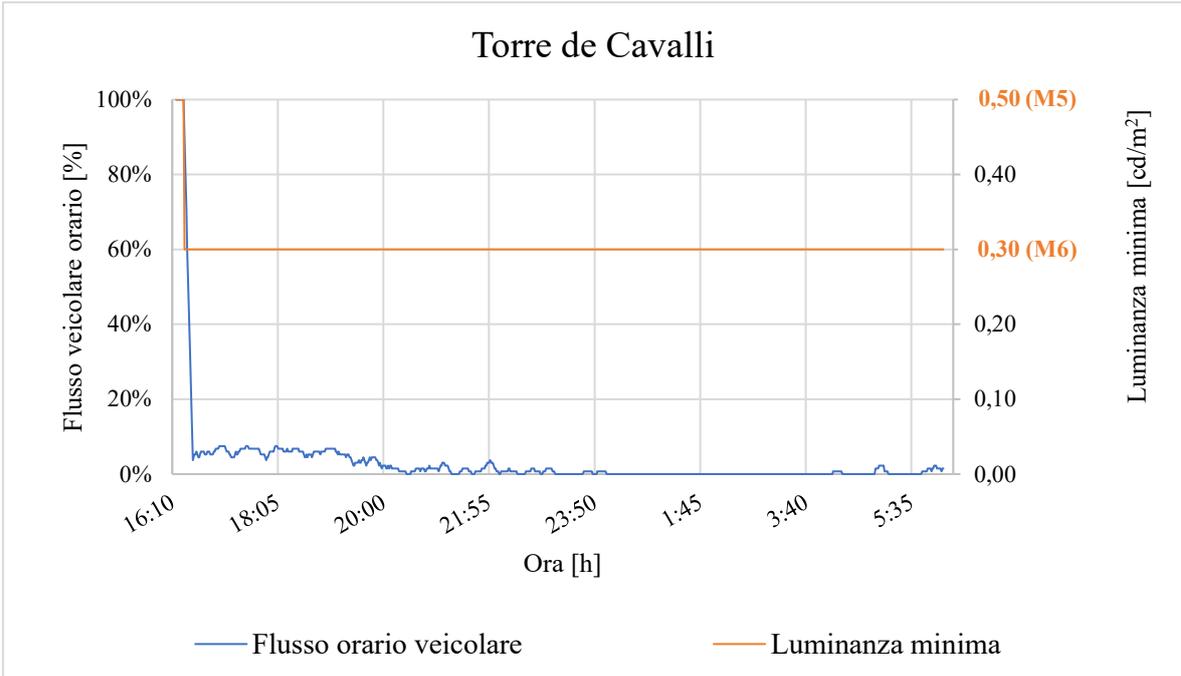


Figura 69 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla UNI EN 13201-2:2016 (Flusso orario di riferimento medio)

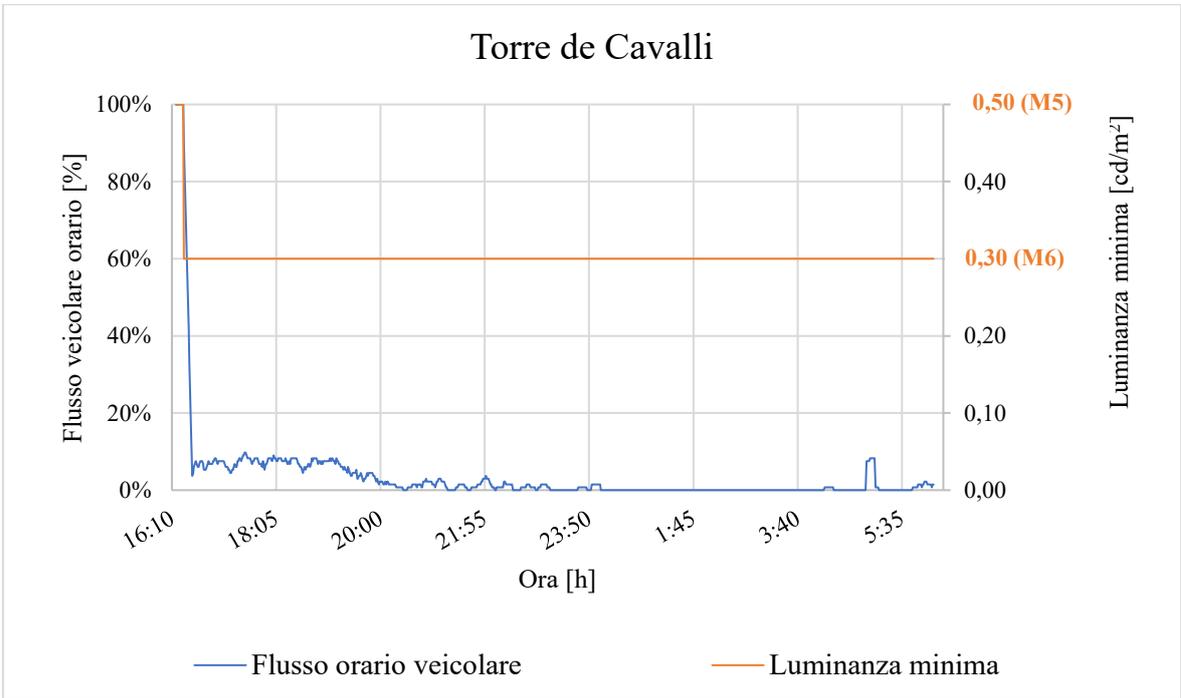


Figura 70 - Relazione tra il flusso orario veicolare e la luminanza minima richiesta dalla UNI EN 13201-2:2016 (Flusso orario di riferimento massimo)

La media mobile del flusso orario di traffico consente di valutare, in maniera continua, la riduzione del valore di luminanza media, ottenuto mediante l'interpolazione lineare tra la categoria illuminotecnica di progetto (in questo caso la *M5*, a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $0,50 \text{ cd/m}^2$) e l'ultima categoria di esercizio permessa secondo la valutazione dei rischi (in questo caso la *M6*, a cui corrisponde un valore di luminanza minima mantenuta pari a $0,30 \text{ cd/m}^2$). La riduzione massima concessa applicando la regolazione adattiva agli impianti *FAI* è pari a 3 categorie illuminotecniche, ma in questo caso è possibile declassare la categoria illuminotecnica di progetto di una sola categoria.

4.7.3 Valutazione dei risparmi energetici

A causa del fatto che il progetto non è stato ancora completato e non è stata ancora avviata la fase di implementazione in campo della regolazione adattiva di tipo *FAI*, è stato possibile stimare i soli risparmi teorici conseguibili a seguito dell'applicazione delle modalità di regolazione adattiva. Inoltre, durante la fase sperimentale del progetto *ELF*, è emerso che l'impianto non era stato originariamente progettato per implementare l'illuminazione adattiva e quindi, ad oggi, la regolazione dell'impianto non consente di raggiungere il valore minimo di luminanza mantenuta definito dalla *UNI EN 13201-2:2016*, in base alla nuova analisi dei rischi e alla logica di implementazione della *FAI*. Valutando i parametri di influenza variabili nel tempo in modo periodico o casuale, dovrebbe essere possibile ottenere dei declassamenti della categoria illuminotecnica di progetto (e quindi una riduzione della luminanza minima richiesta) laddove il confronto tra il flusso orario di traffico presente rispetto alla portata massima di servizio definita per la tipologia di strada lo richieda.

Per le porzioni dell'impianto di illuminazione di Savigliano considerate, regolando gli apparecchi illuminanti al valore minimo del flusso luminoso permesso dal sistema di regolazione, il valore di luminanza misurato dalla sonda installata sui pali risulta essere maggiore del valore corrispondente alle categorie di esercizio individuate con l'analisi dei rischi. Infatti, impostando un flusso luminoso pari al 10% di quello nominale (corrispondente al valore minimo del flusso luminoso permesso dal sistema di regolazione), il valore corrispondente della luminanza misurata in campo per Corso Romita risulta pari a circa 0,91

cd/m², mentre le categorie di esercizio valutate richiedono un valore pari a 0,75 cd/m² (per la categoria illuminotecnica M4) o addirittura inferiore (per le categorie illuminotecniche M5 e M6). Analogamente, per Via Torre de Cavalli è stato misurato un valore di luminanza pari a 0,68 cd/m², mentre le categorie illuminotecniche di esercizio richiedono un valore pari a 0,50 cd/m² (per la categoria illuminotecnica M5) o inferiore (per la categoria illuminotecnica M6).

Per tali motivi, sia nel caso di *TAI* che in quello di *FAI*, sono state valutate unicamente le luminanze minime mantenute richieste associate alle categorie illuminotecniche di esercizio e non vi è, dunque, un riscontro sul campo della luminanza effettivamente misurata dal sensore; inoltre, nel caso della *FAI*, non sono stati considerati gli effetti relativi alle condizioni meteorologiche e alla luminanza del manto stradale.

Le figure seguenti mostrano il confronto tra gli andamenti della luminanza minima richiesta dalla normativa sull'illuminazione stradale *UNI EN 13201-2:2016* per le diverse modalità di regolazione dell'impianto di Corso Romita.

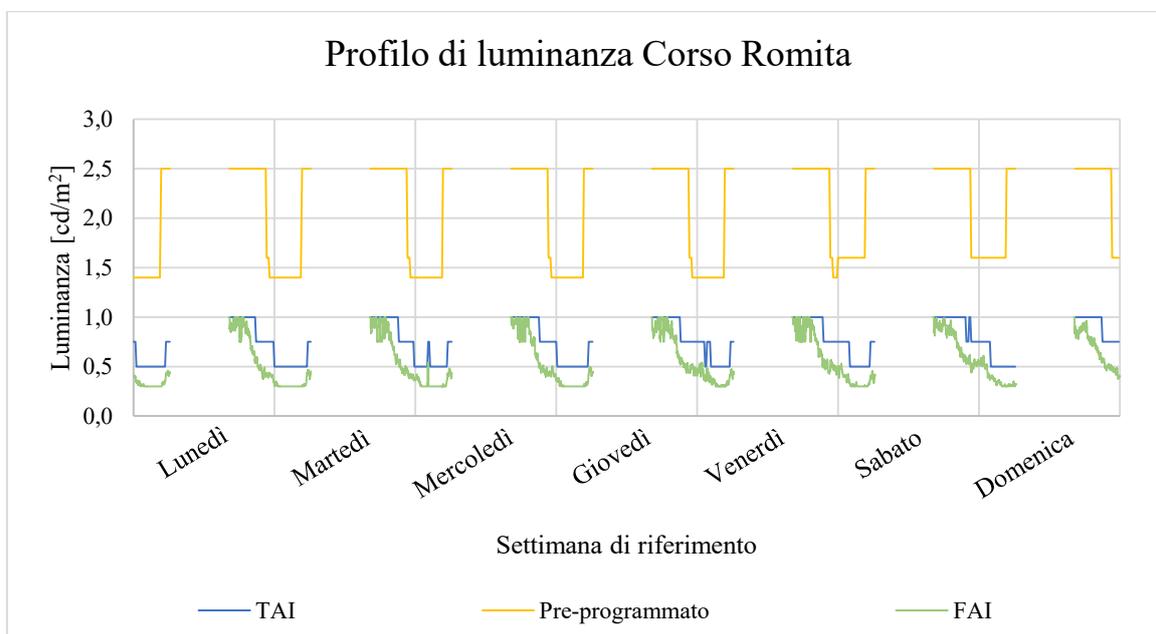


Figura 71 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale massimo)

Il risparmio stimato rispetto all'adozione della regolazione mediante cicli pre-programmati nel caso della valutazione del flusso massimo veicolare orario per Corso Romita è pari al 63,3% applicando la *TAI* e al 73,7% a seguito dell'applicazione della *FAI*.

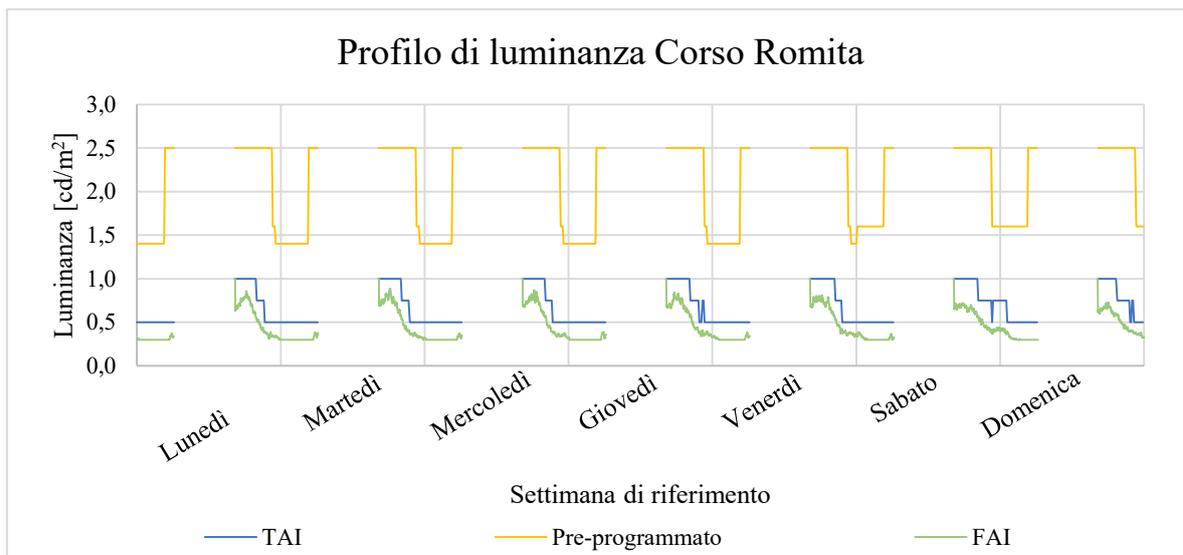


Figura 72 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale medio)

Il risparmio stimato rispetto all'adozione della regolazione mediante cicli pre-programmati nel caso della valutazione del flusso medio veicolare orario per Corso Romita è pari al 67,4% applicando la *TAI* e al 78,3% a seguito dell'applicazione della *FAI*.

Le figure seguenti mostrano il confronto tra gli andamenti della luminanza minima richiesta dalla normativa sull'illuminazione stradale *UNI EN 13201-2:2016* per le diverse modalità di regolazione dell'impianto di Via Torre de Cavalli.

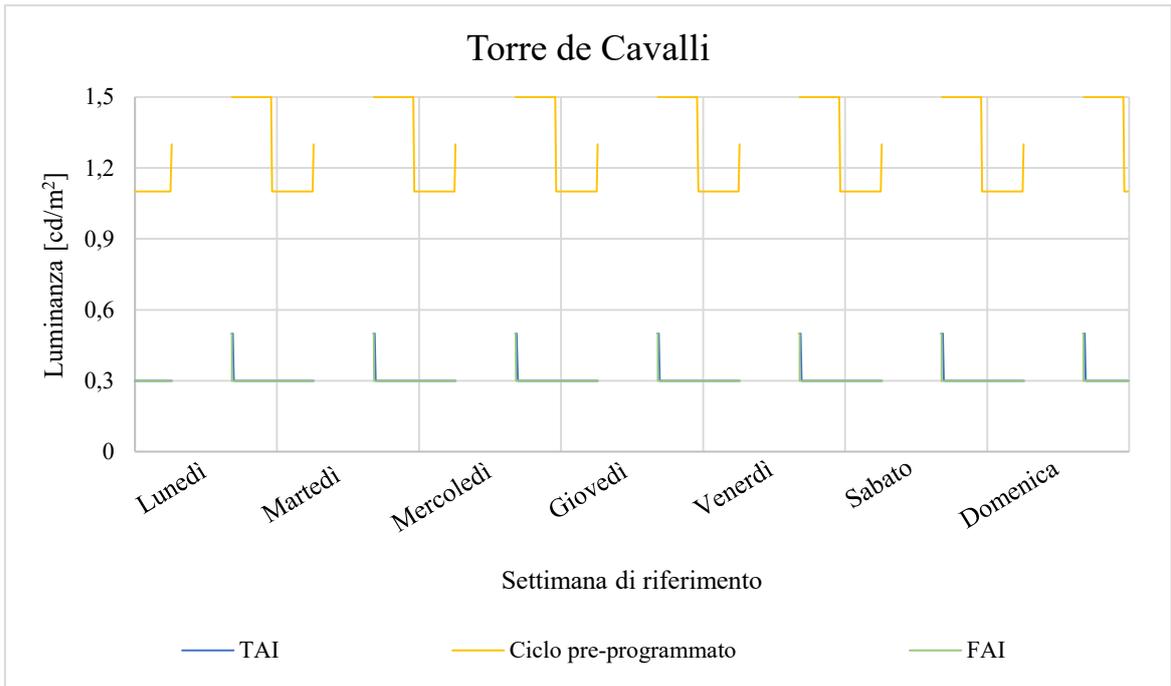


Figura 73 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale massimo)

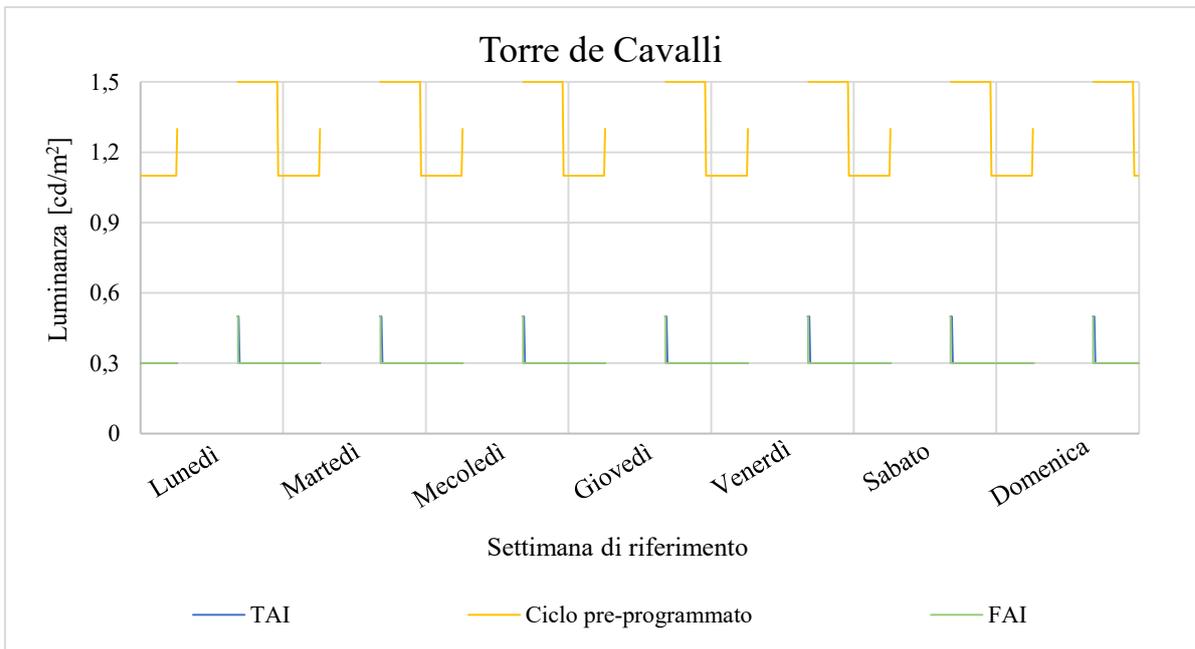


Figura 74 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale medio)

Nel caso di Via Torre de Cavalli, avendo una categoria di progetto *M5* (a cui corrisponde una luminanza minima mantenuta pari a $0,50 \text{ cd/m}^2$), la valutazione dei parametri di influenza variabili in modo periodico o casuale consente di ottenere la riduzione di una sola categoria

illuminotecnica (la categoria di esercizio minima è la *M6* e la luminanza minima richiesta è pari a $0,30 \text{ cd/m}^2$). Poiché per questa strada la densità del traffico è sempre molto ridotta durante il periodo di accensione dell'impianto di illuminazione, l'applicazione delle due tipologie di regolazioni genera delle curve molto simili. Il risparmio stimato rispetto all'adozione della regolazione mediante cicli pre-programmati per entrambi i flussi di traffico orario (massimo e medio) è pari al 76,5% applicando la *TAI* e al 76,7% a seguito dell'applicazione della *FAI*.

A fronte dei risultati ottenuti dall'applicazione delle modalità di regolazione adattiva, considerando esclusivamente il flusso di traffico orario, si possono fare delle considerazioni per le due tipologie di strada.

1. Corso Romita

In generale, confrontando gli andamenti della luminanza minima richiesta ottenuti mediante la regolazione adattiva rispetto agli andamenti attuali ottenuti dall'adozione dei cicli preimpostati, si può affermare che il risparmio energetico stimato è molto significativo. In particolare, l'applicazione della *FAI* consente di ottenere un risparmio di energia maggiore di circa il 10% rispetto alla *TAI*: la valutazione della media mobile consente di determinare continuamente una riduzione del valore di luminanza media corrispondente ottenuto mediante l'interpolazione lineare tra la categoria illuminotecnica di progetto e l'ultima categoria di esercizio permessa. Nel caso di flussi orari veicolari variabili, la *FAI* permette di seguire in maniera più efficiente l'andamento del flusso di traffico e quindi consente di ridurre in maniera considerevole gli sprechi energetici, garantendo la giusta visibilità della strada e la sicurezza dei veicoli.

2. Via Torre de Cavalli

A causa del fatto che è possibile ridurre di un solo livello la categoria illuminotecnica di progetto e avendo sempre un flusso veicolare orario inferiore al 12,5% della portata di servizio (800 veicoli/ora), la simulazione dell'applicazione delle due modalità di regolazione adattiva ha comportato pressoché la stessa riduzione in termini di consumi energetici. Difatti, la luminanza minima richiesta, eccetto che per il primo periodo di

accensione dell'impianto, si mantiene sempre sul valore definito per la minima categoria illuminotecnica di esercizio (0,30 cd/m²).

Il fatto che i risparmi stimati per entrambe le strade siano molto elevati è legato al valore di luminanza media attualmente misurato derivante dall'adozione dei cicli pre-programmati. Emerge, infatti, che il flusso luminoso associato alla regolazione mediante step orari pre-programmati genera un valore di luminanza estremamente maggiore rispetto a quanto richiesto dalla nuova analisi dei rischi. Per tale motivo, alla percentuale di regolazione del flusso luminoso secondo il ciclo pre-programmato è stato associato un valore di luminanza, relativo alla definizione delle categorie illuminotecniche di progetto e di esercizio.

Per esempio, nel caso di Corso Romita, ad una regolazione del flusso luminoso pari al 90% del flusso nominale (che corrisponde alla percentuale massima applicata all'impianto che serve questa strada seguendo il ciclo pre-programmato) è stato fatto corrispondere un valore di luminanza pari a 1,00 cd/m² (pari alla luminanza caratteristica per la categoria illuminotecnica di progetto M3); analogamente è stato fatto per gli altri livelli di dimmerazione secondo il ciclo pre-programmato (definendo il valore di luminanza, per ogni percentuale del flusso luminoso, come rapporto tra la percentuale di regolazione del flusso luminoso e la percentuale massima consentita, ovvero 90%).

Livello di regolazione del flusso luminoso [%]	Livello di luminanza corrispondente [cd/m ²]
90	1,00
50	0,55
40	0,44

Tabella 22 - Luminanza corrispondente ai diversi livelli di regolazione del flusso luminoso per Corso Romita

Nel caso di Via Torre de Cavalli, ad una regolazione del flusso luminoso pari al 50% del flusso nominale (che corrisponde alla percentuale massima applicata all'impianto che serve questa strada con il ciclo pre-programmato) è stato fatto corrispondere un valore di luminanza pari a 0,50 cd/m² (uguale alla luminanza caratteristica per la categoria illuminotecnica di progetto M5) e analogamente è stato fatto per gli altri livelli di dimmerazione secondo il ciclo pre-programmato.

Livello di regolazione del flusso luminoso [%]	Livello di luminanza corrispondente [cd/m ²]
50	0,50
40	0,40
30	0,30

Tabella 23 - Luminanza corrispondente ai diversi livelli di regolazione del flusso luminoso per Via Torre de Cavalli

Gli andamenti delle curve che si ottengono per Corso Romita sono mostrati nelle figure seguenti.

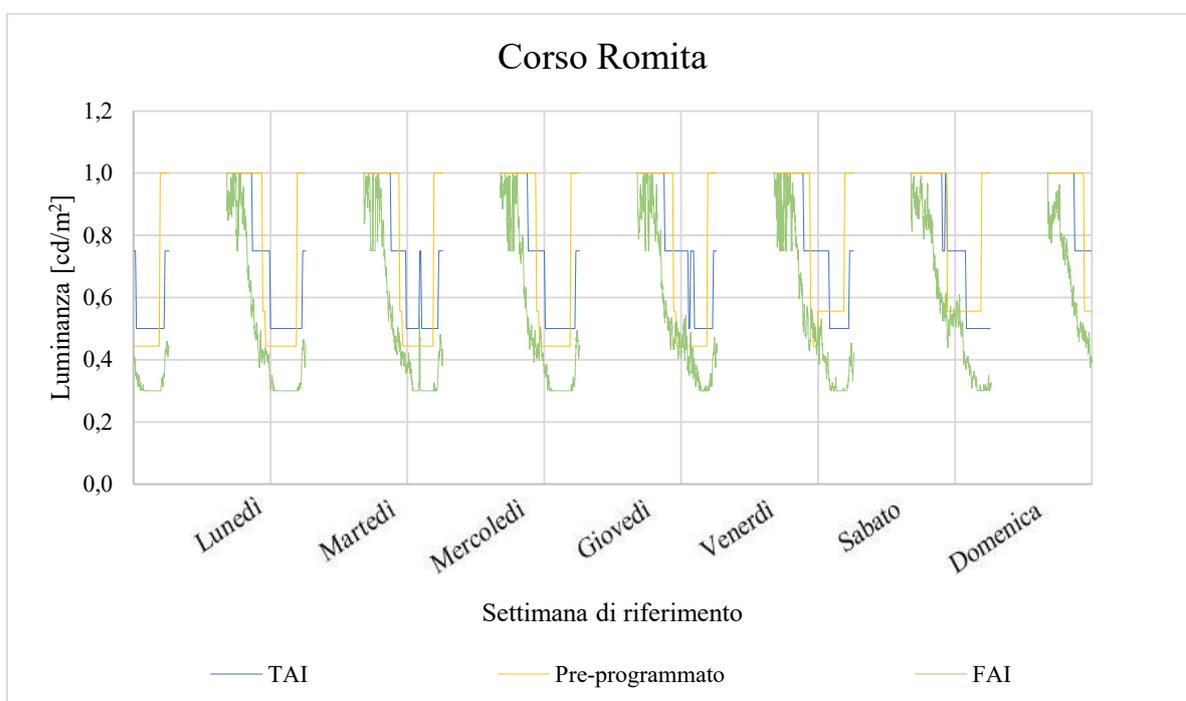


Figura 75 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale massimo)

Il risparmio stimato rispetto all'adozione della regolazione mediante cicli pre-programmati nel caso della valutazione del flusso massimo veicolare orario per Corso Romita è pari al 3,0% applicando la *TAI* e al 30,3% a seguito dell'applicazione della *FAI*.

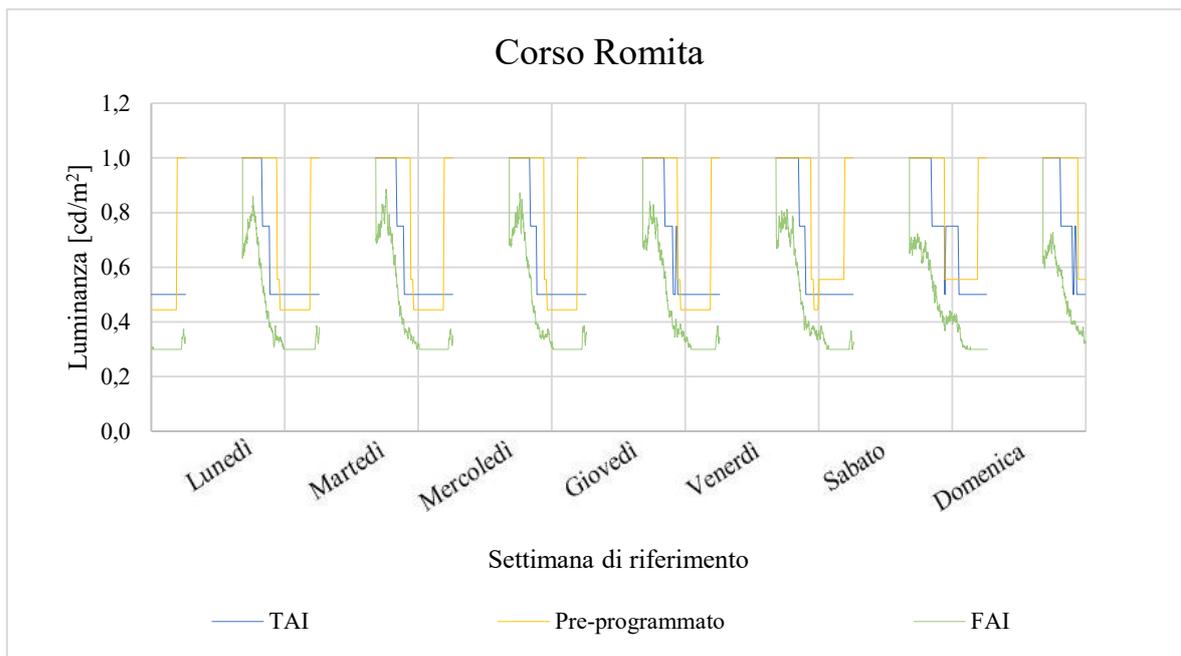


Figura 76 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale medio)

Il risparmio stimato rispetto all'adozione della regolazione mediante cicli pre-programmati nel caso della valutazione del flusso medio veicolare orario per Corso Romita è pari al 13,7% applicando la *TAI* e al 42,6% a seguito dell'applicazione della *FAI*.

Gli andamenti delle curve che si ottengono per Corso Romita sono mostrati nelle figure seguenti.

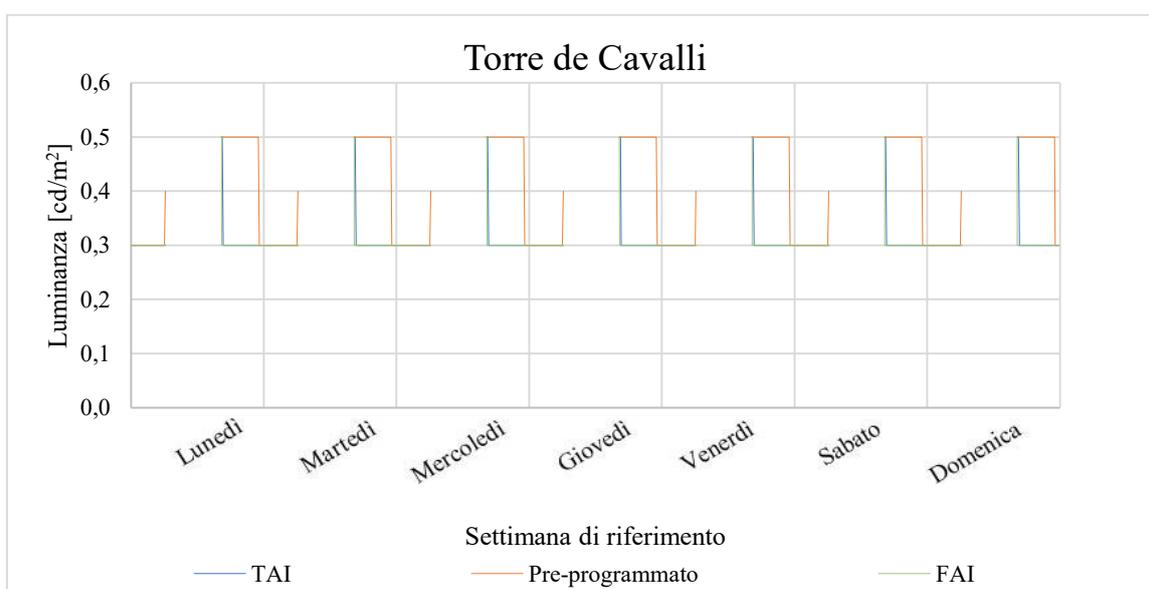


Figura 77 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale massimo)

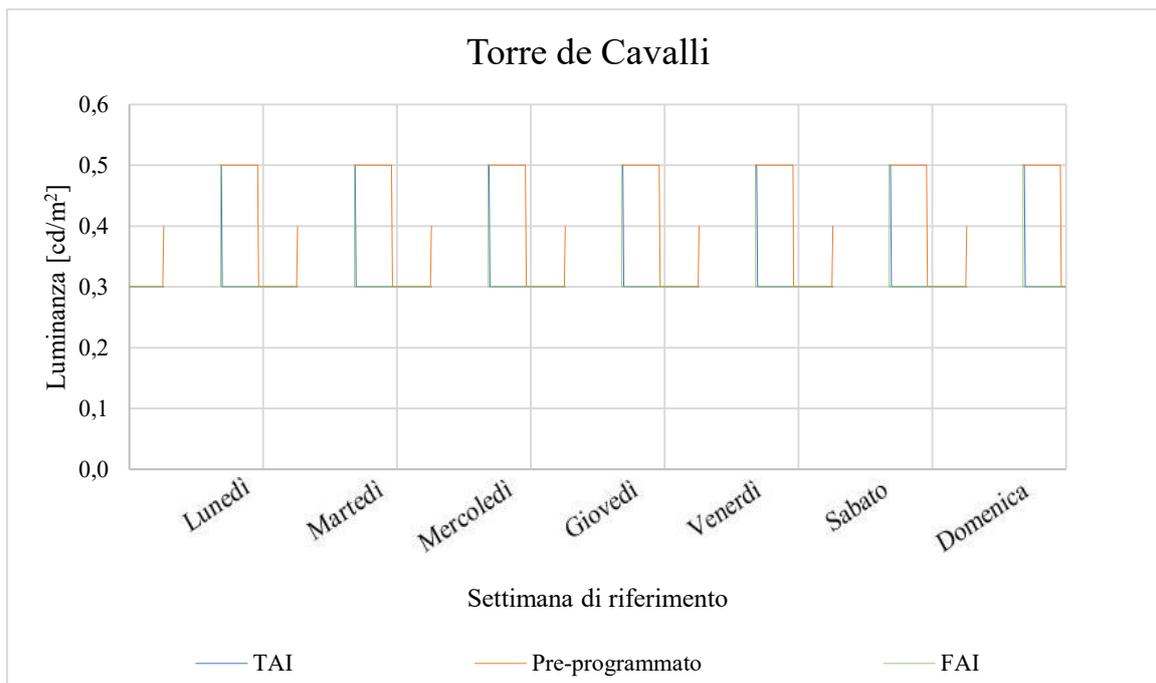


Figura 78 - Andamenti dei valori di luminanza (Flusso orario settimanale medio)

Nel caso di Via Torre de Cavalli, il risparmio stimato rispetto all'adozione della regolazione mediante cicli pre-programmati per entrambi i flussi di traffico orario (massimo e medio) è pari al 23,6% applicando la *TAI* e al 24,2% a seguito dell'applicazione della *FAI*.

A differenza del caso precedente relativo ai valori di luminanza reali, rapportando la luminanza al livello di regolazione del flusso luminoso, i risparmi che si ottengono sono minori, in quanto si spreca meno energia per la regolazione mediante cicli pre-programmati. Per poter ottenere questi valori, è fondamentale rivedere le caratteristiche degli apparecchi di illuminazione e dei sistemi di alimentazione di quest'ultimi, in maniera tale da consentire una riduzione dei valori di luminanza misurata relativi ad una regolazione mediante cicli pre-programmati.

4.8 Considerazioni sulla regolazione adattiva

L'analisi di una porzione circoscritta dell'impianto di illuminazione del Comune di Savigliano interessata dalla sperimentazione del progetto *ELF*, ha portato alla luce degli aspetti inizialmente apparsi irrilevanti, ma sui quali è importante fare delle considerazioni.

1. Progettazione dell'impianto

Generalmente, gli impianti di illuminazione (soprattutto quelli vecchi per i quali non è predisposta la funzionalità *CP*, ovvero che sono in grado di mantenere costante, al valore richiesto, la luminanza o l'illuminamento della superficie stradale nonostante l'invecchiamento degli apparecchi di illuminazione o le condizioni meteorologiche) vengono sovradimensionati durante la fase di progettazione per tenere in considerazione il decadimento del flusso luminoso dovuto all'invecchiamento delle sorgenti. Durante la fase sperimentale del progetto *ELF*, è emerso che l'impianto di Savigliano non era stato progettato per implementare una regolazione adattiva dell'illuminazione. Il sistema di regolazione del flusso luminoso degli apparecchi illuminanti attualmente installati, infatti, non permette di scendere al di sotto di un livello pari al 10% del flusso luminoso nominale. La *Tabella 24* mostra i valori indicati dalla norma per le varie categorie illuminotecniche di esercizio.

Categoria illuminotecnica	M3	M4	M5	M6
Luminanza minima mantenuta [cd/m ²]	1,00	0,75	0,50	0,30

Tabella 24 - Luminanza minima mantenuta secondo la *UNI EN 13201-2:2016*

Sulla base dei valori registrati durante le misurazioni in campo della luminanza, per diversi livelli di dimmerazione, è emerso che con un flusso luminoso pari al 10% di quello nominale (che corrisponde al valore minimo conseguibile con la regolazione degli impianti di Savigliano analizzati), la luminanza ottenuta era pari a 0,91 cd/m² per Corso Romita e 0,68 cd/m² per Via Torre de Cavalli. Risulta evidente, dunque, che applicando in campo la regolazione adattiva, in questo caso, non è possibile raggiungere i valori minimi di luminanza richiesti dalla norma *UNI EN 13201-2:2016*. Considerando la corrispondenza in termini di classi illuminotecniche, questo fenomeno si traduce nell'impossibilità di scendere al di sotto della categoria illuminotecnica *M3* per Corso Romita e al di sotto della categoria *M4* per Via Torre de Cavalli. Per applicare efficacemente la *FAI* bisogna controllare in maniera rigorosa le caratteristiche degli apparecchi o dei sistemi di alimentazione per verificare che questi siano in grado di attuare una regolazione coerente con le classi di esercizio dell'impianto.

2. Posizione della sonda di luminanza

La posizione dei sensori è stata scelta, in questa fase di sperimentazione per la quale non esiste una rete estesa, in funzione della facilità di comunicazione e invio dei dati al cloud. All'atto pratico però, è risultato che la posizione scelta in entrambi i casi non è ottimale per la sperimentazione e l'attuazione della regolazione adattiva. L'inquinamento luminoso generato dai flussi luminosi parassiti, infatti, non ha permesso di valutare in maniera rigorosa l'efficienza dell'impianto di illuminazione pubblica di Savigliano: i flussi luminosi parassiti hanno influenzato il calcolo della luminanza della sonda e di quella calcolata secondo quanto descritto dalla *UNI EN 13201-3:2016* e quindi non è stato possibile misurare la luminanza relativa ai soli apparecchi luminosi.

Nel caso di Corso Romita, la luce proveniente dall'attraversamento pedonale influenza il valore della luminanza letta dal sensore, in quanto parte del flusso luminoso ricade all'interno dell'area di calcolo della luminanza della sonda. Inoltre, come già detto, la presenza di segnaletica in prossimità dell'attraversamento pedonale ha portato a modificare il processo di valutazione della luminanza secondo la norma *UNI EN 13201-3:2016*, a causa delle conseguenze indotte dal raddrizzamento dei cartelli. Il calcolo della luminanza secondo la norma è stato svolto, difatti, considerando come area di calcolo la regione compresa tra il palo caratterizzato dai sensori e quello immediatamente successivo, limitando l'ampiezza trasversale alla singola corsia invece dell'intera carreggiata.

In Via Torre de Cavalli, invece, significativo è risultato essere il contributo del flusso luminoso proveniente dagli edifici circoscritti all'area in cui sono presenti i sensori. In questo caso, è stato necessario alterare la posizione dell'area di calcolo della luminanza secondo la norma *UNI EN 13201-3:2016*, traslandola di una mezza interdistanza. Così facendo, è stato possibile considerare totalmente il contributo della luce parassita sia per l'area ellittica (della sonda di luminanza) che per quella rettangolare (identificata secondo la norma).

Valutando l'estensione della regolazione adattiva ad un tratto più ampio dell'impianto di illuminazione per il Comune di Savigliano, si può affermare che, a causa della luce

parassita presente, le condizioni riscontrate per Corso Romita e per Via Torre de Cavalli non saranno significative per l'intera rete servita dal sistema di illuminazione pubblica.

4.8.1 Linee guida per la progettazione di nuovi impianti adattivi

Le considerazioni esposte precedentemente suggeriscono di prestare molta attenzione alla valutazione dei parametri ambientali durante la fase di progettazione degli impianti adattivi di illuminazione pubblica. Per tale motivo, vengono di seguito riportate delle linee guida che possano facilitare la realizzazione di impianti di illuminazione pubblica adattiva.

Innanzitutto, bisogna avere una conoscenza approfondita dell'area da progettare, sia in termini di componenti degli impianti che di attività tipicamente svolte nelle aree valutate. È fondamentale conoscere preventivamente gli elementi caratterizzanti l'impianto di illuminazione, come ad esempio:

- sorgenti luminose;
- apparecchi di illuminazione;
- modalità di alimentazione elettrica.

Sulla base dell'esperienza del progetto di Savigliano, è di primaria importanza prestare particolare attenzione alla posizione dei sensori installati: bisognerebbe, infatti, scegliere di situare la sensoristica in una zona in cui i dati (flusso di traffico, condizioni al contorno, distanze tra i pali, ecc.) siano quanto più possibili significativi per l'intera linea di controllo gestita in modalità remota. Risulta evidente che, nelle applicazioni reali, è estremamente difficile riuscire a combinare tutti questi aspetti, soprattutto disponendo di un numero limitato di sensori come nel caso di Savigliano. Una soluzione potrebbe essere quella di posizionare i sensori di varia natura (sonda di luminanza, contatore dei veicoli, ecc.) in maniera distribuita coinvolgendo più pali, così che le sonde possano leggere i valori che siano uniformi per tutta la linea di regolazione dell'illuminazione per una determinata area. Poiché il progetto *ELF* ha lo scopo di implementare la regolazione adattiva *FAI* contenendo i costi legati alla sensoristica (utilizzando dei sensori a basso costo e in numero ridotto), risulta ancora più complesso, per il caso di Savigliano, riuscire a far fronte a queste criticità.

Un altro aspetto estremamente importante è legato alla predisposizione dell'impianto di illuminazione esistente ad essere convertito in un più evoluto sistema adattivo. Al fine di permettere ai singoli punti luce di condividere informazioni tra di loro (attraverso la tecnologia *ZigBee*, *6LoWPAN*, *JenNet-IP*, ecc.) e con il centro di controllo (mediante la tecnologia *GSM*, *GPRS*, *LAN*, *Wi-Fi*, ecc.), occorre che il sistema di comunicazione sia abbastanza sviluppato da consentire l'invio dei dati sia a corto raggio che a lungo raggio.

A fronte degli esiti ottenuti dalla simulazione dell'applicazione della modalità di regolazione adattiva, sia *TAI* che *FAI*, risultano evidenti i risparmi teorici ottenibili mediante l'adozione di queste tecnologie partendo dall'attuale profilo di regolazione del flusso luminoso. Come già detto, le analisi sono state condotte considerando solo il flusso orario di traffico ed è emerso che la *FAI* consente di ottenere dei risultati maggiori della *TAI* solo per flussi di traffico variabili in maniera significativa durante il periodo di accensione dell'impianto di illuminazione stradale. Infatti, nel caso di bassa densità di traffico, la stima dei risparmi ottenibili mediante le due tipologie di regolazione porta al medesimo risultato. Tuttavia, le simulazioni sono state effettuate considerando delle condizioni meteorologiche buone: non bisogna dimenticare che l'applicazione in campo della *FAI* consente di valutare anche le condizioni meteorologiche e garantisce che la luminanza campionata sul manto stradale risulti sempre corrispondente con i valori previsti dal progetto.

Infine, è necessario precisare che i dati utilizzati per compiere le valutazioni sull'applicabilità della regolazione adattiva in questo specifico caso sono relativi alle aree risultate essere più sfavorevoli, a causa degli aspetti descritti precedentemente. Disponendo di sensori a basso costo e in numero limitato, la difficoltà dell'applicazione in campo della regolazione adattiva per gli impianti *FAI* è legata alla definizione di caratteristiche geometriche/ambientali significative per l'intero tratto del sistema di illuminazione appartenente allo stesso gruppo di controllo. Se si considera un'applicazione della regolazione adattiva *FAI* estesa all'intera area comunale, diventa pressoché impossibile avere delle zone ampie con caratteristiche costanti relative al flusso di traffico, alle condizioni ambientali circostanti, ai requisiti normativi, alle caratteristiche geometriche delle strade, ecc.

CAPITOLO 5 - Conclusioni

Il sistema di illuminazione stradale riveste un ruolo importante nell'economia di un Paese, in quanto grava in maniera significativa sui bilanci delle Amministrazioni Locali. Per tale motivo, sempre più Comuni hanno intrapreso dei processi di efficientamento energetico e di contenimento dei costi nel campo dell'illuminazione pubblica, sia sviluppando progetti sostenibili e innovativi per i nuovi impianti, sia attuando interventi di riqualificazione e miglioramento delle prestazioni delle reti d'illuminazione pubblica esistenti. Un sistema di illuminazione urbana più efficiente ed innovativo deve basarsi sull'adozione di soluzioni polivalenti, che possano permettere la diffusione e la crescita delle *Smart City*. L'elemento chiave è rappresentato dalla necessità di ridefinire gli spazi urbani in funzione delle esigenze dei cittadini, rendendoli partecipi nella gestione delle città. Lo scopo è quello di migliorare l'erogazione dei servizi offerti e adottare una crescita sostenibile che consenta di ridurre le emissioni in atmosfera di gas climalteranti. Pur non esistendo un'unica designazione di *Smart City*, si può affermare che lo sviluppo delle *TIC* in esse impiegate è fondamentale e implica un percorso continuo di innovazione tecnologica. Ad oggi, in Italia manca la definizione di una metodologia per applicare il concetto di *Smart City* all'interno delle città che permetta di garantire una pianificazione di progetti a medio e lungo termine e il miglioramento della qualità della vita dell'intera popolazione.

Investire nelle *Smart City* significa sfruttare l'impiego dell'*Internet of Things* per migliorare numerosi aspetti delle realtà urbane, come ad esempio il settore dei trasporti, la fornitura di elettricità, l'illuminazione stradale, ecc. Tra i servizi offerti ai cittadini l'illuminazione stradale è sicuramente uno degli elementi più importanti per la progettazione delle città intelligenti. Nel settore dell'illuminazione pubblica, il sistema di telegestione permette di controllare da remoto ogni singolo lampione e quadro elettrico e di monitorare l'operatività e i consumi degli impianti. Al fine di promuovere lo sviluppo delle *Smart City*, le tecnologie adottate nella *Smart Street Lighting* e connesse in rete non devono focalizzarsi esclusivamente sul risparmio energetico e sull'aumento della sicurezza degli utenti della strada, ma il sistema di illuminazione pubblica deve essere pensato come gateway per la diffusione di una vasta gamma di servizi per le città, come ad esempio l'analisi del traffico, il controllo della qualità dell'aria, la videosorveglianza, ecc. Inoltre, come visto, l'applicazione della modalità di

regolazione adattiva agli apparecchi di illuminazione “*intelligenti*”, offre delle notevoli opportunità sia per il risparmio energetico che per il monitoraggio dello stato di funzionamento dell’impianto di illuminazione stradale. Un aspetto fondamentale della *Smart Street Lighting* è l’implementazione del concetto di “energy on demand”, attraverso cui l’illuminazione viene fornita solo quando è necessario e nella misura richiesta. Il palo intelligente, infatti, è in grado di variare il flusso luminoso emesso in funzione dei dati in tempo reale, garantendo un’illuminazione adeguata in ogni situazione di traffico, di luminosità ambientale e di condizioni meteorologiche. Tra i vantaggi che il sistema di regolazione del flusso luminoso in tempo reale è in grado di offrire, vi è la possibilità di ottenere un notevole risparmio energetico e di riduzione delle emissioni di CO₂, limitando l’inquinamento luminoso e garantendo la sicurezza degli utenti della strada.

Durante lo svolgimento dell’attività sperimentale del progetto *ELF*, che riguarda l’implementazione della modalità di regolazione adattiva *FAI* all’impianto di illuminazione del Comune di Savigliano, sono emersi degli aspetti critici che hanno portato alla definizione di alcune raccomandazioni da osservare durante la progettazione e la realizzazione degli impianti adattivi di illuminazione pubblica. Innanzitutto, occorre avere una conoscenza approfondita dell’area da progettare, sia in termini di componenti degli impianti che di attività tipicamente svolte nelle aree valutate. Occorre anche prestare particolare attenzione alla posizione dei sensori installati, in quanto i dati raccolti e valutati devono essere quanto più possibile significativi per tutti i dispositivi appartenenti allo stesso gruppo di controllo. Inoltre, al fine di applicare in maniera corretta la regolazione del flusso luminoso degli apparecchi di illuminazione stradale in funzione dei dati monitorati in tempo reale (traffico veicolare, condizioni meteorologiche, luminanza), occorre che l’impianto sia progettato in maniera tale da permettere l’applicazione del controllo adattivo. Infatti, il sistema di illuminazione deve consentire il raggiungimento del valore di luminanza (per le categorie M) richiesto dalle categorie illuminotecniche di esercizio relative alla classificazione di quella strada specifica. Infine, è importante che l’impianto di illuminazione esistente sia predisposto per essere convertito in un più evoluto sistema adattivo. Al fine di permettere ai singoli punti luce di condividere informazioni tra di loro e con il centro di controllo, occorre che il sistema di comunicazione sia abbastanza sviluppato da consentire la comunicazione dei dati sia a corto raggio che a lungo raggio.

Indubbiamente, per gli impianti di illuminazione adattivi *FAI*, la valutazione continua del flusso di traffico, della luminanza del manto stradale (o illuminamento) e delle condizioni meteorologiche permette di compensare istantaneamente la variazione della luminanza (o dell'illuminamento) dovuta al decadimento del flusso luminoso, all'alterazione delle caratteristiche di riflessione del manto stradale e ai mutamenti delle condizioni atmosferiche ambientali. Attraverso le simulazioni della *TAI* e della *FAI*, considerando come dati in input esclusivamente il flusso orario di traffico di riferimento, sono stati stimati i possibili risparmi energetici ottenibili rispetto alla tradizionale modalità di regolazione basata sui cicli preimpostati. Sia per Corso Romita che per Via Torre de Cavalli, l'adozione della regolazione adattiva consente di ridurre il flusso luminoso emesso e di diminuire di quasi l'80% i consumi rispetto all'attuale impiego. Tuttavia, ricalcolando la luminanza relativa ai cicli pre-programmati riportandola a dei valori corrispondenti alla nuova analisi dei rischi, i risparmi ottenibili sono variabili e dipendono dal diverso profilo di occupazione delle strade individuato (flusso orario settimanale massimo e medio), dalla strada considerata e dalla modalità di regolazione adottata.

In generale, la sperimentazione della regolazione adattiva nell'ambito del progetto *ELF* ha fatto emergere che la modalità di regolazione *FAI* è in grado di adattarsi in maniera più efficiente all'andamento del flusso di traffico nel caso di profili orari veicolari più elevati, generando dei risparmi notevolmente superiori rispetto alla *TAI* e garantendo la giusta visibilità della strada e la sicurezza degli automobilisti. Di contro, è stato evidenziato che, in presenza di una bassa densità di traffico veicolare, le modalità di regolazione *TAI* e *FAI* producono praticamente lo stesso risultato in termini di andamento delle luminanze minime richieste dalla normativa relativa all'illuminazione stradale.

RINGRAZIAMENTI

Giunta al termine del mio percorso universitario desidero ringraziare tutte le persone che, in modi diversi, mi hanno permesso di raggiungere questo importante traguardo.

Innanzitutto, i miei ringraziamenti sono rivolti alla Professoressa Anna Pellegrino, per la sua professionalità e per i suoi preziosi consigli, e all'Architetto Gabriele Piccablotto, per l'aiuto fornitomi durante la stesura della tesi e per la costante disponibilità.

Desidero ringraziare la mia famiglia, il mio punto di riferimento, la quale non ha mai smesso di sostenermi e di incoraggiarmi, soprattutto nei momenti di sconforto: è grazie a voi se oggi posso sentirmi realizzata e non smetterò mai di esservi grata per tutto quello che avete fatto per me.

Una dedica speciale va al mio ragazzo, sempre al mio fianco, che mi ha supportata in ogni momento ed è riuscito a strapparmi un sorriso anche nei momenti difficili. Grazie perché non mi hai mai fatto mancare la tua presenza nonostante i mille impegni, dimostrandomi che l'amore è esserci sempre, qualunque cosa accada.

Infine, grazie a tutti coloro con i quali ho condiviso nuove conoscenze ed esperienze durante questi importanti anni della mia vita.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Iorio, A. Federici, M. L. Bitonti, A. Marchetti. *Ogni chilowattora conta*, II edizione, 2018.
- [2] W. Grattieri, R. Menga. *Linee Guida Operative per la realizzazione di impianti di Pubblica illuminazione*, 2012.
- [3] Agenzia per l'Italia Digitale. *Architettura per le Comunità Intelligenti*, 2012.
- [4] M. Pagliaro. *LED Lighting*, 2014.
- [5] V. Canè, C. Farchi, M. Logorelli, G. Marsico, L. Vaccaro (ISPRA). *Quaderno Ambiente e Società*, 2014.
- [6] V. Albino, U. Berardi, R. M. Dangelico. *Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives*, 2015.
- [7] R. De Santis, A. Fasano, N. Mignolli, A. Villa. *Il fenomeno smart cities*, 2014.
- [8] Report ABB and The European House Ambrosetti, 2012.
- [9] L. Guo, M. Eloholma, L. Halonen. *Intelligent road lighting control systems*, 2008.
- [10] Smart Cities World. *Smart cities: Beyond the hype*, aprile 2019.
- [11] Diademe – *Life-diademe: “Nuovo sistema di regolazione dell’illuminazione stradale sostenibile ed economicamente efficiente”*, 2019.
- [12] Twilight – Reference Project/City Lighting. *Smart City Helmond - Transforming helmond with connected intelligent streetlights*, 2017.
- [13] Smart Cities World Profiles – *San Diego*, novembre 2018.
- [14] M. Annunziato, F. Bucci, C. Meloni, F. Moretti, S. Pizzuti. *Sviluppo sistemi intelligenti per la gestione della “Smart Street”*; Report RdS/2011/198.
- [15] Global Connected (Smart) Street Light Market, 2019.
- [16] Strategies Unlimited – *Connected Outdoor Lighting Report: Lighting Analysis and Forecast 2015*.
- [17] C. Meloni, S. Pizzuti. *L’illuminazione pubblica a servizio della Smart City*, 2017.
- [18] P. Mohandas, J.S.A. Dhanaraj, X.Z. Gao. *Artificial Neural Network based Smart and Energy Efficient Street Lighting System: A Case Study for Residential area in Hosur*, 2019.

- [19] ATIS – *Smart Cities. Technology Roadmap*, 2017.
- [20] Reverberi – Enetec. *Sistemi di telegestione e sensori intelligenti per lo smart lighting e la smart city*, 2018.
- [21] F.Valpreda, P. Iacomussi, G. Rossi. *Innovative design and metrological approaches to smart lighting*, 2019.
- [22] Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency. *Illuminazione stradale a LED - Guida per la progettazione e l'acquisto*, aggiornamento 2018.
- [23] P. Di Lecce, A. Mancinelli, G. Rossi - *Outdoor Adaptive Lighting in the new UNI 11248 Italian Standard and Result of Experience*, 2017.
- [24] UNI 11248: *Illuminazione stradale e selezione delle categorie illuminotecniche*, 2016.
- [25] UNI EN 13201 – Parte 2: *Requisiti prestazionali*, 2016.
- [26] UNI EN 13201 – Parte 3: *Calcolo delle prestazioni*, 2016.
- [27] UNI EN 13201 – Parte 4: *Metodi di misurazione delle prestazioni fotometriche*, 2016.
- [28] UNI EN 13201 – Parte 5: *Indicatori delle prestazioni energetiche*, 2016.
- [29] Agenzia per l'Italia Digitale. *Architettura per le comunità intelligenti: visione concettuale e raccomandazioni alla Pubblica Amministrazione*, Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2012.
- [30] AEC – Illuminazione smart e connessa. *Smart system: Crea la città del futuro*, maggio 2018.
- [31] Associazione Nazionale Produttori Illuminazione – *Illuminazione urbana intelligente: Gestione intelligente dell'illuminazione urbana stradale*, I Edizione giugno 2015.
- [32] EGEA – *Bilancio Sociale*, 2018.
- [33] Schréder. *Owlet IoT – Soddisfa oggi le esigenze di domani*, 2016.
- [34] Schréder. *Owlet Nightshift – Smart control for efficient lighting*, 2014.
- [35] Y.S. Chang, R.K. Sheu, G.T. Wu. *Control point locating scheme of street light network in urban environment*, 2017.

SITOGRAFIA

- [1] www.agenda-digitale.it
- [2] www.ilcamicebianco.com
- [3] www.medicinaonline.co
- [4] www.tuttochimica.it
- [5] www.currerimultimedia.com
- [6] www.elemania.altervista.org
- [7] www.forcolinilighting.it
- [8] www.luciassociation.org
- [9] www.weldilluminaazione.it
- [10] www.iot-analytics.com
- [11] www.population.un.org
- [12] www.voltimum.it
- [13] www.age.world
- [14] www.ec.europa.eu
- [15] www.hella.com
- [16] www.inform.tmforum.org
- [17] www.iea.org
- [18] www.a2ailluminazionepubblica.eu
- [19] www.lumi4innovation.it
- [20] www.rinnovabili.it
- [21] www.smartlightingproject.it
- [22] www.sandiego.gov
- [23] www.schreder.com
- [24] www.comlight.no

APPENDICE – SCHEDE TECNICHE

[A] AXIS P1447-LE

Datasheet



AXIS P1447-LE

Fully-featured, all-around 5 MP surveillance

AXIS P1447-LE Network Camera is a cost-effective, all-around camera providing excellent image quality at full frame rate in 5 megapixel resolution and in 16:9 format. Fully-featured with Lightfinder, OptimizedIR and Forensic WDR, forensic details are captured even in challenging light conditions including low light and strong backlight. Outdoor-ready with a wide temperature range, this sturdy and impact resistant camera has shock detection and is ready for extreme temperatures. AXIS P1447-LE offers easy installation with remote zoom and focus for fine tuning of the picture. With Axis Zipstream, I/O and audio support, AXIS P1447-LE got you covered.

- > 5 megapixel resolution in full frame rate
- > Ease of installation
- > Forensic WDR, Lightfinder, and OptimizedIR
- > I/O and audio support
- > Axis Zipstream technology



ONVIF® | S G



AXIS P1447-LE

Camera		Pre- and post-alarm video or image buffering for recording or upload Notification: email, HTTP, HTTPS, TCP and SNMP trap PTZ: PTZ preset, start/stop guard tour Overlay text, external output activation, day/night mode
Image sensor	1/2.9" progressive scan RGB CMOS	
Lens	2.8–8.5 mm, F1.2 Horizontal field of view 104°–36° Vertical field of view 55°–20° Varifocal, Remote focus and zoom, P-Iris control, IR corrected	
Day and night	Automatically removable infrared-cut filter	
Minimum illumination	Color: 0.15 lux, at 50 IRE F1.2 B/W: 0.03 lux, at 50 IRE F1.2 0 lux with IR illumination on	
Shutter time	1/62500 s to 2 s	
Video		
Video compression	H.264 (MPEG-4 Part 10/AVC) Baseline, Main and High Profiles Motion JPEG	
Resolution	3072x1728 to 160x90	
Frame rate	Up to 25/30 fps (50/60 Hz) in all resolutions	
Video streaming	Multiple, individually configurable streams in H.264 and Motion JPEG Axis Zipstream technology in H.264 Controllable frame rate and bandwidth VBR/MBR H.264	
Multi-view streaming	Up to 8 individually cropped out view areas	
Image settings	Saturation, contrast, brightness, sharpness, Forensic WDR: Up to 120 dB depending on scene, white balance, day/night threshold, exposure mode, exposure zones, compression, orientation: auto, 0°, 90°, 180°, 270° including Corridor Format, mirroring of images, dynamic text and image overlay, privacy masks	
Pan/Tilt/Zoom	Digital PTZ	
Audio		
Audio streaming	Audio in, simplex	
Audio compression	24bit LPCM, AAC-LC 8/16/32/48 kHz, G.711 PCM 8 kHz, G.726 ADPCM 8 kHz, Opus 8/16/48 kHz Configurable bit rate	
Audio input/output	External microphone input or line input	
Network		
Security	Password protection, IP address filtering, HTTPS encryption, IEEE 802.1X network access control, digest authentication, user access log, centralized certificate management	
Supported protocols	IPv4/v6, HTTP, HTTPS, SSL/TLS, QoS Layer 3 DiffServ, FTP, SFTP, CIFS/SMB, SMTP, Bonjour, UPnP, SNMP v1/v2c/v3 (MIB-II), DNS, DynDNS, NTP, RTSP, RTP, SRTP, TCP, UDP, IGMP, RTCP, ICMP, DHCP, ARP, SOCKS, SSH, LLDP	
System integration		
Application Programming Interface	Open API for software integration, including VAPIX® and AXIS Camera Application Platform; specifications at axis.com AXIS Video Hosting System (AVHS) with One-Click Connection ONVIF® Profile S and ONVIF® Profile G, specification at onvif.org	
Analytics	Included AXIS Video Motion Detection Supported AXIS Digital Autotracking, AXIS Perimeter Defender, AXIS Cross Line Detection Support for AXIS Camera Application Platform enabling installation of third-party applications, see axis.com/acap	
Event triggers	Analytics Detectors: live stream accessed, video motion detection, audio detection, day/night mode, shock detection, tampering Hardware: network, temperature Input Signal: digital input port, manual trigger, virtual inputs Storage: disruption, recording System: system ready Time: recurrence, use schedule	
Event actions	Record video: SD card and network share Upload of images or video clips: FTP, SFTP, HTTP, HTTPS, network share and email	
Data streaming	Event data	
Built-in installation aids	Pixel counter, remote zoom (3x optical), remote focus, auto rotation	
General		
Casing	IP66/IP67-, NEMA 4X-, and IK10-rated casing Polycarbonate blend and aluminium Color: white NCS S 1002-B	
Sustainability	PVC free	
Memory	1024 MB RAM, 512 MB Flash	
Power	Power over Ethernet IEEE 802.3af/802.3at Type 1 Class 3 Typical: 6.7 W, max 12.95 W	
Connectors	RJ45 10BASE-T/100BASE-TX PoE 3.5 mm mic/line in I/O: 4-pin terminal block for 1 alarm input and 1 output	
IR illumination	Optimized IR with power-efficient, long-life 850 nm IR LEDs Range of reach 30 m (98 FT) or more depending on the scene	
Storage	Support for microSD/microSDHC/microSDXC card Support for SD card encryption Support for recording to network-attached storage (NAS) For SD card and NAS recommendations see axis.com	
Operating conditions	-40 °C to 60 °C (-40 °F to 140 °F) Humidity 10–100% RH (condensing)	
Storage conditions	-40 °C to 65 °C (-40 °F to 149 °F)	
Approvals	EMC EN 55032 Class A, EN 50121-4, IEC 62236-4, EN 55024, EN 61000-6-1, EN 61000-6-2, FCC Part 15 Subpart B Class A, ICES-003 Class A, VCCI Class A, RCM AS/NZS CISPR 32 Class A, KCC KN32 Class A, KN35 Safety IEC/EN/UL 62368-1, IEC/EN/UL 60950-22 Environment IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2, IEC 60068-2-6, IEC 60068-2-14, IEC 60068-2-27, IEC 60068-2-78, IEC/EN 60529 IP66/IP67, IEC/EN 62262 IK10, NEMA 250 Type 4X, NEMA TS-2-2003 v02.06 Other IEC 62471	
Weight	With weather shield: 1 KG (2.2 lb)	
Dimensions	Ø132 x 260 mm (Ø5 3/16 x 10 1/4 in)	
Included accessories	Installation guide, Windows® decoder 1-user license, drill hole template, connector kit, mounting bracket AXIS Weather Shield L	
Optional accessories	AXIS T94F01M J-Box/Gang Box Plate AXIS T91A47 Pole Mount AXIS T94F01B Corner Bracket AXIS T94F01P Conduit Back Box AXIS Weather Shield K Axis PoE Midspans For more accessories, see axis.com	
Video management software	AXIS Companion, AXIS Camera Station, video management software from Axis' Application Development Partners available on axis.com/vms	
Languages	English, German, French, Spanish, Italian, Russian, Simplified Chinese, Japanese, Korean, Portuguese, Traditional Chinese	
Warranty	Axis 3-year warranty and AXIS Extended Warranty option, see axis.com/warranty	

a. This product includes software developed by the OpenSSL Project for use in the OpenSSL Toolkit (openssl.org), and cryptographic software written by Eric Young (ey@cryptsoft.com).

Environmental responsibility:
www.axis.com/environmental-responsibility



HD 2021T7
HD 2021T6



**HD 2021T7, HD 2021T6
SONDA PER LA MISURA DELLA LUMINANZA DEBILITANTE,
SONDA PER LA MISURA DELLA LUMINANZA**

HD2021T7

La sonda HD2021T7 permette di convertire la grandezza fotometrica "luminanza di velo equivalente" in un segnale di corrente (4...20 mA) o di tensione (0...10 V) a seconda della versione scelta. Se la stazione di acquisizione è lontana dalla sonda (>50m) è necessario utilizzare la versione in corrente.

Il trasmettitore HD2021T7 ha grado di protezione IP67. Al fine di eseguire una misura corretta si deve garantire che la superficie esterna della lente sia pulita. Se necessario la pulizia della lente va eseguita con acqua e carta per obiettivi fotografici.

E' possibile scegliere la sensibilità del trasmettitore su due valori predefiniti; 2000cd/m² o 20000cd/m² da scegliere al momento dell'ordine del trasmettitore. Per ordini di almeno 5 pezzi è possibile la taratura del fondo scala su un valore scelto dal cliente.

La sonda è utilizzata per il controllo dell'illuminazione stradale, in particolare, la misura della luminanza di velo equivalente è indispensabile per stabilire la *luminanza di soglia* all'ingresso delle gallerie (NORMA UNI 11095:2011).

La misura della luminanza debilitante (L_v) è la risultante di quattro componenti:

$$L_v = L_{seq} + L_{atm} + L_{par} + L_{cru}$$

Dove:

L_{seq} è la luminanza di velo equivalente;

L_{atm} è la luminanza atmosferica;

$L_{par} + L_{cru}$ è la luminanza del parabrezza e del cruscotto.

La **luminanza di velo equivalente** (L_{seq}) è misurata in accordo alla norma UNI11095:2005 dalla sonda HD2021T7 come riportato nel rapporto di prova I.N.Ri.M. 08-1199-01. Tale grandezza è misurata e definita a partire da angoli sottili maggiori di 1°.

LC-38

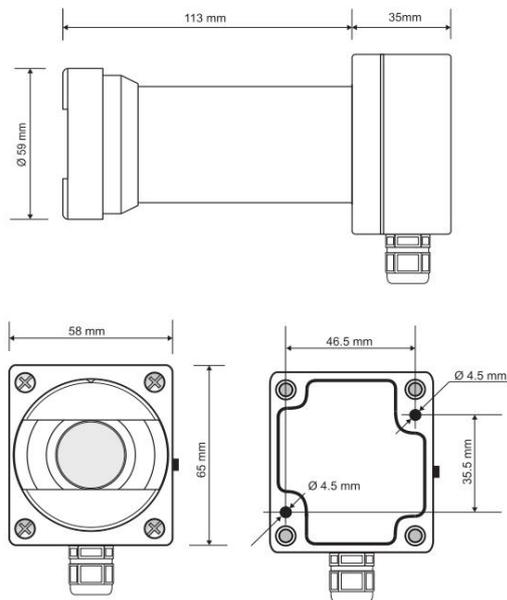
La **luminanza atmosferica** (L_{atm}) può essere calcolata a partire dalla tabella E2.2 della norma UNI 11095 (2011) o misurata con la sonda HD2021T7.2. Il contributo della **luminanza del parabrezza** (L_{par}) + luminanza del cruscotto (L_{cru}) è valutato direttamente inserendo la sonda HD2021T7 in una custodia di protezione. La finestra di interfaccia che separa la sonda dall'ambiente esterno simula il comportamento del parabrezza, pertanto il valore letto dalla sonda nel contenitore è già comprensivo di tale contributo.

CARATTERISTICHE TECNICHE DELLO STRUMENTO

Dimensioni

(Lunghezza x Larghezza x Altezza) 147mm x 58mm x 65mm

Figura 1. Dimensioni della sonda HD2021T7



RISPOSTA SPETTRALE

La sonda usa un fotodiodo al silicio ed una serie di filtri per correggere la curva di risposta spettrale e renderla uguale a quella dell'occhio umano (risposta fotopica). Nella figura 2 è riportato l'andamento della risposta spettrale relativa in funzione della lunghezza d'onda.

$T_1 < 9\%$ In accordo alla curva fotopica standard $V(\lambda)$.

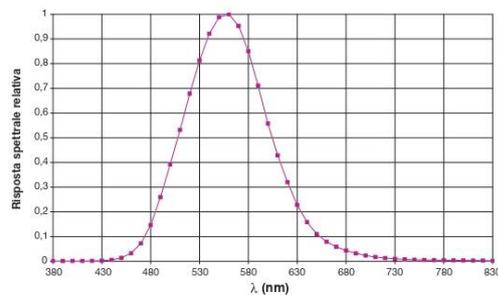


Figura 2. Risposta spettrale relativa della sonda HD2021T7

RISPOSTA ANGOLARE:

La misura della luminanza di velo equivalente (L_v) è valutata a partire dalla seguente formula:

$$L_v = 10 \sum_{\beta=1^\circ}^{\beta=90^\circ} \frac{L(\beta) \cdot \cos(\beta)}{\beta \cdot (\beta + 1.5)} \cdot \Omega \quad \text{A}$$

dove:

$L(\beta)$ è la luminanza di una sorgente di disturbo misurata ad un angolo β ,
 β è l'angolo tra la direzione di puntamento dell'oggetto che si intende guardare e la sorgente di disturbo.
 Ω angolo solido

Nella figura 3 è riportata la sensibilità in funzione dell'angolo della sonda HD2021T7.

Nella norma UNI 11095 la luminanza debilitante è calcolata considerando i contributi sino ad angoli di 28.4°, con la sonda Delta OHM HD 2021T7 si riesce a valutare contributi anche ad angoli più grandi (fino a 40°).

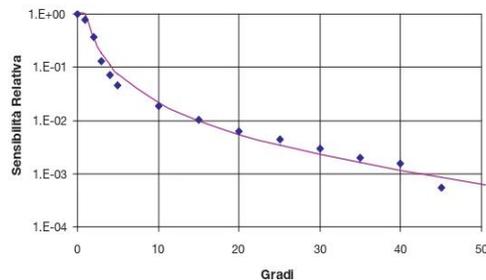


Figura 3. Risposta angolare relativa della sonda HD2021T7

TEMPERATURA DI LAVORO

La sonda può operare in un range di temperature comprese tra -20° e +60° C. Se alloggiata all'interno di contenitori stagni si deve aver cura che non ci siano fenomeni di appannamento o condensa della finestra verso cui si affaccia la sonda. In questo caso la lettura della luminanza di velo equivalente sarebbe alterata e affetta da errori sistematici.

TARATURA

La taratura della sonda HD2021T7 avviene misurando la luminanza sulla porta di uscita di una sfera integratrice con luminanza nota. L'incertezza di taratura della sonda, se richiesta, con fondo scala fisso è del 10% (livello di fiducia del 95%).

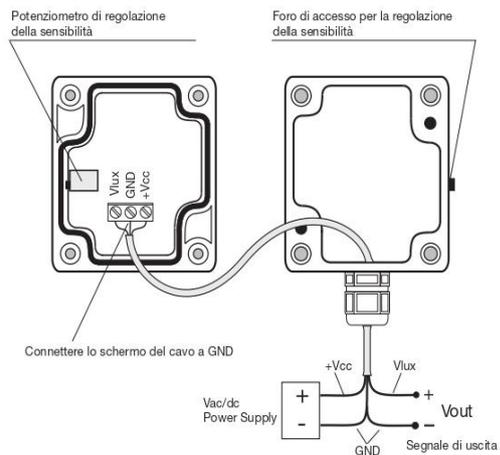
INSTALLAZIONE DEL TRASMETTITORE

L'installazione della sonda per la valutazione della *Luminanza di soglia* all'imbocco delle gallerie va eseguita in conformità alla norma UNI 11095.

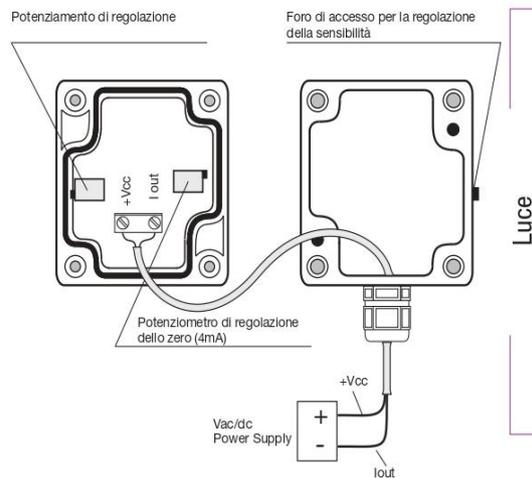
Per il collegamento del trasmettitore si deve sollevare il coperchio (svitando prima le quattro viti che lo bloccano) dove si troverà la morsetteria. Per la versione 4...20mA far riferimento alla figura 5, mentre per la versione 0...10 V far riferimento alla figura 4.

Figura 4. Schema di collegamento del trasmettitore HD2021T... con uscita in tensione

Figura 5. Schema di collegamento del trasmettitore HD2021T... con uscita in corrente



corrente 4...20mA



CODICE DI ORDINAZIONE:

	Uscita	Range di misura	Alimentazione	Risposta Spettrale
HD2021T7.AV	0...10 V	0...2000 cd/m ²	16...40 Vac/dc	V(λ)
HD2021T7.BV		0...20 kcd/m ²		
HD2021T7.2AV		0...2000 cd/m ²		
HD2021T7.AA	4...20 mA	0...2000 cd/m ²		
HD2021T7.BA		0...20 kcd/m ²		
HD2021T7.2AA		0...2000 cd/m ²		

HD2021T7x.V/A: per ordine minimo di 5 pezzi, disponibile con range di misura a richiesta

HD2021T6

La sonda HD 2021T6 permette di convertire la grandezza fotometrica Luminanza (cd/m^2) in un segnale di corrente (4...20 mA) o di tensione (0...10 V) a seconda della versione scelta. Se la stazione di acquisizione è lontana dalla sonda (>50m) è necessario utilizzare la versione in corrente.

Il trasmettitore HD2021T6 ha grado di protezione IP67. Al fine di eseguire una misura corretta si deve garantire che la superficie esterna della lente sia pulita. Se necessario la pulizia della lente va eseguita con acqua e carta per obiettivi fotografici.

È possibile scegliere la sensibilità del trasmettitore su tre valori predefiniti; $2 \text{ kcd}/\text{m}^2$, $20 \text{ kcd}/\text{m}^2$ o $200 \text{ kcd}/\text{m}^2$ da scegliere al momento dell'ordine del trasmettitore. Per ordini di almeno 5 pezzi è possibile la taratura del fondo scala su un valore scelto dal cliente.

La sonda è utilizzata per il controllo dell'illuminazione stradale, in particolare, la misura della luminanza in un **angolo di 20°** (L_{20}) è necessaria per stabilire la *luminanza di soglia* all'ingresso delle gallerie (NORMA CIE 88:2004. La norma prevede il passaggio in futuro alla misura della luminanza debilitante).

La sonda può inoltre essere utilizzata per valutare l'illuminamento verticale (E_v) come prescrive la norma precedentemente citata.

La sonda può essere utilizzata in tutte le applicazioni dove sia necessario valutare la luminanza, come ad esempio schermi per proiezione, diafanoscopi etc..

CARATTERISTICHE TECNICHE DELLO STRUMENTO

Dimensioni

(Lunghezza x Larghezza x Altezza) 145mm x 58 mm x 65mm

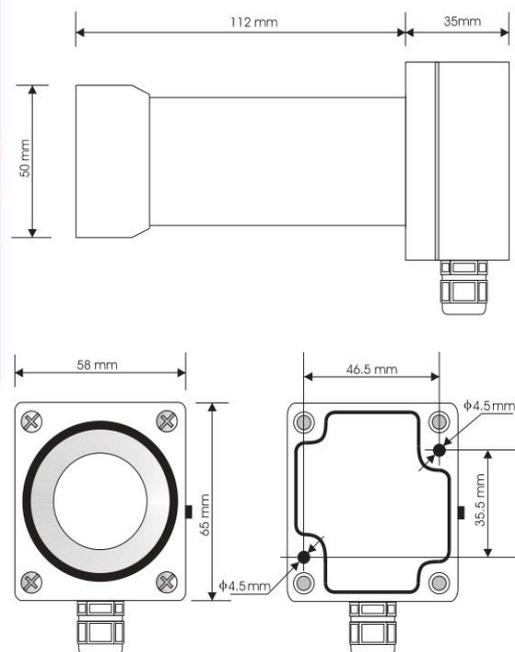


Figura 1. Dimensioni della sonda HD2021T6

RISPOSTA SPETTRALE

La sonda monta un fotodiode al silicio ed una serie di filtri per correggere la curva di risposta spettrale e renderla uguale a quella dell'occhio umano (risposta fotopica). Nella figura 2 è riportato l'andamento della risposta spettrale relativa in funzione della lunghezza d'onda.

$f_1 < 9\%$ in accordo alla curva fotopica standard $V(\lambda)$.

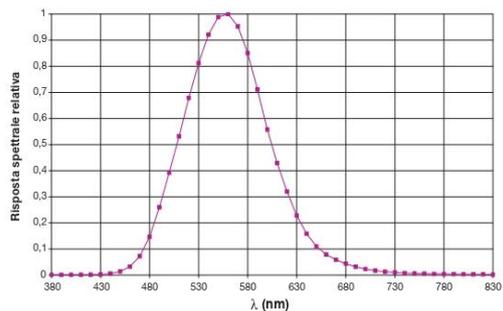


Figura 2. Risposta spettrale relativa della sonda HD2021T6

CAMPO DI VISTA

La sonda HD2021T6 ha un campo totale di vista di 20° .

TEMPERATURA DI LAVORO

La sonda può operare in un range di temperature comprese tra -20° e $+60^\circ\text{C}$. Se alloggiata all'interno di contenitori stagni si deve aver cura che non ci siano fenomeni di appannamento o condensa della finestra verso cui si affaccia la sonda. In questo caso la lettura della luminanza sarebbe alterata e affetta da errori sistematici.

TARATURA

La taratura della sonda HD2021T6 avviene misurando la luminanza sulla porta di uscita di una sfera integratrice con luminanza nota. L'incertezza di taratura della sonda, se richiesta, con fondo scala fisso è del 5% (livello di fiducia del 95%).

INSTALLAZIONE DEL TRASMETTITORE

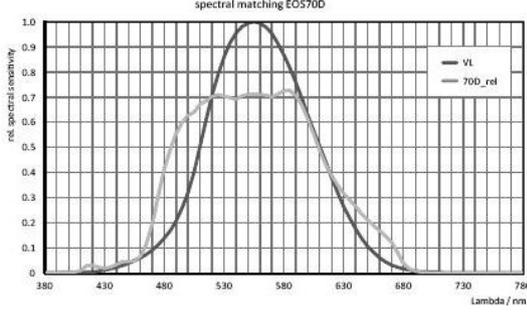
L'installazione della sonda per la valutazione della *Luminanza di soglia* all'imbocco delle gallerie va eseguita in conformità alla norma NORMA CIE 88:2004. Per il collegamento del trasmettitore si deve sollevare il coperchio (svitando prima le quattro viti che lo bloccano) dove si troverà la morsetteria. Per la versione 4...20mA far riferimento alla figura 5, mentre per la versione 0...10 V far riferimento alla figura 4 di HD2021T7.

CODICE DI ORDINAZIONE:

Modello	Uscita	Range di misura	Alimentazione	Risposta Spettrale
HD2021T6.AV	0...10 V	0...2000 cd/m^2	16...40 Vac/dc	$V(\lambda)$
HD2021T6.BV		0...20 kcd/m^2		
HD2021T6.CV		0...200 kcd/m^2		
HD2021T6.xV	A richiesta *			
HD2021T6.AA	4...20 mA	0...2000 cd/m^2		
HD2021T6.BA		0...20 kcd/m^2		
HD2021T6.CA		0...200 kcd/m^2		
HD2021T6.xA		A richiesta *		

*ordine minimo 5 pezzi

[C] CMOS CANON APS-C

<p>Electronics</p>	<p>Sensor / Resolution File format PC-Interface</p>	<p>CMOS Canon APS-C with 5566(H) x 3706(V) 14 Bit RAW - data as uncompressed Bayer structure CR2 image file transfer via USB 2.0 to the PC</p>																																														
<p>Measurement results</p>	<p>Luminance image resolution Dynamic resolution</p>	<p>2748(H) x 1834(V) Single measurement: 1:4000 High-Dyn measurement: 1:30000 (1/1000 s < t_i < 8 s)</p>																																														
<p>Configuration</p>	<p>Selection of measuring range Measuring distance Focus Aperture values Focal length Viewing angle Exposure time</p>	<p>selecting aperture value, exposure time and ISO speed > ca. 280mm automatic focus / manual focus F4 - F11 (calibrated for luminance measurements) in 1/3 steps 17mm - 50mm stepless focal length 17mm: 65°(H) x 45°(V) focal length 50mm: 28°(H) x 19°(V) 30s - 1/1000s</p>																																														
<p>Measurement</p>	<p>Light sensitivity (typical full scale)</p> <p>V(λ)-matching</p> <p>Integral spectral mismatch in % for several lamp types / spectra</p> <p>Calibration uncertainty ΔL in % Repeatability ΔL in % Uniformity ΔL in % Measuring uncertainty ΔL in % (standard illuminant A)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>aperture</th> <th>4</th> <th>4</th> <th>11</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ISO</td> <td>100</td> <td>1600</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>t_i = 0.001 s</td> <td>12 kcd/m²</td> <td>750 cd/m²</td> <td>90 kcd/m²</td> </tr> <tr> <td>t_i = 3.0 s</td> <td>4 cd/m²</td> <td>0.2 cd/m²</td> <td>30 cd/m²</td> </tr> </tbody> </table> <p>numerical transformation from R,G,B – sensor data</p>  <p>Halogen metal discharge lamps: 2-9% High pressure sodium discharge lamp: 7-13% Fluorescent lamp: 8-10% LED white: 5-12%</p> <p>ΔL = 2.5% (standard illuminant A) ΔL = 0.5 ... 2% ΔL ± 2% (f₂₂ ≤ 4%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Ti\Av</th> <th>4</th> <th>5.6</th> <th>8</th> <th>11</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 ms</td> <td>6.6</td> <td>7.0</td> <td>7.2</td> <td>7.8</td> </tr> <tr> <td>2.5 ms</td> <td>5.0</td> <td>5.3</td> <td>5.5</td> <td>6.2</td> </tr> <tr> <td>25 ms</td> <td>4.8</td> <td>5.2</td> <td>5.4</td> <td>6.0</td> </tr> <tr> <td>0.25 s</td> <td>4.8</td> <td>5.2</td> <td>5.4</td> <td>6.0</td> </tr> <tr> <td>2.5 s</td> <td>4.8</td> <td>5.2</td> <td>5.4</td> <td>6.0</td> </tr> </tbody> </table>	aperture	4	4	11	ISO	100	1600	100	t _i = 0.001 s	12 kcd/m ²	750 cd/m ²	90 kcd/m ²	t _i = 3.0 s	4 cd/m ²	0.2 cd/m ²	30 cd/m ²	Ti\Av	4	5.6	8	11	1 ms	6.6	7.0	7.2	7.8	2.5 ms	5.0	5.3	5.5	6.2	25 ms	4.8	5.2	5.4	6.0	0.25 s	4.8	5.2	5.4	6.0	2.5 s	4.8	5.2	5.4	6.0
aperture	4	4	11																																													
ISO	100	1600	100																																													
t _i = 0.001 s	12 kcd/m ²	750 cd/m ²	90 kcd/m ²																																													
t _i = 3.0 s	4 cd/m ²	0.2 cd/m ²	30 cd/m ²																																													
Ti\Av	4	5.6	8	11																																												
1 ms	6.6	7.0	7.2	7.8																																												
2.5 ms	5.0	5.3	5.5	6.2																																												
25 ms	4.8	5.2	5.4	6.0																																												
0.25 s	4.8	5.2	5.4	6.0																																												
2.5 s	4.8	5.2	5.4	6.0																																												
<p>Operating data</p>	<p>Memory Operating system Software</p>	<p>SDHC card memory chip 16GB (ca. 21MB per image) Windows 10/8/7 LMK LabSoft (monochrome luminance analysis software)</p>																																														

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH reserves the right to change products and specifications without prior notice.