



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo sistemi intelligenti per la gestione della "Smart Street"

*M. Annunziato, F. Bucci, C. Meloni, F. Moretti, S. Pizzuti*

Report RdS/2011/198

## SVILUPPO SISTEMI INTELLIGENTI PER LA GESTIONE DELLA "SMART STREET"

M. Annunziato, C. Meloni, S. Pizzuti (ENEA)

F. Bucci (Università La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica)

F. Moretti (Università Roma Tre, Dipartimento di Informatica e Automazione)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica

Responsabile Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

## Sommario

<b>1. INTRODUZIONE SUL CONCETTO DI SMART STREET .....</b>	<b>6</b>
<b>2. LE TECNOLOGIE DI GESTIONE DELLA ILLUMINAZIONE PUBBLICA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Le tecnologie esistenti: gestione del flusso luminoso .....</b>	<b>8</b>
2.1.1. Sistemi di accensione - spegnimento .....	8
2.1.2. Stabilizzazione.....	9
2.1.3. Regolazione .....	9
2.1.4. Sistemi di telecontrollo.....	18
2.1.5. Le tecnologie per la trasmissione di dati digitali .....	19
2.1.6. Rifasamento.....	25
<b>3. SVILUPPO DELLA METODOLOGIA ADATTIVA PER LO SMART LIGHTING .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. L'approccio alla illuminazione adattiva sviluppata da ENEA .....</b>	<b>26</b>
3.1.1. Schema del sistema di controllo e di misura dell'indice di flusso del traffico.....	26
<b>3.2. La correlazione tra potenza di alimentazione delle lampade e flussi veicolari: normativa ed approccio proposto .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3. Il controllo adattivo .....</b>	<b>38</b>
3.3.1. Le metodologie di modellazione.....	38
3.3.2. La previsione a breve termine dei flussi di traffico veicolare urbano.....	40
3.3.3. Metodologie di controllo dell'illuminazione stradale.....	44
3.3.4. Sperimentazione ed analisi.....	45
3.3.5. Conclusione .....	46
<b>4. ANALISI TECNICO ECONOMICA COMPARATIVA DELLA METODOLOGIA SMART SU UNA REALTA' URBANA.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1. Caratteristiche del comune oggetto del caso studio .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2. Analisi tecnico-economica su un caso reale delle strategie di intervento .....</b>	<b>54</b>
4.2.1. Soluzione convenzionale - Sostituzione delle lampade HG con SAP .....	57
4.2.2. Soluzione proposta - Regolazione di linea del flusso luminosa.....	59
4.2.3. Soluzione avanzata - Telegestione punto-punto del flusso luminoso .....	62
4.2.4. Soluzione innovativa - Illuminazione di tipo adattiva.....	65
<b>4.3. Confronto delle varie soluzioni .....</b>	<b>69</b>
<b>5. SPERIMENTAZIONE SU UN CASO REALE:</b>	
<b>Realizzazione di un sistema di telegestione e di telecontrollo di tipo adattivo per impianti di illuminazione esterna per il C.R. ENEA Casaccia (RM).....</b>	<b>81</b>
<b>6. CONCLUSIONI .....</b>	<b>84</b>



## RIFERIMENTI

Questo rapporto tecnico si riferisce all'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, nel contesto della Ricerca di Sistema il cui obiettivo è il miglioramento del sistema elettrico nazionale sia in termini di nuove tecnologie che di efficienza energetica.

Il rapporto si inquadra nell'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica", nell'ambito del PAR 2008-09, in riferimento alla tematica di ricerca "Risparmio di energia elettrica nell'illuminazione pubblica" - Progetto 3.2, "Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica" - Task A "Sviluppo di sistemi intelligenti per la gestione della Smart Street".

La ricerca si focalizza sullo sviluppo di metodologie e tecnologie per la razionalizzazione e il risparmio nell'uso dell'energia elettrica in illuminazione pubblica, concretizzate in situazioni pilota su scala reale e valorizzate da un piano di diffusione.

È sempre più sentita l'esigenza di una visione di sistema, per affiancare alle tecnologie più efficienti la gestione intelligente dell'impianto che permette risparmi potenziali vanno dal 20 al 50%, con tempi di ritorno degli investimenti accettabili. Inoltre l'illuminazione pubblica, se orientata verso specifiche tecnologie (Power Line Communication a banda larga) rappresenta una grande opportunità in quanto si propone come la tecnologia abilitante (in quanto permette l'integrazione di molte altre funzionalità) per città sostenibili (Smart Cities) su cui il SETPLAN europeo ha deciso investimenti massicci per i prossimi anni.

L'obiettivo finale dell'attività offre un significativo contributo al raggiungimento degli obiettivi europei di risparmio energetico nell'illuminazione pubblica: soddisfare le esigenze degli utenti finali, tramite le amministrazioni pubbliche nel rispetto dell'ambiente e con un uso razionale dell'energia.

Elementi per arrivare a questo obiettivo sono:

1. Sviluppo di un nuovo sistema per il controllo completo della strada ("smart street") basato su rete di lampioni intelligenti
2. Sviluppo e qualificazione di nuove tecnologie per l'illuminazione pubblica (LED ed OLED) e valutazione delle criticità ed opportunità di impiego.
3. Sperimentazione/dimostrazione in scala reale in un paese pilota; diffusione dei risultati ed estrapolazione delle potenzialità a livello nazionale.
4. Avvio e supporto, nel contesto del Network Lumière, di un significativo numero di progetti di riqualificazione che abbiano come riferimento tecnologico la piattaforma tecnologica sviluppata.

Questo rapporto si incentra dunque sulla metodologia e la sperimentazione di un tool software per la analisi dei dati della "sensor network" urbana, su un sistema di predizione della richiesta di illuminazione e sulla regolazione adattativa del flusso luminoso. Le attività di sviluppo del sistema intelligente per la regolazione adattativa punto-punto della illuminazione pubblica si sono articolate su quattro task:

- Sviluppo di una metodologia di modellazione della domanda di illuminazione in termini di predizione dei flussi di traffico a breve termine (1 ora) per arterie stradali.
- Sviluppo di una metodologia di controllo adattivo del flusso luminoso in relazione alla richiesta dell'utenza.
- Validazione della metodologia sviluppata su dati reali di flussi di traffico.
- Comparazione tecnico-economica dell'approccio proposto rispetto all'approccio di mercato più diffuso su una realtà urbana di medie dimensioni.

## **1. INTRODUZIONE SUL CONCETTO DI SMART STREET**

La “Smart Street” è un sistema che poggia sulla rete della illuminazione pubblica di una strada in cui i lampioni sono “intelligenti e multifunzionali”, ossia equipaggiati con sensori di varia natura ed attraverso sistemi di comunicazione avanzati (power line ad alta velocità ed interazione web) interagiscono con un sistema intelligente in grado di ritracciare continuamente il profilo di attività (persone, veicoli, emissioni) della strada in base al quale attivare una regolazione adattiva ed automatica per l'intero anno, del flusso luminoso punto-punto ed altre funzionalità. Il sistema si presta particolarmente per importanti arterie veicolari o pedonali cittadine (es: raccordo anulare, strade/piazze principali del centro storico) dove il consumo elettrico per l'illuminazione è particolarmente significativo e la regolazione è critica e permette di salvare grandi quantità di energia. Verrà sviluppato un prototipo e sperimentato su una realtà cittadina rappresentativa.

In particolare nel progetto 3.2 del PAR 2008-2009 sulla illuminazione pubblica viene sviluppato l'approccio della smart street che mira ad implementare il concetto di regolazione adattiva della illuminazione pubblica in relazione alla capacità di monitorare il passaggio di persone e veicoli ed ottenere quindi i massimi risparmi possibili dalla loro ottimizzazione.

In tale attività si sviluppano inoltre componenti ad alta efficienza basati su LED e su lampioni a led con alimentazione fotovoltaica (Stapelia), si sviluppano sperimentazioni su un paese pilota (Marcallo con Casone), si costruisce un network (Lumière) per la penetrazione di tali tecnologie nel territorio.

## 2. LE TECNOLOGIE DI GESTIONE DELLA ILLUMINAZIONE PUBBLICA

Ad oggi la quasi totalità degli impianti di illuminazione pubblica è realizzata in modo da fornire delle prestazioni costanti per la durata della loro operatività. Al più, le prestazioni possono variare in maniera uguale per tutto l'impianto; tale variazione può avvenire a seguito di un intervento tecnico o in altri casi per un malfunzionamento generale. Ma molto raramente gli impianti, possiedono sistemi che gli permettono di cambiare in tempo reale o per intervalli, i parametri illuminotecnici.

Un impianto di illuminazione pubblica viene regolato per fornire un flusso luminoso superiore alle effettive necessità dell'area in considerazione, di fatti la maggioranza delle lampade produce, per ragioni tecniche e normative, una quantità in eccesso di luce pari al 30-35%. Questo perché durante la vita della lampada esiste un'usura che ne diminuisce la funzionalità e per legge anche a fine vita utile la lampada deve mantenere uno standard di luminosità dato, dipendente dal contesto in cui è collocata.

Ne consegue che la lampada deve essere prodotta calcolando questa usura e la decrescita del flusso luminoso e che quando viene installata, quindi, emette un 35% di luce in più.

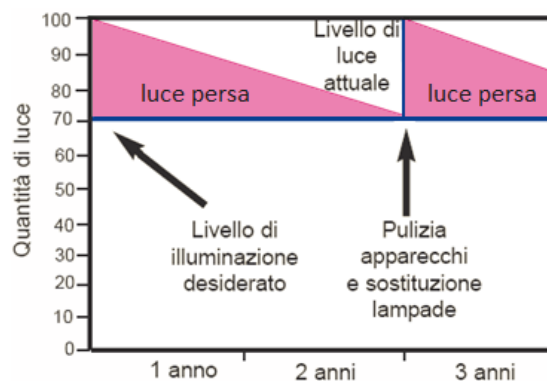


Fig. 2.1: decadimento del flusso luminoso di una sorgente luminosa

La piena potenza è applicata solo alla fine del periodo di manutenzione (prima della nuova pulizia degli apparecchi e la sostituzione delle lampade), ottenendo un significativo risparmio energetico lungo tutta la vita della lampada. Questo tipo di controllo, se viene attuato assieme alla sostituzione programmata delle lampade e ad una regolare pulizia degli apparecchi, rappresenta una voce importante nella ricerca del risparmio energetico.

I consumi energetici nel settore dell'illuminazione, sia quelli relativi alla pubblica illuminazione sia quelli di competenza delle utenze private, costituiscono una percentuale considerevole dei consumi energetici globali del nostro Paese.

Il risparmio energetico e l'inquinamento luminoso sono due argomenti di fortissima attualità, che vedono un tale coinvolgimento degli operatori del campo dell'illuminazione da diventare oggetto di raccomandazioni e normative nazionali ed internazionali.

Inoltre il governo italiano ha intrapreso iniziative mirate a promuovere sorgenti luminose ad alta efficienza e l'impiego di apparecchiature atte a contenere i consumi energetici. Le vigenti disposizioni di legge hanno pertanto stimolato la nascita di nuove tecnologie che permettono di raggiungere le suddette finalità operando sulla accensione-spegnimento, stabilizzazione e regolazione del flusso luminoso e della tensione di alimentazione delle lampade.

La maggior parte delle tecnologie citate si configurano come sistemi rigidi e non adattabili tranne, in parte, il caso della telegestione di tipo punto-punto i quali rappresentano il primo passo per la realizzazione di un sistema integrato.

Negli approcci attuali i cicli di controlli sono di tipo aperto, ossia il sistema di gestione non è mai (o lo è raramente nei casi più avanzati) connesso a sistemi di rilevamento delle condizioni ambientali e di fruizione delle zone da illuminare. Ciò significa che la strategia di controllo è definita a priori a prescindere dal fatto se la reale utenza sia più o meno vicina al profilo di utenza stimata o se la prestazione di illuminazione richiesta sia effettivamente assicurata (non sottodimensionata e non sovradimensionata).

I limiti della tecnologia attuale evidenziati precedentemente hanno stimolato interessanti iniziative per incrementare l'efficienza della rete di illuminazione pubblica dal punto di vista del risparmio energetico. Le migliorie applicabili per l'efficientamento dell'illuminazione pubblica sono molteplici (prima fra tutte l'uso della tecnologia di illuminazione a LED), ma la focalizzazione viene incentrata sull'introduzione di un sistema di controllo intelligente che gestisca in maniera razionale, autonoma e adattiva le esigenze di illuminazione nel territorio.

## **2.1. Le tecnologie esistenti: gestione del flusso luminoso**

Le tecnologie attualmente disponibili sul mercato per la gestione del flusso luminoso degli impianti di illuminazione pubblica agiscono principalmente sull'accensione e spegnimento dell'impianto, sulla stabilizzazione e regolazione del flusso luminoso, sui sistemi di telecontrollo e telegestione e sul rifasamento della linea.

### **2.1.1. Sistemi di accensione - spegnimento**

L'ottimale utilizzo della luce diurna e la tempestiva accensione degli impianti rappresentano una fonte di risparmio spesso trascurata. Si definisce "crepuscolo civile" l'intervallo di tempo in cui il sole si trova tra 0° e 6° sotto l'orizzonte e la linea stessa dell'orizzonte. In questo intervallo va posizionata l'accensione dell'impianto. La "durata del crepuscolo civile" in un determinato luogo dipende principalmente dalla latitudine, dalla longitudine e dal giorno dell'anno, come del resto il sorgere e il tramontare del sole. La determinazione del momento in cui posizionare l'accensione e lo spegnimento degli impianti è influenzata dalla morfologia del territorio (pianeggiante, collinare o montuoso) e dai bisogni dell'utenza. È perciò una scelta del gestore "sfruttare" al 100% tutto il crepuscolo posizionando l'accensione degli impianti alla fine del crepuscolo civile, oppure scegliere una percentuale all'interno dello stesso.

L'impianto di illuminazione è comandato attraverso quadri di elettrici di distribuzione dove sono presenti gli interruttori di protezione delle linee elettriche, il contatore di energia e un dispositivo di comando che regola l'accensione e lo spegnimento. Di questo ultimo dispositivo di controllo ne esistono varie tipologie con differenti prestazioni e costi.

**Timer:** si tratta di un semplice dispositivo che accende e spegne ad orari costanti gli impianti. Questa soluzione, molto economica, ha un inconveniente importante: bisogna modificare almeno settimanalmente gli orari di accensione e spegnimento per tenere conto delle variazioni delle stagioni.

**Interruttore crepuscolare:** composto da una sonda di misura dell'intensità luminosa, posta esternamente all'armadio e da un regolatore di livello luminoso che pilota la soglia di accensione e spegnimento. È il dispositivo più economico, più usato e più soggetto a malfunzionamenti dell'impianto a causa della sporcizia che frequentemente si deposita sulla sonda, inibendone il corretto funzionamento.



**Interruttore astronomico:** in funzione delle coordinate di longitudine e di latitudine del dispositivo calcola le ore in cui sorge e tramonta il sole, comandando automaticamente l'accensione e lo spegnimento.

### 2.1.2. Stabilizzazione

Le sorgenti luminose, per funzionare correttamente mantenendo le proprie caratteristiche nel tempo, devono essere alimentate con una tensione non superiore al 5% del valore nominale. Spesso ed in particolare nelle ore di maggior funzionamento degli impianti di illuminazione si registrano valori di tensione molto più elevati. Queste variazioni sono imputabili principalmente al minor prelievo delle grandi utenze nelle ore notturne. Normalmente gli impianti di illuminazione sono allacciati a reti di distribuzione soggette a questo fenomeno dovuto sia all'ente erogatore sia alle variazioni di carico stagionali o giornaliere. Le fluttuazioni di tensione ed in modo particolare le sovratensioni, sono estremamente critiche per tutte le tipologie di lampade, in quanto ne accelerano l'invecchiamento riducendone sia la durata, sia il flusso luminoso emesso nel tempo. Un 10% di sovratensione provoca un calo nella vita media delle lampade fino al 50% e un sovra consumo del 20%. Per consentire alle lampade di raggiungere valori di "vita utile" (life expectancy) dichiarati dal costruttore, nonché il flusso luminoso previsto, è necessaria la stabilizzazione della tensione.

La stabilizzazione della tensione permette in particolare di diminuire l'usura della lampada e quindi influisce notevolmente sull'allungamento della vita delle lampade riducendo di conseguenza i costi di manutenzione, sostituzione e smaltimento. È quindi possibile ottimizzare i piani di manutenzione periodica, riducendo gli interventi di sostituzione delle lampade con conseguente riduzione degli oneri gestionali.

Lo stabilizzatore deve cioè fissare la tensione ad un determinato valore (230V) rispetto al quale, poi, andare a variare il flusso luminoso emesso. La funzione di stabilizzazione serve a rendere indipendente la sorgente luminosa svincolandola dagli sbalzi di tensione che si hanno nella rete.

Benefico effetto collaterale della stabilizzazione della tensione di linea è l'ulteriore risparmio sui consumi di energia elettrica ottenuto grazie alla "tosatura" della tensione eccedente il valore nominale. Tale risparmio è quantificabile in un 5-7% circa.

### 2.1.3. Regolazione

Nel settore di illuminazione stradale sono stati sempre sperimentati sistemi per ridurre il consumo nelle ore di minor traffico. Il più diffuso è stato lo spegnimento alternato delle lampade "tutta notte" e "mezza notte", che ha il grande inconveniente di illuminare in modo discontinuo lo spazio con una uniformità decisamente pericolosa. Grazie alla sempre più elevata affidabilità delle apparecchiature elettroniche, questo problema è stato oggi risolto con l'introduzione dei regolatori di flusso nei quadri di distribuzione. Queste apparecchiature forniscono all'impianto una corretta ed ottimale alimentazione con il vantaggio di dimezzare i costi di gestione.

Il primo dei vantaggi che comporta l'utilizzo di un regolatore di flusso consiste nel risparmio di energia consumata. La stabilizzazione della tensione ai valori programmati durante il funzionamento a regime normale e la riduzione nelle ore notturne, quando la diminuzione del flusso del traffico lo consente, determinano una contrazione nei consumi di energia elettrica. La riduzione di potenza assorbita, in funzione del tipo di lampada e delle condizioni dell'impianto, può variare dal 20% al 50%.

I fattori che maggiormente determinano l'invecchiamento precoce delle lampade sono lo scarso smaltimento di calore e l'eccesso della tensione di alimentazione. La stabilizzazione della tensione attuata

dal regolatore evita alle lampade lo stress dovuto alle sovratensioni, soprattutto negli impianti ubicati vicino alle cabine di trasformazione dove, nelle ore notturne, la tensione di alimentazione può raggiungere valori ben superiori a quelli nominali. La riduzione della tensione, quando il regolatore funziona a regime normale, determina una sensibile diminuzione di calore. Risulta così possibile aumentare la durata delle lampade.

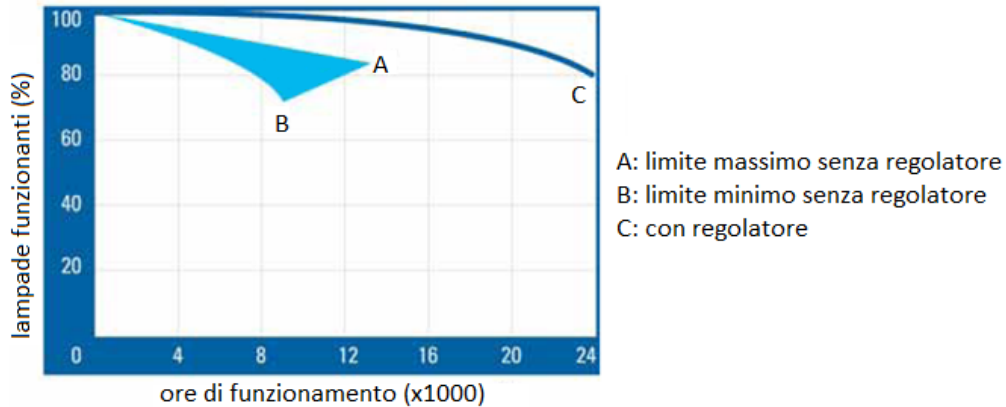


Fig. 2.2: confronto tra curve di mortalità

Grazie all'allungamento della vita media delle lampade è possibile conseguire un risparmio nei costi di manutenzione e gestione dell'impianto, grazie ad una minore spesa sia per i materiali che per la manodopera. I regolatori non necessitano di tarature né di manutenzione particolare, eccetto i consueti controlli visivi che normalmente si eseguono sui quadri di accensione. Anche le riparazioni possono essere effettuate da personale addestrato, ma non specialista.

Oltre ai vantaggi di tipo energetico la regolazione del flusso luminoso consente anche di ottimizzare e uniformare il livello di illuminamento, garantendo un'elevata sicurezza degli utenti grazie all'eliminazione delle zone d'ombra, e di ridurre l'inquinamento luminoso grazie alla diminuzione di luminanza del manto stradale.

Ulteriore elemento di forza dei regolatori del flusso luminoso è la facilità di penetrazione nel mercato, avendo la possibilità di inserirli anche nei quadri preesistenti, indipendentemente dalle lampade alimentate.



Fig. 2.3: vantaggi della regolazione del flusso luminoso

Il risparmio energetico ottenibile, grazie alla stabilizzazione e regolazione, dipende, in parte, dalla tipologia di lampade utilizzate e dallo stato dell'impianto in esame. Escludendo le sole lampade a scarica a vapori di

mercurio ad alta pressione tutte le lampade a scarica generalmente impiegate in illuminazione pubblica o privata possono essere sottoalimentate fino al 50% senza particolari problemi; tuttavia, a parità di condizione di sottoalimentazione, i diversi tipi di lampade garantiscono percentuali di risparmio diverse, in funzione delle differenti caratteristiche fisico-costruttive e della tipologia di utilizzazione.

Tipo di lampada	Rendimento da / a	% Riduzione di potenza	Valori minimi di tensione a regime ridotto	
			senza Steady-State	con Steady-State
Incandescenza	Buono/ottimo	40 ÷ 50	170	—
Incandescenza con alogeni	Buono/ottimo	40 ÷ 50	170	—
Vapori di mercurio (Hg)	Suff./Buono	20 ÷ 25 / 33 ÷ 38	190	180
Vapori di sodio (Na) alta pressione	Buono/ottimo	40 ÷ 45	170	—
Vapori di sodio (Na) bassa pressione	Suff./Discreto	25 ÷ 30	185	—
Vapori di sodio (Na) A.P. Con reattore Hg	Discreto/buono	30 ÷ 35	185	175
Vapori di sodio (Na) A.P. Con accenditore incorporato	Discreto/buono	35 ÷ 40	175	—
Ioduri metallici	Sufficiente	18 ÷ 20	200	—
Fluorescenti	Suff./Suff.	20 ÷ 25	185	—
Fluorescenti a risparmio di energia	Discreto/buono	20 ÷ 35	180	—

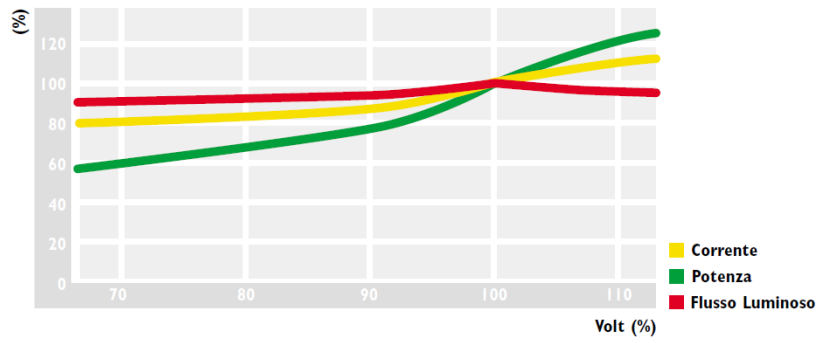
Fig. 2.4: attitudine delle lampade alla sottoalimentazione

Le lampade a vapori di mercurio al di sotto di 190/195 V tendono a spegnersi, mentre le lampade ai vapori di sodio ad alta pressione sono ancora accese a 170 V. Questo sta a significare che, nel caso di lampade a vapori di mercurio, non si può portare la tensione sotto i 195 V e quindi non si potrà ottenere un risparmio superiore al 30 %. Con le lampade al sodio invece si può andare oltre e portare il risparmio energetico attorno al 50 %. L'invecchiamento delle lampade comporta inoltre un innalzamento della tensione minima di funzionamento. Perciò, quando si ha a che fare con lampade al mercurio naturalmente prossime allo spegnimento perché ormai vecchie, una tensione di 200 V potrebbe essere insufficiente a mantenerle accese.

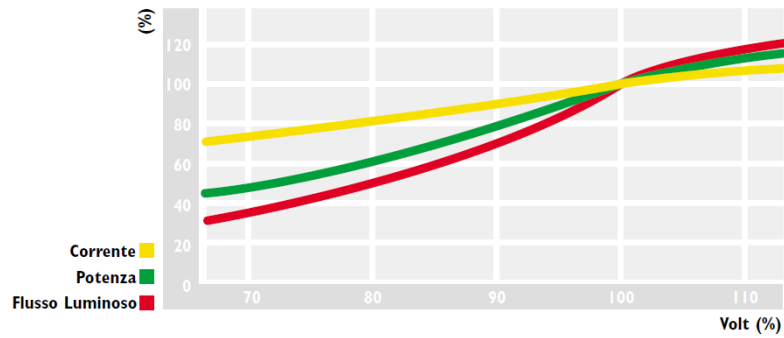
Come già accennato in precedenza, negli impianti di illuminazione in derivazioni bisogna anche tenere in considerazione la lunghezza e il tipo di linea elettrica. Se una linea elettrica è molto lunga, la tensione in prossimità dell'inizio è sicuramente superiore di quella che si ha all'altra estremità. Tale riduzione può essere importante (per esempio superiore al 5%) e, in associazione ad una riduzione eseguita per attuare un programma di risparmio energetico, può capitare che le lampade di fine linea si spengano. Lo stesso può succedere se le linee sono obsolete o comunque presentano dispersioni e problemi indipendenti dalla loro lunghezza.

Le tabelle sottostanti individuano le principali sorgenti luminose divise per tipologia e caratteristiche costruttive. Forniscono un insieme di informazioni circa i vari parametri elettrici a diversi valori di sottoalimentazione. È pertanto possibile valutare l'entità dei risparmi ottenibili con i vari valori di tensione selezionabili.

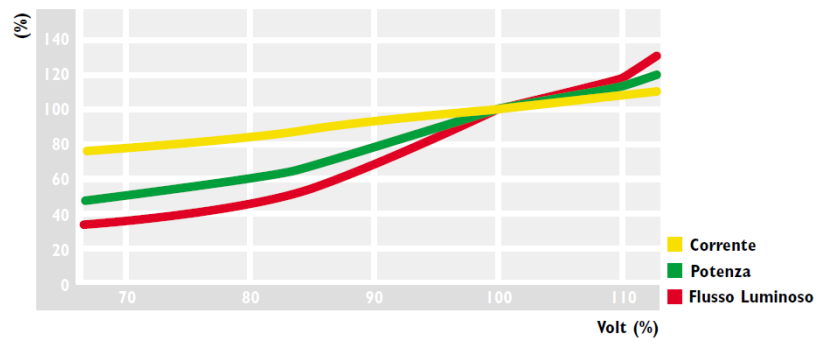
### Lampade sodio a bassa pressione



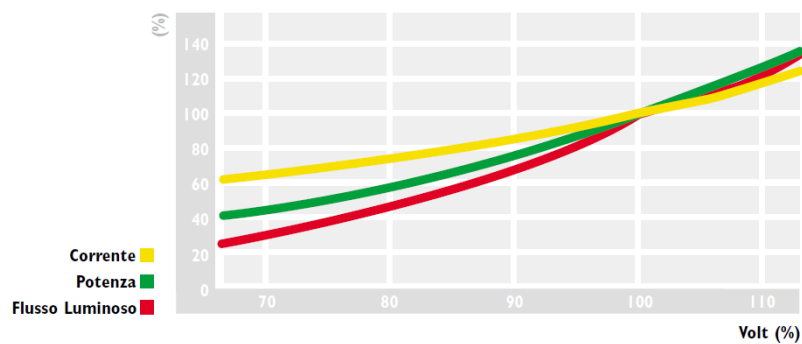
### Lampade sodio ad alta pressione



### Alogenuri metallici



### Vapori di mercurio



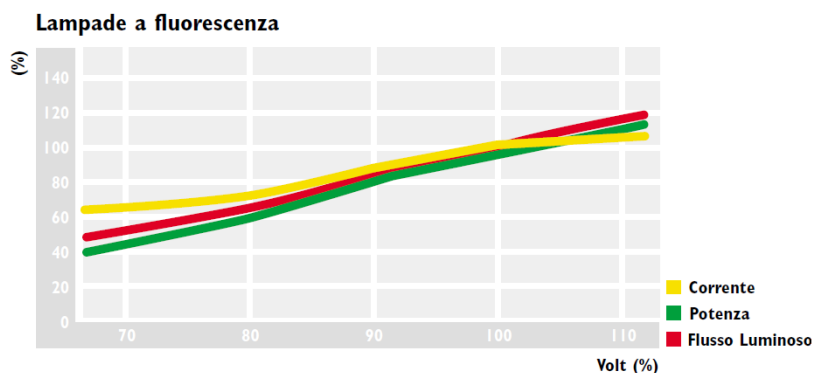


Fig. 2.5: comportamento delle diverse lampade a vari livelli di sottoalimentazione

I sistemi in grado di controllare il flusso luminoso emesso dal parco lampade sono di importanza fondamentale per un impianto di illuminazione. Il regolatore di flusso luminoso nasce proprio con lo scopo di controllare e variare il flusso emesso dalla sorgente luminosa durante le ore notturne; Per fare ciò agisce sulla tensione di alimentazione della lampada, che a sua volta determina le prestazioni della stessa.

Cicli standard utilizzo impianto (ora solare - accensione al tramonto - spegnimento all'alba)

Tipo ciclo	Periodo stagionale	Fasce orarie solari														Totale ore normale	Totale ore ridotto
		17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6		
Aree urbane	inverno	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														7,45	6
	autunno	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														7,35	6
	primavera	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														3,25	6,41
	estate	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														3,50	6,50
	<b>totale annuo</b>															<b>1972</b>	<b>2270</b>
Aree extra urbane superstrade	inverno	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														5,50	8
	autunno	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														5,33	8
	primavera	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														1,75	7,92
	estate	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														2	8
	<b>totale annuo</b>															<b>1330</b>	<b>2912</b>
Località turistiche Costiere	inverno	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														—	13,50
	autunno	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														—	13,34
	primavera	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														—	9,67
	estate	[Bar chart showing reduced and normal lighting periods]														5,50	4,50
	<b>totale annuo</b>															<b>500</b>	<b>3742</b>

Fig. 2.6: fasce orarie di riduzione del flusso luminoso

Un regolatore di flusso luminoso si avvia seguendo il ciclo di accensione delle lampade raggiungendo gradualmente il valore di tensione nominale; il passaggio dal regime nominale al regime ridotto, e viceversa, avviene sempre in modo graduale. In caso di black-out, al ritorno dell'alimentazione di rete, il regolatore ripete il ciclo di accensione delle lampade prima di riportare la tensione di uscita al valore programmato precedentemente. Tali apparecchiature alimentano correttamente lampade al sodio, mercurio, ioduri metallici e fluorescenti e il loro utilizzo è adatto all'illuminazione di strade, autostrade, piazze, gallerie, parcheggi, stadi, porti, aeroporti, stazioni, centrali elettriche, installazioni militari, carceri, impianti industriali, grande distribuzione e in generale per tutti gli impianti che forniscono illuminazione costante e uniforme.

Il settore di maggiore interesse applicativo è quello dell'illuminazione stradale. Da diversi rilievi notturni effettuati è emerso che, di tutte le ore notturne, solo 3-4 ore sono interessate da traffico intenso, tra le 17:30 e le 21, mentre le restanti sono caratterizzate da una mobilità che va a diminuire col passare del tempo. È proprio durante queste ore a minor traffico che il regolatore di flusso permette di ottimizzare il livello di illuminamento e quindi consente di risparmiare energia.

Come si accennava in precedenza, la regolazione del flusso deve sempre avvenire in ottemperanza ai valori previsti dalle normative vigenti che definiscono le prestazioni illuminotecniche minime, necessarie per una corretta illuminazione stradale. Le strade devono essere classificate secondo il Codice della Strada e il DM 6792 del 05/11/2001 e a seconda dei flussi di traffico che si hanno, dall'accensione delle lampade fino al loro spegnimento, possono cambiare categoria illuminotecnica di riferimento (declassamento).

Nelle immagini riportate di seguito, si può vedere il risultato di uno studio condotto sulla città di Torino che evidenzia come variano i flussi di traffico in funzione dell'orario.

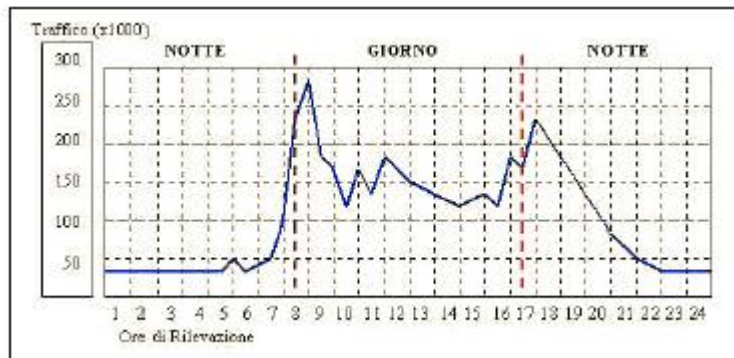


Fig. 2.7: andamento giornaliero del traffico nella città di Torino

È evidente che questo discorso è fortemente influenzato da molte variabili, come il tipo di strada e la posizione, e pur essendo in parte generalizzabile, è necessaria un'attenta analisi dei flussi di traffico. I sistemi per la riduzione del flusso luminoso devono avere soprattutto caratteristiche di flessibilità per poter far fronte a tutto lo spettro delle esigenze, non solo relative alla posizione Nord-Sud e alla altitudine.

La funzione di regolazione invece permette di risparmiare energia e di ottimizzare il livello di illuminamento. Per comprendere l'entità del risparmio basta tenere presente la nota espressione della potenza elettrica in funzione della tensione:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Conoscendo la tensione nominale a cui viene alimentata una lampada e la tensione a cui è portata dopo essere stata regolata, si può calcolare la percentuale di potenza che non viene impiegata. Quindi, moltiplicando per il tempo, si ottiene l'energia risparmiata:

$$R_a = (P_a * t_r * R_{e\%} * C_e) + \left[ N_l * \left( \frac{C_l + C_m}{t_2} - \frac{C_l + C_m}{t_1} \right) * t_f \right] + (P_a * R_{s\%} * t_r * C_e)$$

dove:

- **Rosso**: risparmio per minor consumo di energia.
  - **Giallo**: risparmio sui costi della manutenzione.
  - **Verde**: risparmio per effetto della stabilizzazione.
- $R_a$ : risparmio annuo complessivo;
  - $P_a$ : potenza totale installata dell'impianto;
  - $t_r$ : numero di ore/anno di funzionamento a regime ridotto;
  - $R_{e\%}$ : percentuale di riduzione della potenza;
  - $C_e$ : costo del kWh;
  - $N_l$ : numero di lampade;

- $C_i$ : costo medio di acquisto di una lampada;
- $C_m$ : costo medio della manodopera per la sostituzione di una lampada;
- $t_2$ : durata media delle lampade senza regolatore (circa 8000 h/anno);
- $t_1$ : durata media delle lampade con regolatore (circa 17000 h/anno);
- $t_f$ : numero di ore/anno di funzionamento (circa 4000 h/anno);
- $R_{5\%}$ : percentuale di riduzione della potenza da stabilizzazione.

Il risparmio ottenuto grazie al regolatore di flusso varia tra il 25% e il 30%. Tuttavia occorre considerare che, funzionando anche da stabilizzatore, il dispositivo non permette di arrivare a valori superiori a 220V. Ciò fa sì che in alcune ore della notte il risparmio superi il 30%, perché a causa dell'effetto dei minori carichi presenti in rete durante le ore notturne, la tensione aumenterebbe fino a valori di 240/245 V.

In figura 2.8 si riporta un esempio che chiarisce questo aspetto mettendo in evidenza sia la quota parte di energia risparmiata per la regolazione, sia quella per stabilizzazione della tensione.

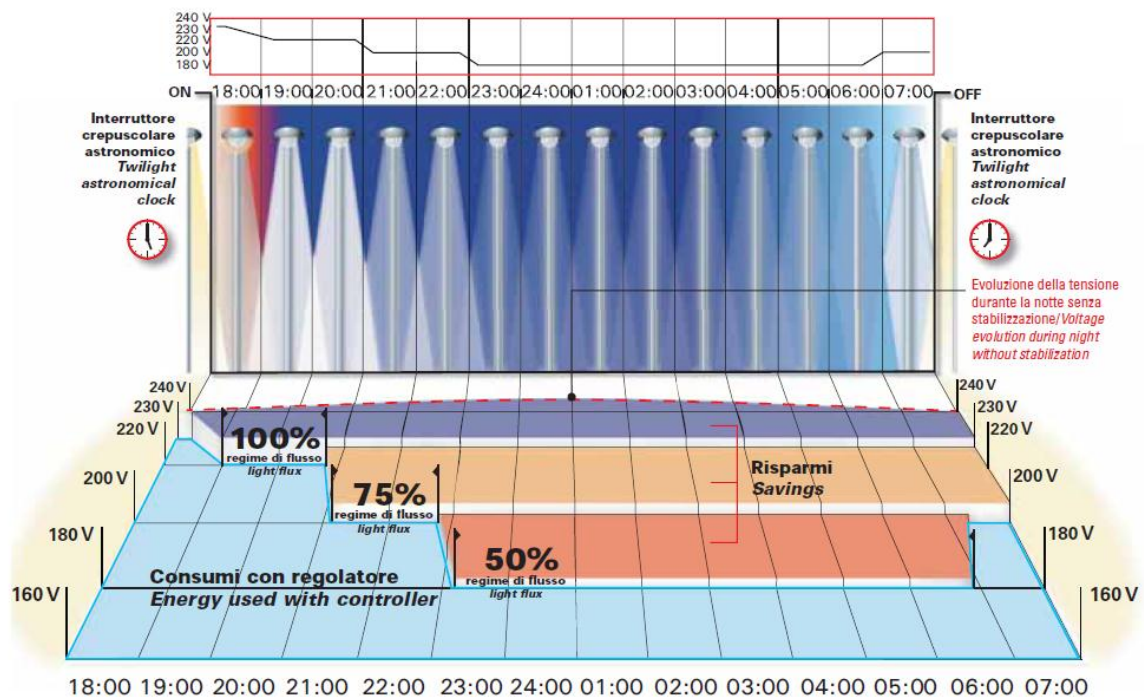


Fig. 2.8: esempio di regolazione del flusso luminoso durante le ore notturne

In generale si distinguono tre famiglie di regolatori di flusso:

- I regolatori con reattore ferromagnetico biregime.
- I regolatori centralizzati di tensione.
- Gli alimentatori elettronici dimmerabili.

Queste tecnologie comportano entità di risparmio energetico dipendentemente dai cicli di funzionamento adottati (quante ore in riduzione, per quanti giorni l'anno). Adottando i cicli di regolazione normalizzati previsti dal progetto di norma UNI U29.00.043.0 "Applicazione in ambito stradale dei dispositivi regolatori di flusso luminoso", in genere ci si può attendere un risparmio energetico medio annuo di:

- circa il 20% nel caso degli alimentatori magnetici biregime,
- tra il 25% ed il 30% nel caso dei regolatori di tensione centralizzati,
- tra il 30% ed il 35% nel caso di alimentatori elettronici dimmerabili.

## **Reattori ferromagnetici biregime**

I reattori tradizionali ferromagnetici non sono in grado di filtrare e rimodulare i parametri elettrici in ingresso ma si limitano a inviare alla lampada gli stessi sbalzi di tensione che arrivano dalla rete di distribuzione di energia elettrica. Anzi assorbono circa il 15% della potenza della lampada che devono alimentare (per esempio una lampada 100 W a vapori di sodio ad alta pressione consuma in realtà come una lampada da 115W) In questo modo la lampada non mantiene pressoché mai una potenza costante passando continuamente da una tensione ad un'altra (micro variazioni) mentre di sera e di notte c'è un aumento più sensibile delle tensioni quando vengono staccati i grandi carichi elettrici.

A monte di una lampada a scarica sono presenti, oltre al reattore, anche un accenditore, necessario per il primo innesco dell'arco di scarica, e un condensatore, che provvede al rifasamento la corrente. Questi tre componenti, genericamente indicati come, "gruppo ausiliari" è rimasto pressoché immutato nel tempo.

Nel caso si utilizzino alimentatori ferromagnetici biregime si potrebbe ottenere una riduzione massima del 40% del flusso luminoso. A questi valori di riduzione del flusso corrispondono mediamente riduzioni della potenza assorbita variabili dal 30% al 45%.

Per migliorarne le performance energetiche e per allungare la vita media delle lampade sono stati sviluppati due tipologie di apparecchi che servono per regolare la potenza e il flusso delle lampade. Si tratta dei regolatori centralizzati di tensione e degli alimentatori elettronici dimmerabili.

Entrambe queste tipologie consentono di stabilizzare le tensioni di esercizio. Questo consente di allungare la vita delle lampade che vedono una potenza assorbita costante e non sono soggette a continui shock elettrici.

## **Regolatori di flusso centralizzati**

I regolatori centralizzati di tensione effettuano la stabilizzazione della tensione che, oltre ad allungare la vita media delle lampade, permette anche un significativo risparmio energetico. Come detto, nelle ore notturne la tensione di linea può superare il valore nominale anche del 10%. Utilizzando gli stabilizzatori ed alimentando quindi le lampade alla tensione nominale, si può ottenere una riduzione del 5-6% della potenza nominale assorbita.

Lo stesso principio di funzionamento degli stabilizzatori permette la regolazione della tensione a valori inferiori a quello nominale. I regolatori centralizzati, oltre alla funzione di stabilizzazione, hanno anche la funzione di regolazione del flusso luminoso riducendo la tensione di alimentazione delle lampade attorno ai valori desiderati. Infatti le Leggi Regionali sull'inquinamento luminoso e le norme UNI per l'illuminazione stradale consentono di ridurre il flusso quando il traffico si riduce soprattutto nelle ore notturne.

Queste apparecchiature, essendo presenti sul mercato da parecchi anni e utilizzando una tecnologia abbastanza consolidata permettono di ottenere buoni risultati con una spesa contenuta; necessitano infatti di circa 30 euro/punto luce (valore medio con 100 punti luce a quadro) che possono arrivare fino a 60 euro/punto luce se si telecontrollano i quadri. Trovano una loro applicazione su utenze particolarmente grosse e con lampade tutte della stessa tipologia (tendenzialmente a vapori di sodio ad alta pressione). Hanno però qualche limite per il fatto che gli impianti soffrono spesso di cadute di tensione a fine linea piuttosto marcate soprattutto in impianti di illuminazione pubblica già esistenti e con linee piuttosto lunghe. Un altro limite è quello che non consentono di ridurre il flusso differenziandolo tra la via principale e quella secondaria e per punto luce. Di fatti, nel caso dei regolatori di flusso centralizzati, un quadro di



comando gestisce una o più linee (dove una linea si riferisce ad uno o più tratti di strada); ad ogni linea sono collegati più punti luce. La gestione è generalizzata alle linee collegate al quadro di comando, non agisce cioè sul singolo punto luce ma sull'intero tratto, o tratti, di strada.

### Alimentatori elettronici dimmerabili

Con gli alimentatori (o reattori) elettronici dimmerabili, la regolazione del flusso avviene direttamente sul punto luce tramite un ballast elettronico ed è quindi possibile differenziarla non solo per tratti di strada ma anche all'interno del singolo tratto. Questi dispositivi, sviluppatasi negli ultimi anni, sostituiscono gli attuali gruppi ausiliari (accenditore, reattore e condensatore) svolgendone le funzioni caratteristiche con un solo componente. In più aggiungono anche le funzioni di stabilizzatore e di riduzione della potenza quando è necessario e consentito.

Il grosso vantaggio è quello di poter eliminare anche le perdite del reattore ferromagnetico, che come detto, corrispondono a circa il 15% dell'energia assorbita da ogni lampada. In più consente anche di poter scegliere come ridurre una via rispetto ad un'altra contigua e facente parte della stessa utenza ed è in grado di funzionare anche in presenza di significativi sbalzi termici, che costituiscono la sollecitazione principale per i circuiti elettrici.

All'accensione, l'alimentatore aumenta gradualmente il valore di potenza assorbita dalla lampada, che poi stabilizza durante il periodo di normale funzionamento. In questo modo si evitano shock di sovracorrente all'accensione e da sbalzi di tensione durante il funzionamento (che possono avere oscillazioni anche del 20%). Con la funzione dimmer (che significa letteralmente attenuatore, regolatore) permette di ridurre la potenza negli orari stabiliti.

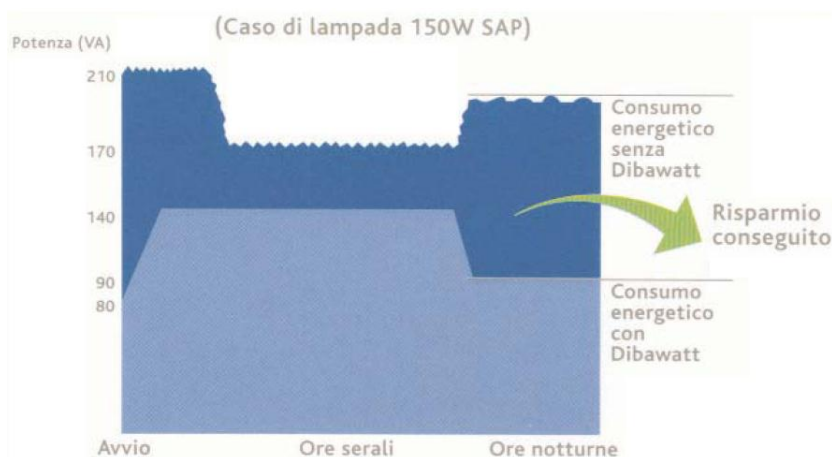


Fig. 2.9: esempio di risparmio con alimentatore elettronico

È importante sottolineare che, in caso di numerose lampade alimentate da un'unica linea molto lunga, queste vengono alimentate tutte alla stessa potenza. Si evita così la sovralimentazione delle prime e la sottoalimentazione delle ultime, migliorando la resa luminosa.

La quantità di risparmio energetico ottenuta è sembrata interessante da convincere anche Legambiente, per la prima volta nella sua storia, ad entrare con una piccola quota in un'azienda che produce questo dispositivo, per dare un segnale simbolico di incentivazione del risparmio energetico e di promozione dell'innovazione "verde" nel campo industriale.

I limiti attuali di questa tecnologia riguardano il costo di mercato del singolo ballast, che va dai 70 ai 130 euro/punto luce; inoltre l'esperienza non permette ancora di dimostrare che per un apparecchio

d'illuminazione in condizioni estreme (elevati sbalzi di temperatura per esempio) l'elettronica di bordo possa durare, come i sistemi tradizionali, oltre 15-20 anni.

Tipo di lampada	Valore minimo di tensione ammissibile	Valore di riduzione del flusso luminoso con tensione min.	Risparmio energetico
Sodio alta pressione	183	60 %	45-50 %
Sodio bassa pressione	190	10 %	35 %
Vapori di mercurio	183	40-60 %	32-40 %
Alogenuri metallici	183	60 %	40 %
Fluorescenza ad accensione convenzionale	190	35 %	35-45 %
Fluorescenza per risparmio energetico	190	25 %	30-35 %
Lampade miscelate	190	60 %	30 %

Tabella 5.1: valori di tensione di sottoalimentazione ammissibili

#### 2.1.4. Sistemi di telecontrollo

Insieme ai regolatori di flusso è consigliato e molto conveniente prevedere l'utilizzo di sistemi di telegestione o telecontrollo. Questi sono dei sistemi in grado di supervisionare un impianto e averne un controllo generale in tempo reale.

Il telecontrollo è un sistema ideato per la gestione degli impianti di illuminazione e riesce a far coniugare risparmi economici con sicurezza e continuità di servizio. I principali vantaggi offerti sono il controllo degli impianti in tempo reale, la razionalizzazione automatica del servizio in funzione della domanda stagionale e il miglioramento delle condizioni di manutenzione.

La segnalazione in tempo reale dei malfunzionamenti permette di intervenire tempestivamente per ripristinare le condizioni di normalità e di eliminare gli inutili costi dovuti alla ricerca dei guasti. Il telecontrollo consente inoltre di contenere i costi di esercizio e di gestione magazzino, di programmare gli interventi di manutenzione straordinaria e preventiva e di ottimizzare le risorse delle squadre di pronto intervento.

Un sistema di telegestione prevede fondamentalmente l'installazione dei moduli aggiuntivi nei quadri di alimentazione standard che consentono di trasmettere e ricevere i principali parametri elettrici ed attuare accensione o spegnimento all'ora prestabilita, vigilando sul corretto funzionamento dell'impianto.

Le informazioni memorizzate in una stazione remota sono periodicamente trasmesse ad una centrale di controllo, utilizzando i vettori di comunicazione disponibili, in base agli obiettivi e ai vincoli tecnici dell'applicazione. La rete telefonica commutata, abbinata a modem, è la più diffusa per affidabilità, presenza sul territorio, costi di installazione e canone contenuti. Frequente è anche l'uso della ricetrasmisione radio che non presentano costi di comunicazione. Sono utilizzati soprattutto per il collegamento con postazioni isolate e di difficile accesso, fatti salvi i condizionamenti derivanti dalle distanze, dalle condizioni orografiche di una specifica area e dalla disponibilità della frequenza. Recentemente, con la diffusione della telefonia cellulare, hanno iniziato ad imporsi soluzioni basate sul sistema GSM o GPRS (Geographic System Mobile), telefonia mobile di seconda generazione economica e facile da installare. Un altro sistema di comunicazione è quello via cavo, fibra ottica o coassiali ad uso esclusivo però eccessivamente costoso.

La centrale operativa prevede normalmente un computer con specifico software applicativo di controllo e supervisione, per comunicare a distanza con le stazioni remote, archiviare i dati e le loro elaborazioni. In questa sede avviene la gestione vera e propria degli impianti tele controllati. Esistono sul mercato configurazioni dalla massima semplicità a sistemi di telegestione con controlli più complessi, elaborazione di allarme e guasti, controllo energetico, gestione di risparmio energetico con regolatore di flusso, gestione di controllo punto a punto di luce, controllo dinamico di luminosità fino a cartografia integrata.

L'invio periodico dei consumi energetici consente di contabilizzare i consumi energetici di ogni singolo quadro elettrico; la telelettura dei quadri viene archiviata al centro in modo da poter aver automaticamente a disposizione i consumi mensili.

La minor tensione di alimentazione delle lampade nelle ore notturne e durante il ciclo di accensione consente un funzionamento a livelli prestazionali ridotti e quindi un minor affaticamento; questo permette, oltre ad un minor consumo, di aumentare la durata di vita delle lampade e dei corrispondenti ausiliari elettrici, che può anche triplicare. Inoltre è possibile ottenere una diminuzione dell'inquinamento luminoso pur mantenendo uniformità del flusso luminoso.

Sono due le soluzioni adottabili che non si escludono vicendevolmente: ad "isola" oppure "punto-punto". Nel caso della soluzione ad isola, i parametri elettrici sono monitorati all'altezza del quadro di accensione ove sono rilevati gli stati digitali per segnalare allarmi (scatto interruttori, differenziali, mancanza tensione, ecc).

Il sistema punto-punto è un insieme di apparecchiature elettroniche per il monitoraggio, la programmazione e il comando delle singole lampade. Il sistema si basa sulla tecnologia delle onde convogliate che consente una comunicazione digitale tra il modulo installato sul singolo punto luce e il modulo di gestione, posto all'interno del quadro di comando. Monitorando i parametri elettrici questo sistema consente la diagnostica totale della singola lampada e permette quindi di ottenere il massimo delle informazioni utili alla gestione, al fine di accendere, spegnere, ridurre al minimo il consumo e regolare l'intensità delle singole lampade utilizzando comandi manuali o automatici.

Il sistema punto-punto permette altresì di conteggiare le ore di funzionamento di ciascun punto luce, segnalare preventivamente l'esaurimento delle lampade e sfruttare al massimo la vita intrinseca delle stesse. Le informazioni elettriche del singolo punto vengono trasmesse e memorizzate periodicamente nel modulo di gestione del quadro di comando. Il software di gestione preleva le misurazioni e genera le anomalie e gli allarmi in base ai criteri personalizzabili. È possibile dunque telegestire da una centrale il singolo punto luce, garantendo una gestione intelligente dell'illuminazione.

Tra le unità periferiche e l'unità intermedia solitamente si può utilizzare un sistema di comunicazione a onde convogliate sfruttando la continuità elettrica della linea di alimentazione. Questo sistema permette, la trasmissione delle informazioni attraverso gli stessi conduttori che trasportano l'energia, e quindi evita l'installazione di circuiti dedicati.

#### 2.1.5. Le tecnologie per la trasmissione di dati digitali

Una prospettiva ben più significativa potrebbe aprirsi con l'adozione delle tecnologie PLC (Power Line Communication) a banda larga. PLC è una tecnologia che permette di trasferire dati in forma digitale, utilizzando una classica linea elettrica trasformandola in un supporto di comunicazione. Consiste nell'aggiungere al segnale elettrico in bassa frequenza (50/60 Hz) uno nuovo a frequenza più alta. Esistono

due tipologie di tecnologie PLC, a bassa velocità, con frequenze intorno ai 112 kHz, e ad alta velocità, con frequenze tra i 2 e i 30 MHz.

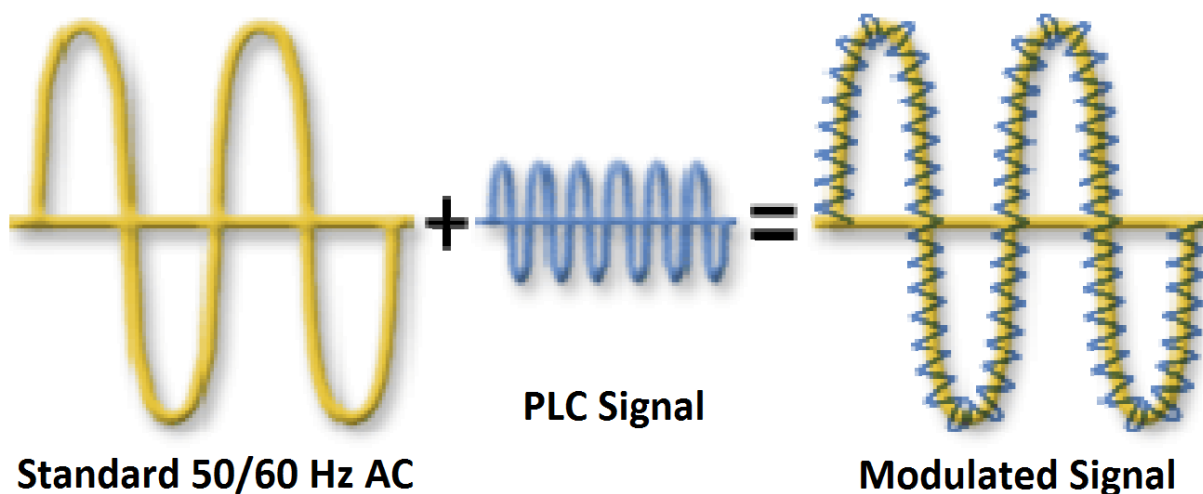


Fig. 2.10: modulazione del segnale nella tecnologia PLC

Si tratta di dispositivi, di recente sviluppo, che consentono di far viaggiare sulle linee elettriche contenuti digitali a banda larga (fino a 9 immagini di telecamere in tempo reale su una sola linea). Attraverso questa tecnologia, il cui payback si aggira intorno ai 5/6 anni nel caso della illuminazione pubblica con controllo punto-punto è possibile agganciare una ampia serie di sensori che possono andare dalla misura della qualità dell'aria, alla videosorveglianza, dalla comunicazione wi-fi o cellulare alla comunicazione su display, dal monitoraggio dei consumi energetici di edifici pubblici al monitoraggio del traffico. Questo permetterebbe l'aggregazione sulla linea della illuminazione di molti "smart services" con la conseguenza di abbattere i costi e moltiplicare le prestazioni.

Questa tematica, identificata sotto la keyword "smart city" rappresenta uno dei maggiori punti di approdo delle nuove tecnologie della illuminazione pubblica. La famiglia degli Smart Services, che si basano sulle tecnologie ICT, devono coniugare la semplicità di fruizione di un servizio con la facilità di installazione, utilizzando tecniche di connettività non invasive, a basso impatto e che valorizzano gli elementi infrastrutturali esistenti.

L'implementazione dei servizi smart basata sulla rete di illuminazione pubblica è semplice in quanto si può applicare facilmente su qualsiasi impianto di illuminazione pubblica o privata, efficiente e flessibile poiché trasforma una rete di illuminazione in una rete territoriale intelligente e utilizza tecnologie diverse in base alle esigenze del Comune. È inoltre scalabile, crescendo in base alle necessità del Comune, e profittevole.

Gli Smart Services rientrano nel Piano di e-governmet 2012 per lo sviluppo delle tecnologie ICT innovative per rendere più efficiente la Pubblica Amministrazione ed erogare servizi a valore aggiunto ai cittadini.

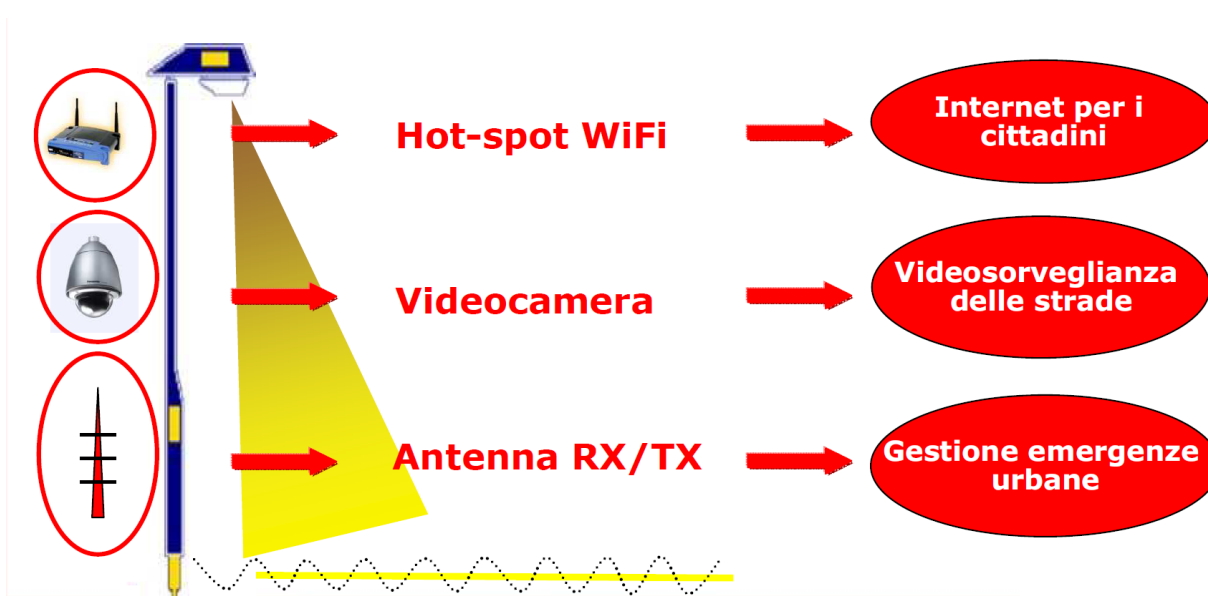
Lo studio che ENEA sta portando avanti nell'ambito dei suoi progetti ha due obiettivi principali.

Il primo obiettivo è quello di identificare una strategia ed una conseguente architettura per un sistema di telegestione adattiva ed integrato per gestione del "sistema-illuminazione" di una realtà territoriale complessa, come un Comune o un Distretto, con capacità di diagnostica e monitoraggio ed adattamento per pilotare il sistema in funzione del grado di fruizione degli impianti, delle condizioni climatiche e del grado di funzionalità degli impianti stessi.

Il secondo obiettivo è quello dello sviluppo di un sistema sensoriale “trasversale”, basato sulla visione, in grado di estrarre molte informazioni (quantificazione del passaggio/presenza di persone e veicoli, luce ambientale, situazioni anomale) a costi molto competitivi. Tale sistema sostituisce il componente base per alimentare i sistemi di predizione del profilo di utenza a breve e lungo termine, verificare il raggiungimento delle prestazioni e controreazionare i sistemi di controllo.

In prospettiva, nella prosecuzione dell’attività, tali tecnologie verranno integrate con altri sensori, come ad esempio quello per il monitoraggio della qualità dell’aria, e sviluppato un sistema che controlla una sottorete (smart street o smart square) e successivamente un insieme di sottoreti (rete urbana).

Ogni lampione di una strada è un fattore infrastrutturale che permette di attivare un’ampia gamma di servizi a valore aggiunto di grande interesse per il cittadino e per il territorio, come la videosorveglianza, la gestione di chiamate di emergenza e l’internet wireless urbano.



*Fig. 2.11: alcuni servizi smart del palo intelligente*

Un ruolo fondamentale del progetto è svolto, quindi, dal palo “intelligente”, un prodotto innovativo che oltre ad essere fonte di illuminazione è una porta di accesso alla rete pubblica urbana, un rilevatore di inquinamento atmosferico, un caricabatterie per veicoli elettrici e potenzialmente molto altro ancora.



*Fig.2.12: il palo intelligente*

Per il raggiungimento degli obiettivi prefissati il punto di partenza su cui lavorare è senza dubbio la telecamera, che offre una notevole quantità di informazioni che possono essere estratte. Infatti ai fini della determinazione della quantità di energia richiesta è necessaria una conoscenza approfondita sul flusso veicolare e pedonale, acquisita con il monitoraggio tramite i pali.

La gestione autonoma ed adattiva dell'illuminazione è il primo passo verso uno sfruttamento a 360 gradi delle potenzialità che tale apparecchiatura può offrire:

- Gestione, monitoraggio e diagnostica di edifici pubblici;
- Videosorveglianza;
- Infomobilità;
- Rilevamento di inquinamento acustico e ambientale;
- Servizi informativi;
- Gestione dei parcheggi;
- Gestione delle flotte di mezzi pubblici;
- Servizio di connessione wireless;
- Caricabatterie per veicoli elettrici;
- Gestione delle emergenze.

La videosorveglianza autonoma in termini di identificazione di anomalie quali congestione del traffico, incidenti o rapine è un aspetto interessante in quanto difficilmente un Comune ha i fondi e la necessità sostenere un servizio di videosorveglianza con personale attivo 24 ore su 24 e in quanto esiste una crescente richiesta di sicurezza da parte del cittadino.

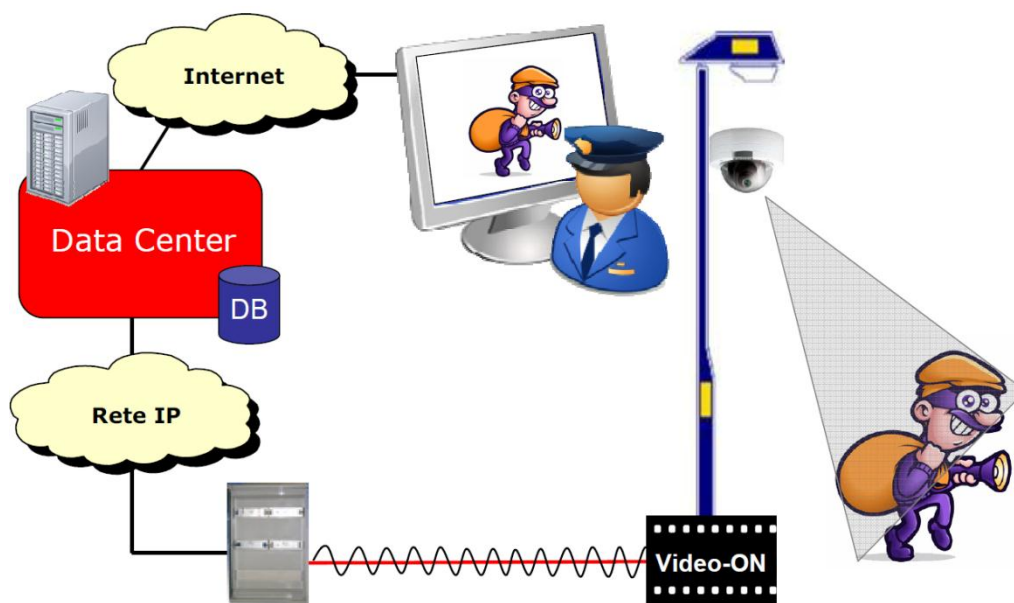


Fig. 2.13: principio di funzionamento del sistema di videosorveglianza

La funzione di Hot-SpotWi-Fi consente di utilizzare outdoor i dispositivi dotati di accesso a Internet wireless (smartphones, palmari, laptop), sfruttando la tecnologia ad onde convogliate. Attualmente una connessione outdoor viene offerta dagli operatori telefonici con tecnologia GSM o UMTS, ed ha costi superiori alle tariffe Internet offerte indoor. Utilizzare la tecnologia ad onde convogliate offerta dai pali intelligenti consente un abbattimento dei costi di connessione e una copertura completa.

Il palo intelligente svolge anche il compito di comunicare con i cittadini e i turisti attraverso dei pannelli informativi che consentono di indicare parcheggi di scambio, limitazioni di traffico o comunque informazioni di pubblica utilità, effettuare pubblicità personalizzate, creare un canale di comunicazione diretto tra i cittadini e le amministrazioni comunali ed informare i turisti su eventi e iniziative di ogni tipo.

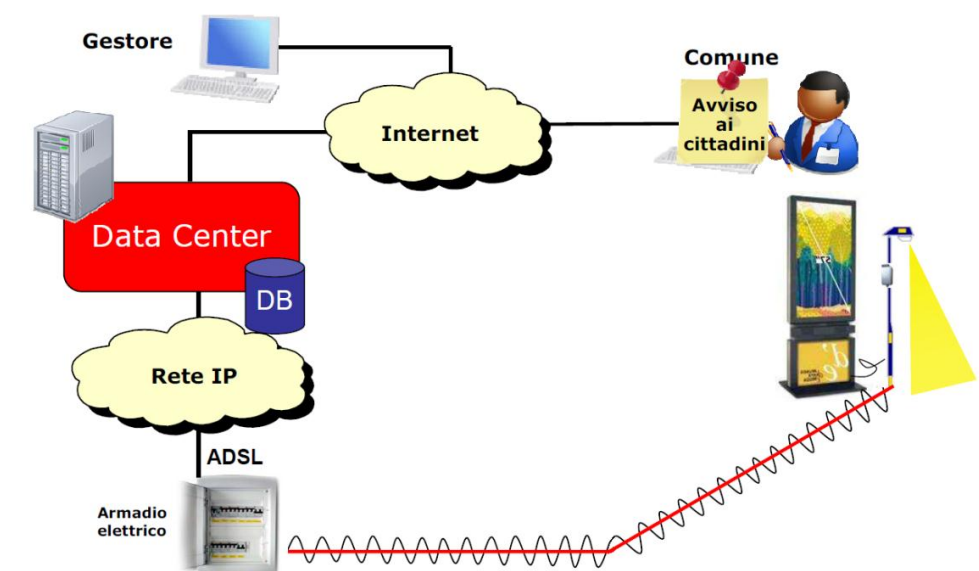


Fig. 2.14: principio di funzionamento del sistema informativo per cittadini e turisti

La smart mobility è una famiglia di servizi che facilita la mobilità cittadina. Prevede degli apparati per la ricarica delle biciclette o delle carrozzelle elettriche, posizionati sui pali dell'illuminazione pubblica, sfruttando quindi la rete elettrica comunale. È possibile abilitare anche un servizio di noleggio di biciclette, tramite l'acquisto di una card comprensiva anche delle ricarica del mezzo.

La tecnologia PLC offre la possibilità di localizzare una chiamata di emergenza territoriale attraverso la rete elettrica dei lampioni ottimizzando la gestione del soccorso migliorando i tempi e la qualità dell'intervento, in termini di professionalità specifica dell'equipe sanitaria e di apparecchiature idonee trasportabili sul posto.

Il servizio è finalizzato a localizzare e fornire supporto da remoto ai cittadini che necessitano di un sistema di protezione in grado di intervenire al primo segnale di pericolo o malessere e a gestire le situazioni di emergenza ed urgenza di natura medica, di pubblica sicurezza e tecnica.

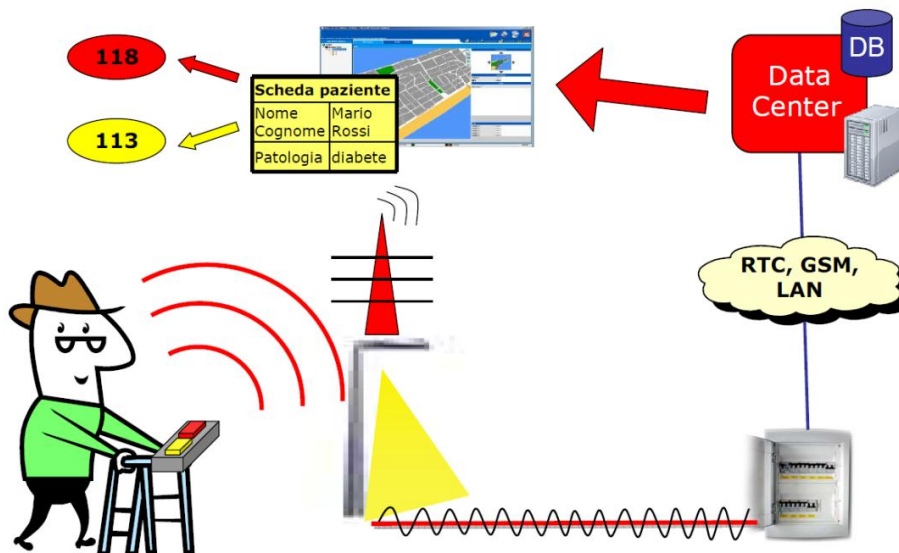


Fig. 2.15: principio di funzionamento del sistema di gestione di una emergenza

Uno dei principali vantaggi che risiede nella possibilità di implementare tutte queste funzionalità grazie all'impianto di illuminazione pubblica e alle tecnologie ICT e PLC consiste nell'abbattimento dei costi di investimento, decisamente minori che se si installassero singoli sistemi per svolgere tutte queste mansioni, e di esercizio. Altro aspetto chiave è la qualità del servizio reso alla popolazione e quindi il ritorno di immagine che ne consegue.

Per la trasmissione dei dati digitali esistono anche due tecnologie senza filo:

- I ponti radio
- ZigBee

I ponti radio fissi si utilizzano prevalentemente nelle aree rurali o montagnose non servite dalla banda larga, o per collegamenti di emergenza. Utilizzano prevalentemente le frequenze libere 2.4 GHz (Wi-Fi) e 5,7 GHz (Hiperplan) e richiedono l'installazione di antenne direzionali paraboliche o di antenne direzionali intelligenti. Le tecnologie attualmente più diffuse sono Wi-Fi, Hiperplan e WiMax. Molti prodotti sul mercato sono in grado di gestire contemporaneamente varie tecnologie (Wi-Fi, Hiperplan, UMTS, WiMax).

Queste tecnologie sono spesso utilizzate per attenuare il digital divide, cioè il "gap" tecnologico che si viene a creare tra aree geografiche diverse per motivi dovuti a ostacoli naturali, situazione economica svantaggiata o limitato sviluppo delle infrastrutture. L'impegno di limitare o eliminare il digital divide in Italia, portando la banda larga quasi ovunque, è un passo essenziale per lo sviluppo del paese.

La tecnologia Wi-Fi è molto utile per collegare tra di loro edifici fino a qualche km di distanza, con l'aiuto di antenna amplificate (wireless bridge).

La principale difficoltà è costituita dagli eventuali ostacoli presenti tra i due punti da collegare, che devono essere in vista ottica (line-of-sight). Quando sono utilizzati, i bridge wireless consentono di realizzare tra varie sedi collegamenti completamente gratuiti a velocità media e alta (da 1 a 10 Mbps e oltre). Questa tecnologia può quindi rivelarsi utile per collegare, ad esempio, castelli e borghi posti in posizione elevate in luoghi scoscesi, dove spesso non sono disponibili linee fisse a banda larga.

Quando servono maggiori velocità o sono in gioco distanze maggiori, si utilizzano Hiperplan o WiMax.



### 2.1.6. Rifasamento

Nei circuiti in corrente alternata la potenza istantanea su un generico bipolo si scrive come segue:

$$p(t) = V_M \sin(\omega t + \varphi) I_M \sin \omega t = \frac{1}{2} V_M I_M [\cos \varphi (1 - 2 \cos 2\omega t) + \sin \varphi \sin 2\omega t]$$

Si tratta di una sinusoide con frequenza doppia rispetto a quelle di tensione e corrente.  $\varphi$  è l'angolo di sfasamento. La componente in  $\cos \varphi$  si mantiene sempre positiva e rappresenta quindi potenza assorbita dal bipolo (*potenza attiva*). L'altra componente, quella in  $\sin \varphi$ , invece, oscilla attorno allo zero e rappresenta quindi una potenza alternativamente immagazzinata e ceduta dal bipolo (*potenza reattiva*).

Facendo la media della potenza istantanea sul periodo, si ottiene una grandezza che rappresenta l'energia assorbita dal bipolo in un periodo e viene chiamata potenza attiva o potenza reale. È legata alla componente a segno costante della potenza istantanea.

Alcuni bipoli come induttori e condensatori sono in grado di immagazzinare energia e cederla successivamente. L'effetto complessivo è che corrente e tensione vengono sfasate. Per tenere conto di questo fenomeno, si introduce la potenza reattiva.

Per quanto non dissipino energia, i bipoli reattivi fanno sì che in alcuni intervalli di tempo la corrente che circola sia maggiore di quella necessaria ai carichi resistivi. La potenza reattiva non è necessaria ai fini dell'utilizzo finale, ma non è eliminabile perché è diretta conseguenza della potenza nel sistema di induttanze e capacità talora non volute ma non eliminabili.

La presenza di potenza reattiva comporta un aumento sensibile delle perdite per effetto Joule sulle linee di trasporto. Se la potenza reattiva assorbita dal carico è positiva (potenza reattiva induttiva) la caduta di tensione sulla linea di trasmissione aumenta sensibilmente; se tale potenza reattiva è negativa (potenza reattiva capacitiva), tale caduta di tensione potrebbe essere negativa (tensione all'arrivo superiore a quella in partenza, con possibili sovratensioni pericolose); normalmente i carichi sono ohmico-induttivi, quindi si ha una caduta di tensione effettiva (tensione all'arrivo minore che in partenza).

Si può quindi concludere che la potenza reattiva è un fenomeno indesiderato perché aumenta le perdite e amplifica le cadute di tensione, con conseguente diminuzione dell'efficienza del sistema e peggioramento della qualità del servizio fornito all'utente.

Si definisce rifasamento qualsiasi provvedimento inteso ad aumentare il *fattore di potenza* ( $\cos \varphi$ ) di un dato carico, allo scopo di ridurre, a parità di potenza attiva assorbita, il valore della corrente che circola nell'impianto.

### **3. SVILUPPO DELLA METODOLOGIA ADATTIVA PER LO SMART LIGHTING**

#### **3.1. L'approccio alla illuminazione adattiva sviluppata da ENEA**

Attualmente si stanno sviluppando delle tecnologie innovative che mirano a superare i limiti mostrati da quelle precedentemente illustrate, che porteranno ad un illuminazione di tipo adattivo che vede nel "palo intelligente", che potrà integrare servizi smart nella rete di illuminazione pubblica, il suo elemento chiave.

L'illuminazione adattiva, essendo basata sul concetto di "energy on demand", necessita di un sistema di controllo e monitoraggio del traffico che sia in grado di estrapolare un indice del flusso veicolare e pedonale.

Il sistema di controllo può essere attuato attraverso l'uso di sistemi di misura in tempo reale della domanda ed attraverso l'utilizzo di un sistema di ottimizzazione. Potendo dotarsi di una capacità di modellazione e predizione della evoluzione a breve della domanda stessa sarebbe oltremodo possibile sviluppare un sistema adattivo che evolve in contemporanea alla domanda e generando informazioni sulla domanda stessa di energia. Un'illuminazione di tipo adattivo non solo porterebbe con sé tutti i vantaggi visti in precedenza della telegestione sul singolo punto luce, ma permetterebbe la gestione personalizzata del servizio di pubblica illuminazione consentendo notevoli vantaggi sia sul fronte del risparmio energetico che sui costi di manutenzione, grazie all'eliminazione degli sprechi nelle ore centrali della notte e alla riduzione di interventi "in field" di personale tecnico. Contemporaneamente fornirebbe informazioni utili per il controllo di gestione, misurando l'effettiva resa dei componenti installati e monitorando l'effettuazione dell'intervento e l'efficacia del manutentore. Garantirebbe inoltre una maggiore sicurezza, prevenendo le condizioni di pericolo, un servizio con un elevato livello di qualità, riducendo i reclami ed i tempi di intervento, ed una maggiore tutela dell'ambiente, diminuendo le scorie delle lampade guaste, l'inquinamento luminoso e l'immissione in atmosfera dei gas serra.

Disporre di tale tecnologie a livello di sistema porterebbe sicuramente un aumento dei costi, non eccessivo in quanto i sensori necessari sono a basso costo e l'intelligenza ha costi trascurabili nella replicazione, ma ad un significativo incremento del risparmio energetico. Tale incremento può andare da un ulteriore 10% fino ad un ulteriore 40% a seconda della tecnologia attuale con la quale la si confronta.

Sviluppare un'illuminazione di tipo adattivo creerebbe le basi per avere una piattaforma di abilitazione di servizi evoluti e di ottimizzazione dei servizi esistenti per il territorio ed i cittadini, basata sul concetto di LAN estesa sul territorio e che sfrutta l'impianto di illuminazione pubblica come elemento infrastrutturale; senza effettuare nuovi cablaggi né opere di scavo essendo quest'ultimo distribuito sul territorio, capillare e con i "nodi" facilmente localizzabili.

##### **3.1.1. Schema del sistema di controllo e di misura dell'indice di flusso del traffico**

La figura 3.1 mostra il diagramma di flusso del sistema di controllo dell'illuminazione pubblica. L'obiettivo è quello di sfruttare la sensoristica a basso costo installata su pali intelligenti, per estrarre informazioni utili sull'ambiente circostante.

La prima fase prevede l'acquisizione dei dati provenienti dai sensori dei pali intelligenti situati in una particolare area (una strada od una piazza) e vengono poi trasmessi da questi ad alcuni server centrali. I server elaborano i dati ricevuti e forniscono valori indicanti l'entità del flusso (veicolare e pedonale) rilevata. Tali valori vengono utilizzati per costruire ed aggiornare un modello predittivo della "domanda" di illuminazione. I dettagli della struttura del modello predittivo sono mostrati nella figura 3.2.

Il modello genera la predizione della domanda nell'immediato futuro e fornisce tale informazione ad un sistema di controllo, cui convogliano anche le informazioni provenienti dalle variabili ambientali e dalla diagnostica strumentale. La diagnostica individua eventuali situazioni anomale sfruttando le informazioni sullo stato corrente del traffico rilevato e quelle predette dal modello.

Al fine di determinare la potenza da immettere alle lampade dei lampioni è necessario conoscere oltre al potenziale flusso di traffico anche le condizioni atmosferiche e le condizioni della lampada stessa (una lampada usurata richiede una maggiore potenza per avere una determinata luminanza).

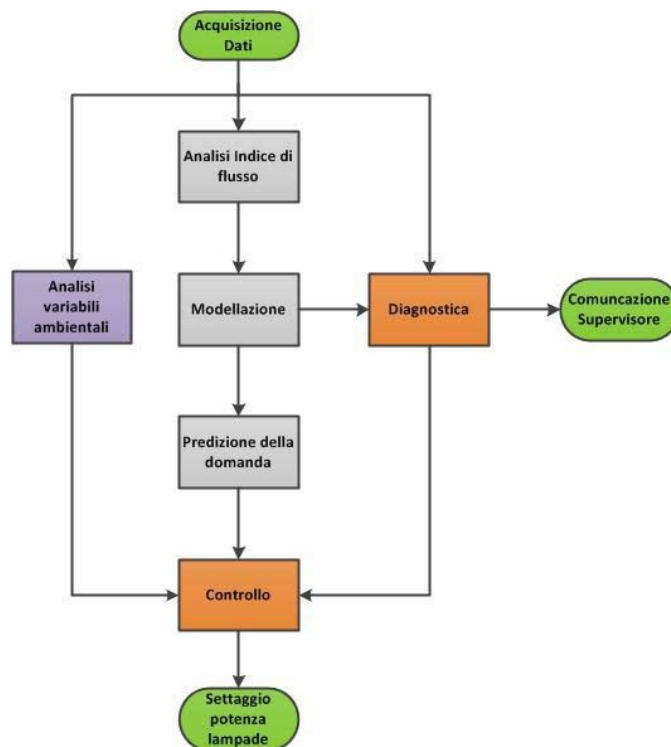


Fig. 3.1: diagramma di flusso del sistema di controllo dell'illuminazione pubblica

La figura 3.2 mostra il diagramma del modello predittivo e della fase di diagnostica. Il modello predittivo è addestrato utilizzando due tipi di dataset, uno basato sugli indici di flusso rilevato nell'arco di una settimana ed uno basato sugli indici rilevati nell'arco di alcune ore. Il modello fornisce quindi una predizione a lungo termine ed una a breve termine.

L'indice di flusso del traffico rilevato e quello previsto dal modello a lungo termine vengono inviati ad un rilevatore di situazioni anomale, se lo scostamento tra gli indici supera una determinata soglia viene avviato il processo di diagnostica. Se la situazione anomala deriva da un malfunzionamento strumentale (ad esempio improvviso calo della luminanza rilevata dovuto al malfunzionamento della lampadina) viene inviata una segnalazione di guasto. Se la situazione anomala deriva da un'incongruenza tra indici di flusso allora viene utilizzata la predizione a breve termine.

Si presuppone che la situazione di traffico anomala sia dovuta ad eventi straordinari (manifestazioni, concerti, eventi sportivi...) quindi basarsi su indici di traffico rilevati in situazioni normali potrebbe comportare previsioni fuorvianti.

Se invece non viene rilevata eccessiva discrepanza tra l'indice rilevato e quello previsto la previsione di base sul modello a lungo termine. L'indice rilevato viene utilizzato in ogni caso per aggiornare il modello.

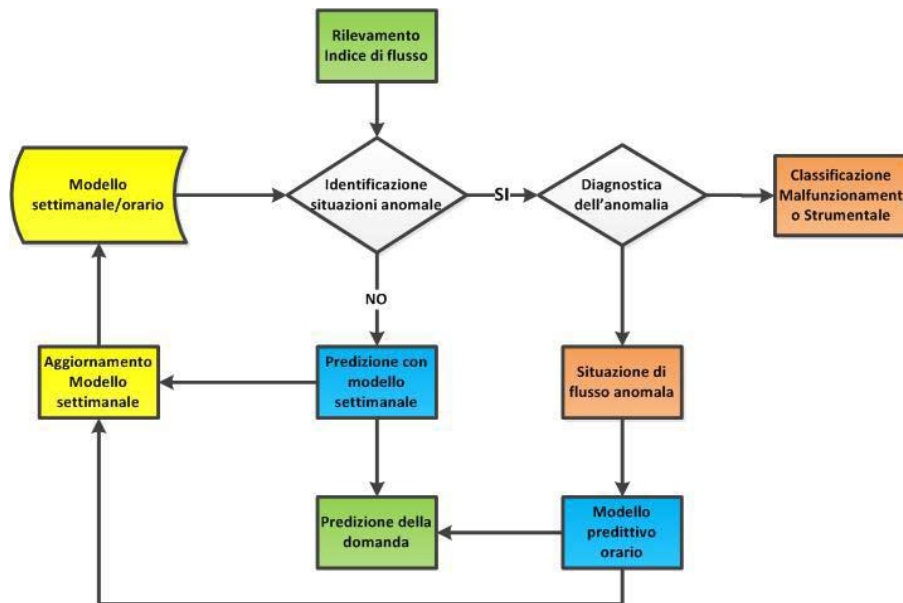


Fig. 3.2: diagramma del modello predittivo del flusso di traffico

Il sistema di elaborazione dell'indice di misura del traffico è la fase iniziale del processo di controllo avanzato descritto precedentemente. Tale sistema analizza il flusso video proveniente dalle telecamere installate sui lampioni intelligenti ed elabora un segnale di uscita proporzionale all'attività rilevata (traffico veicolare e pedonale). Nell'ottica dello sfruttamento della sensoristica dei pali è possibile estrarre una quantità elevata di informazioni dalle telecamere. L'indice del flusso di traffico è un parametro molto significativo: focalizzato in determinate zone di interesse dell'immagine permette il conteggio dei veicoli o dei pedoni, o il calcolo della velocità media di un veicolo.

Un problema che risulta immediatamente evidente è quello delle ombre; un filtro può limitare questo effetto, ma il rischio è di perdere gli oggetti piccoli in movimento, come i pedoni in lontananza.

Il tempo di computazione e lo spazio di allocazione di memoria sono altre due problematiche importanti di cui tener conto, in quanto lavorare con le immagini implica elaborare notevoli quantità di dati.

### **3.2. La correlazione tra potenza di alimentazione delle lampade e flussi veicolari: normativa ed approccio proposto**

#### **Definizioni**

##### ***Flusso luminoso***

Viene definito come il prodotto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente luminosa e l'angolo solido in cui è compreso il fascio luminoso stesso.

L'unità di misura nel S.I. è il lumen, che corrisponde al flusso luminoso emesso da una sorgente di una candela che emette un fascio con un angolo solido di uno steradiano ( $lm = cd * sr$ ).

##### ***Luminanza***

È definita come il rapporto l'intensità luminosa emessa da una sorgente verso una superficie normale alla direzione del flusso e l'area della superficie stessa. La grandezza è indicativa dell'abbagliamento che può indurre una sorgente.

Nel S.I. è espressa in Nit, che corrisponde alla luminanza di una candela verso una superficie di un metro quadrato ( $Nit = cd/m^2$ ).

##### ***Illuminamento***

Viene definito come il rapporto tra il flusso luminoso emesso da una sorgente e la superficie dell'oggetto illuminato, si riferisce pertanto all'oggetto illuminato e non alla sorgente.

L'unità di misura dell'illuminamento è il lux, che rappresenta l'illuminamento prodotto su una superficie perpendicolare ai raggi da una sorgente posta a un metro di distanza e che abbia l'intensità luminosa di una candela. ( $lux = lm/m^2$ )

Le norme vigenti consentono di regolare la luminanza emessa dalle sorgenti in relazione alla tipologia di strada e al flusso di traffico veicolare.

Il primo passo per far ciò è classificare la strada secondo il Codice della Strada e il DM 6792 del 05/11/2001

Classificazione strada	Carreggiate indipendenti (min)	Corsie per senso di marcia (min)	Altri requisiti minimi
A - Autostrada	2	2+2	
B - Extraurbana principale	2	2+2	tipo tangenziali e superstrade
C - Extraurbana secondaria	1	1+1	- con banchine laterali transitabili - S.P. o S.S.
D - Urbana a scorrimento veloce	2	2+2	limite velocità > 50 km/h
D - Urbana a scorrimento	2	2+2	limite velocità < 50 km/h
E - Urbana di quartiere	1	1+1 o 2 nello stesso senso di marcia	- solo proseguimento strade C - con corsie di manovra e parcheggi esterni alla carreggiata
F - Extraurbana locale	1	1+1 o 1	se diverse da strade C
F - Urbana interzonale	1	1+1 o 1	Urbane locali di rilievo che attraversano il centro abitato
F - Urbana locale	1	1+1 o 1	tutte le strade del centro abitato

*Tabella 3.1: classificazione delle strade*

Stabilita la classificazione delle strade è possibile, grazie alla norma UNI 1248, definire la categoria illuminotecnica di riferimento e quella di progetto, cioè corrispondenti al flusso di traffico nominale. La norma stabilisce anche, sempre in funzione del tipo di strade, le categorie illuminotecniche corrispondenti ai flussi di traffico inferiori al 25 % di quello nominale e compresi tra il 25 e il 50 %, sempre di quello nominale, grazie alla possibilità di declassare le strade.

Tipo di strada	Portata di servizio per corsia [veicoli/h]	Descrizione del tipo della strada	Limiti di velocità [km/h]	Categoria illuminotecnica di riferimento	Aree di conflitto	Complessità del campo visivo	Dispositivi rallentatori	100%	50%	25%
								Categoria illuminotecnica di progetto	Categoria illuminotecnica di esercizio	Categoria illuminotecnica di esercizio
A1	1100	Autostrade extraurbane	130/150	ME1	-	Normale		ME2	ME3a	ME4a
A1	1100	Autostrade urbane	130	ME1	-	Elevata		ME1	ME2	ME3a
A2	1100	Strade di servizio alle autotrade	70/90	ME3a	No	Normale		ME3a	ME4a	-
						Elevata		ME2	ME3a	-
A2	1100	Strade di servizio alle autostrade urbane	50	ME3a	Si	Normale		ME2	ME3b	-
						Elevata		ME1	ME2	-
B	1100	Strade extraurbane principali	110	ME3a	No	Normale		ME3a	ME4a	ME4a
						Elevata		ME2	ME3a	ME3a
B	1100	Strade di servizio alle strade extraurbane principali	70/90	ME4a	Si	Ininfluyente		ME1	ME2	ME2
C	600	Strade extraurbane secondarie (tipi C1 e C2)	70/90	ME3a	No			ME3a	ME4a	ME5
					Si			ME2	ME3a	ME4a
C	600	Strade extraurbane secondarie	50	ME4b	No			ME4a	ME5	ME6
					Si			ME3c	ME4b	ME5
C	600	Strade extraurbane secondarie con limiti particolari	70/90	ME3a	No			ME3a	ME4a	ME5
					Si			ME2	ME3a	ME4a
D	950	Strade urbane di scorrimento veloce	70	ME3a	No			ME3a	ME4a	ME5
					Si			ME2	ME3a	ME4a
D	950	Strade urbane di scorrimento	50	ME3a	No			ME3a	ME4a	ME5
					Si			ME2	ME3a	ME4a
E	800	Strade urbane interquartiere	50	ME3c	No		No	ME3c	ME4b	ME5
							Nei pressi	ME2	ME3c	ME4b
					Si		No	ME2	ME3c	ME4b
							Nei pressi	ME1	ME2	ME3c
E	800	Strade urbane di quartiere	50	ME3c	No		No	ME3c	ME4b	ME5
							Nei pressi	ME2	ME3c	ME4b
					Si		No	ME2	ME3c	ME4b
							Nei pressi	ME1	ME2	ME3c
F	800	Strade locali extraurbane (tipi F1 e F2)	70/90	ME3a	No			ME3a	ME4a	ME5
					Si			ME2	ME3a	ME4a
F	450	Strade locali extraurbane	50	ME4b	No			ME4a	ME5	ME6
					Si			ME3c	ME4b	ME5
F	800	Strade locali urbane (tipi F1 e F2)	50	ME4b	No			ME4a	ME5	ME6

Tabella 3.2: Classificazione illuminotecnica di progetto e di esercizio in funzione della categoria della strada e del flusso di traffico

Ad ogni categoria illuminotecnica sono associati il valore di luminanza che bisogna mantenere e altri parametri illuminotecnici.

Categoria	Luminanza del manto stradale della carreggiata			Abbagliamento debilitante	Illuminazione di contiguita'
	L min.mantenuta [cd/m <sup>2</sup> ]	Uo min.	UI min.	TI% max (+5% per sorgenti a bassa luminanza)	SR 2 min. (in assenza di aree di traffico con requisiti propri adiacenti alla carreggiata)
ME1	2	0,4	0,7	10	0,5
ME2	1,5	0,4	0,7	10	0,5
ME3a	1	0,4	0,7	15	0,5
ME3b	1	0,4	0,6	15	0,5
ME3c	1	0,4	0,5	15	0,5
ME4a	0,75	0,4	0,6	15	0,5
ME4b	0,75	0,4	0,5	15	0,5
ME5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
ME6	0,3	0,35	0,4	15	Nessun requisito

*Tabella 3.3: categorie illuminotecniche serie ME: strade a traffico motorizzato dove è applicabile il calcolo della luminanza, per condizioni atmosferiche prevalentemente asciutte.*



Tipo di strada	Portata di servizio per corsia [veicoli/h]	Descrizione del tipo della strada	Aree di conflitto	Complessità del campo visivo	Dispositivi rallentatori	100%	50%		25%	
						LUMINANZA [cd/m <sup>2</sup> ] L	LUMINANZA [cd/m <sup>2</sup> ] L	L/Lrif [%]	LUMINANZA [cd/m <sup>2</sup> ] L	L/Lrif [%]
A1	1100	Autostrade extraurbane	-	Normale		1,5	1	67	0,75	50
A1	1100	Autostrade urbane	-	Elevata		2	1,5	75	1	50
A2	1100	Strade di servizio alle autotrade	No	Normale		1	0,75	75	-	-
				Elevata		1,5	1	67	-	-
A2	1100	Strade di servizio alle autostrade urbane	Si	Normale		1,5	1	67	-	-
				Elevata		2	1,5	75	-	-
B	1100	Strade extraurbane principali	No	Normale		1	0,75	75	0,75	75
				Elevata		1,5	1	67	1	67
B	1100	Strade di servizio alle strade extraurbane principali	Si	Ininfluente		2	1,5	75	1,5	75
C	600	Strade extraurbane secondarie (tipi C1 e C2)	No			1	0,75	75	0,5	50
			Si			1,5	1	67	0,75	50
C	600	Strade extraurbane secondarie	No			0,75	0,5	67	0,3	40
			Si			1	0,75	75	0,5	50
C	600	Strade extraurbane secondarie con limiti particolari	No			1	0,75	75	0,5	50
			Si			1,5	1	67	0,75	50
D	950	Strade urbane di scorrimento veloce	No			1	0,75	75	0,5	50
			Si			1,5	1	67	0,75	50
D	950	Strade urbane di scorrimento	No			1	0,75	75	0,5	50
			Si			1,5	1	67	0,75	50
E	800	Strade urbane interquartiere	No	No		1	0,75	75	0,5	50
				Nei pressi		1,5	1	67	0,75	50
			Si	No		1,5	1	67	0,75	50
				Nei pressi		2	1,5	75	1	50
E	800	Strade urbane di quartiere	No	No		1	0,75	75	0,5	50
				Nei pressi		1,5	1	67	0,75	50
			Si	No		1,5	1	67	0,75	50
				Nei pressi		2	1,5	75	1	50
F	800	Strade locali extraurbane (tipi F1 e F2)	No			1	0,75	75	0,5	50
			Si			1,5	1	67	0,75	50
F	450	Strade locali extraurbane	No			0,75	0,5	67	0,3	40
			Si			1	0,75	75	0,5	50
F	800	Strade locali urbane (tipi F1 e F2)	No			0,75	0,5	67	0,3	40

Tabella 3.4: Luminanza in funzione della categoria della strada e del flusso di traffico

Conoscendo la luminanza che bisogna garantire è possibile risalire al flusso luminoso che la sorgente deve emettere attraverso il valore dell'angolo solido di emissione della sorgente e della superficie della sorgente. Dato che conoscere questi due parametri non è sempre possibile o comunque facile è tuttavia possibile ipotizzare un rapporto di proporzionalità diretta tra la luminanza e il flusso luminoso. Questo poiché, nella zona di funzionamento delle lampade usate per l'illuminazione stradale, è possibile ritenere costante, al variare della tensione di alimentazione, l'angolo solido di emissione.

Sono state effettuate delle prove in laboratorio per la caratterizzazione del regolatore LUCE al fine di individuare le curve caratteristiche Tensione-Potenza-Flusso luminoso per diverse tipologie di lampade.

Il regolatore è stato testato con 4 diverse lampade (Sodio alta pressione da 250 e 400 watt, Ioduri metallici da 250 e 400 watt).

Ciascuna lampada è stata installata interno del laboratorio CORVO a alimentata con il regolatore LUCE

Ciascuna lampada è stata alimentata con un ciclo di tensioni da 230 volt a 150 volt e ritorno con step di 10 volt, per ogni tensione del ciclo e una volta raggiunta la stabilità (30 minuti) sono stati misurati i seguenti parametri; tensione all'uscita del regolatore, corrente e potenza attiva del sistema lampada-alimentatore, illuminamento sul piano orizzontale, coordinate cromatiche e temperatura ambiente.

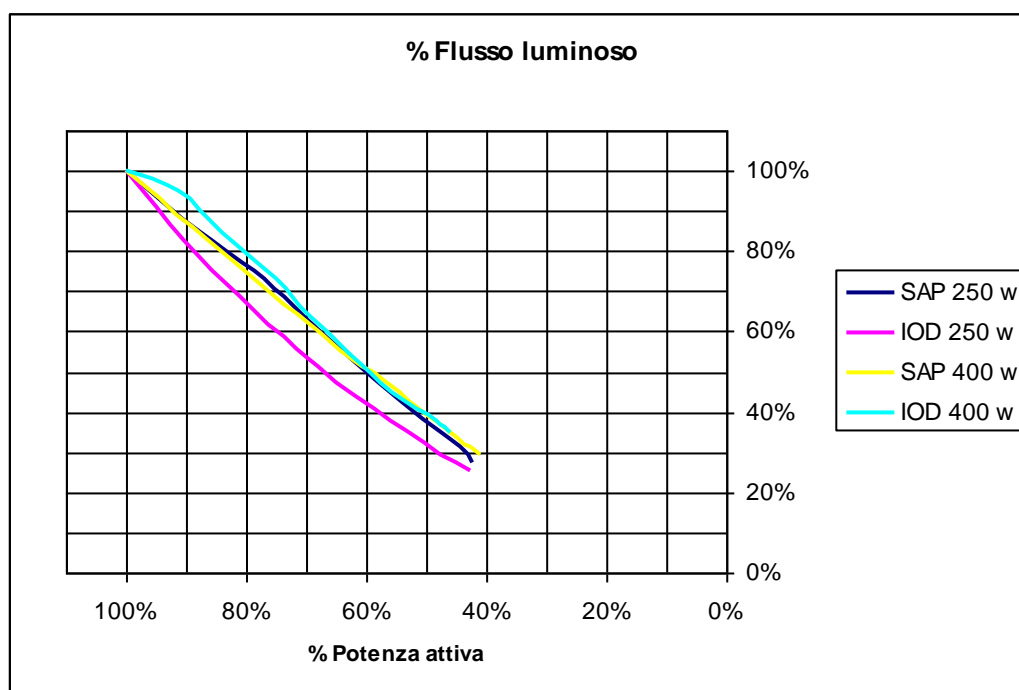


Fig. 3.3: relazione tra la potenza assorbita dal sistema lampada+alimentatore in % e il flusso luminoso in % emesso dalla sorgente luminosa.

Come si può vedere dal grafico sopra, tra il flusso luminoso e la potenza assorbita c'è un rapporto di proporzionalità diretta, quindi è possibile legare tale potenza direttamente alla luminanza.

Tipo di strada	Portata di servizio per corsia [veicoli/h]	Descrizione del tipo della strada	Aree di conflitto	Complessità del campo visivo	Dispositivi rallentatori	50%	25%
						P/Prif (X <sub>50</sub> )	P/Prif (X <sub>25</sub> )
A1	1100	Autostrade extraurbane	-	Normale		0,67	0,5
A1	1100	Autostrade urbane	-	Elevata		0,75	0,5
A2	1100	Strade di servizio alle autotrade	No	Normale		0,75	0
				Elevata		0,67	0
A2	1100	Strade di servizio alle autostrade urbane	Si	Normale		0,67	0
				Elevata		0,75	0
B	1100	Strade extraurbane principali	No	Normale		0,75	0,75
				Elevata		0,67	0,67
B	1100	Strade di servizio alle strade extraurbane principali	Si	Ininfluente		0,75	0,75
C	600	Strade extraurbane secondarie (tipi C1 e C2)	No			0,75	0,5
			Si			0,67	0,5
C	600	Strade extraurbane secondarie	No			0,67	0,4
			Si			0,75	0,5
C	600	Strade extraurbane secondarie con limiti particolari	No			0,75	0,5
			Si			0,67	0,5
D	950	Strade urbane di scorrimento veloce	No			0,75	0,5
			Si			0,67	0,5
D	950	Strade urbane di scorrimento	No			0,75	0,5
			Si			0,67	0,5
E	800	Strade urbane interquartiere	No		No	0,75	0,5
					Nei pressi	0,67	0,5
			Si		No	0,67	0,5
					Nei pressi	0,75	0,5
E	800	Strade urbane di quartiere	No		No	0,75	0,5
					Nei pressi	0,67	0,5
			Si		No	0,67	0,5
					Nei pressi	0,75	0,5
F	800	Strade locali extraurbane (tipi F1 e F2)	No			0,75	0,5
			Si			0,67	0,5
F	450	Strade locali extraurbane	No			0,67	0,4
			Si			0,75	0,5
F	800	Strade locali urbane (tipi F1 e F2)	No			0,67	0,4

Tabella 3.5: percentuali di riduzione della potenza assorbita in funzione della categoria della strada e del flusso di traffico

Per quanto detto finora, le normative vigenti porterebbero ad un tipo di regolazione a gradini, come riportato nel grafico sottostante.

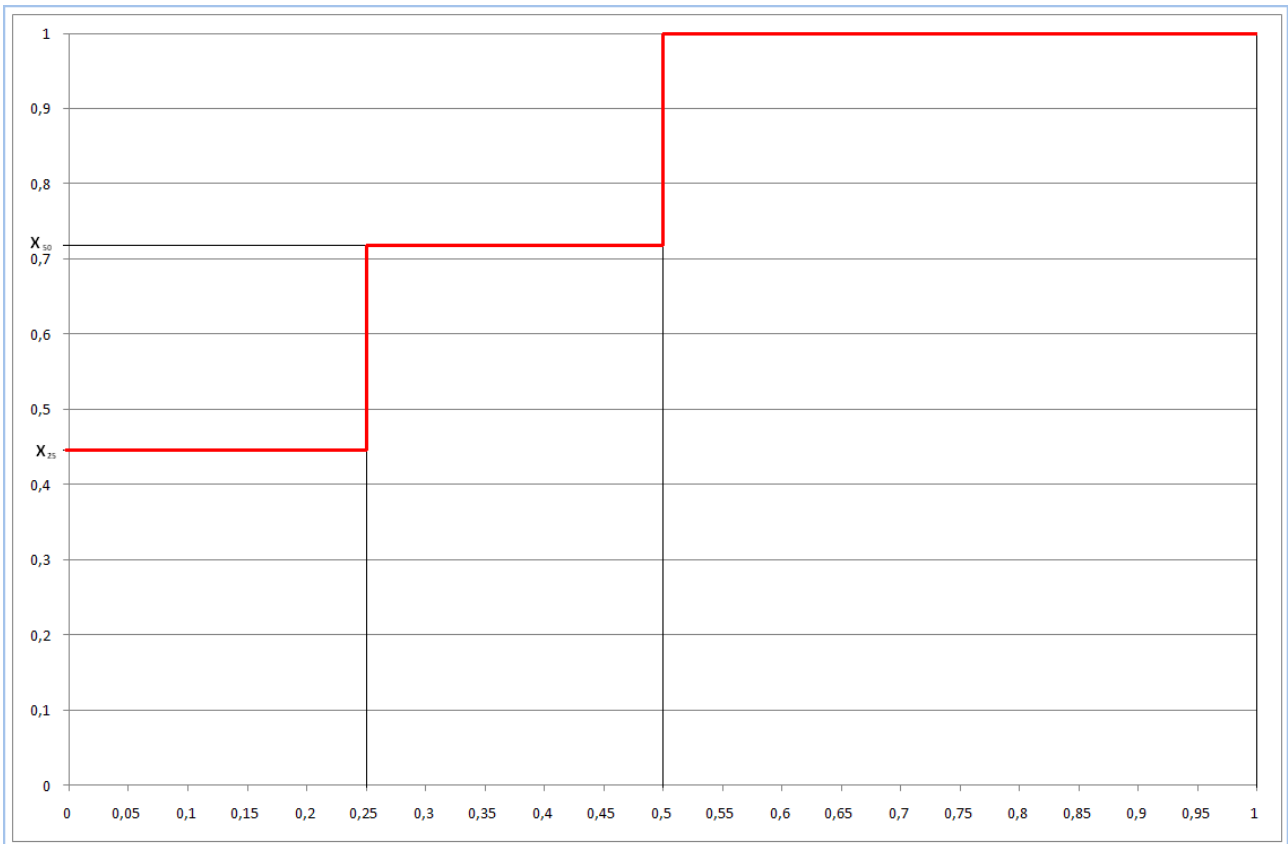


Grafico 3.1: Potenza assorbita/Potenza nominale (asse y) in funzione del traffico/traffico nominale (asse x)

Quindi si avrebbe:

- $P = P_n * X_{25}$  per  $T/T_n < 0,25$ ;
- $P = P_n * X_{50}$  per  $0,25 < T/T_n < 0,5$ ;
- $P = P_n$  per  $T/T_n > 0,5$ .

Tuttavia questo tipo di regolazione comporta tre principali svantaggi; infatti qualora il flusso di traffico veicolare dovesse oscillare attorno al 25 % (o al 50 %) avremmo continue variazioni della potenza assorbita dalle lampade con conseguente fluttuazione del flusso luminoso emesso. Questo potrebbe portare a una riduzione della vita dei componenti, problemi relativi alla sicurezza stradale.

Per queste ragioni è stata scelta come legge di regolazione una con un andamento più lineare, come riportato nel grafico sotto.

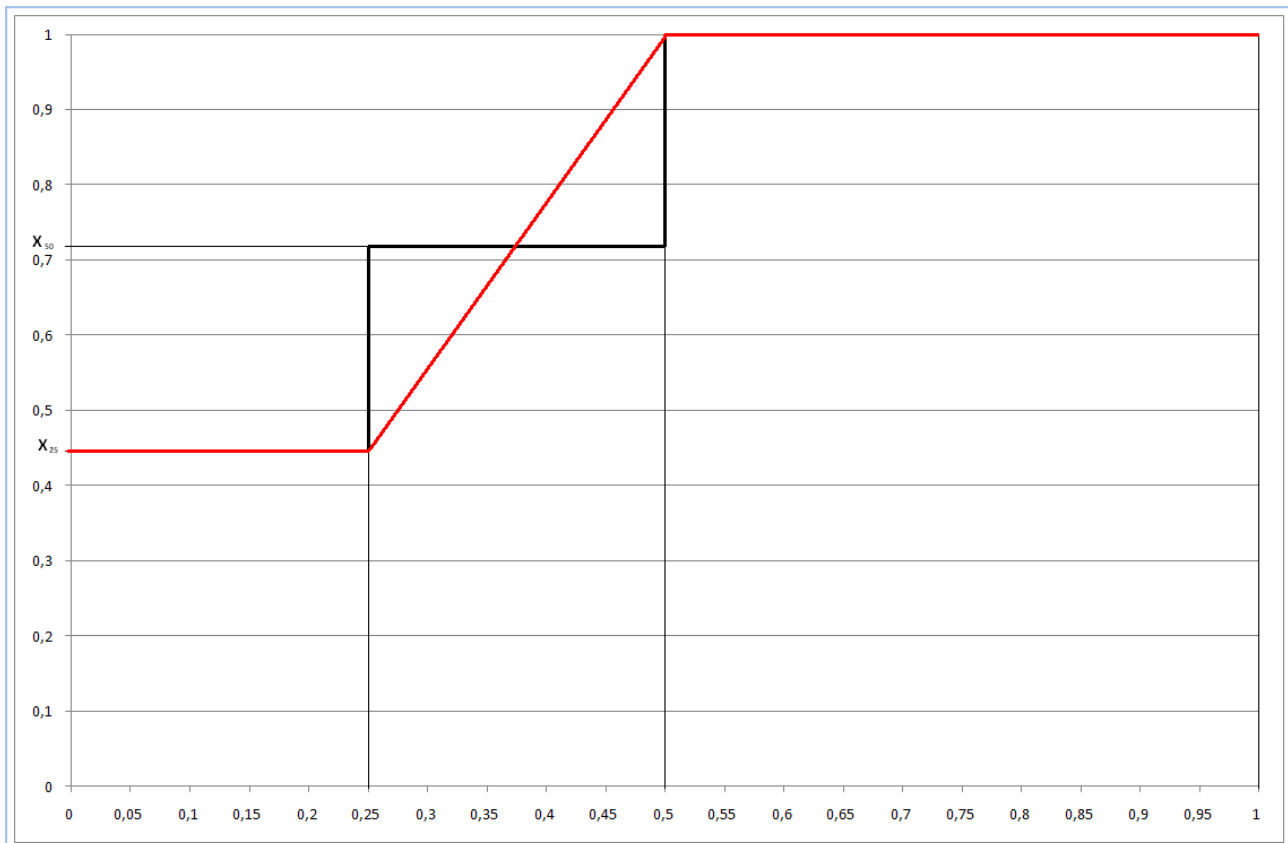


Grafico 3.2: Potenza assorbita/Potenza nominale (asse y) in funzione del traffico/traffico nominale (asse x), andamento proposto

In questo caso si avrebbe:

- $P = P_n * X_{25}$  per  $T/T_n < 0,25$ ;
- $P = P_n \left[ X_{25} + \left( \frac{T/T_n}{0,25} - 1 \right) (1 - X_{25}) \right]$  per  $0,25 < T/T_n < 0,5$ ;
- $P = P_n$  per  $T/T_n > 0,5$ .

### 3.3. Il controllo adattivo

La presente sezione si riferisce allo sviluppo di un sistema di controllo intelligente che superi il concetto della semplice regolazione di flusso a scalino (con le problematiche esposte nel paragrafo precedente) ma possa adattarsi punto punto alle condizioni di fruizione in modo da massimizzare confort e risparmio energetico ed aderendo alla strategia di consumare energia soltanto nella misura in cui l'energia è effettivamente richiesta.

La metodologia di regolazione adattiva agirà su frequenza oraria, ovvero regolerà il valore di potenza per l'ora successiva in funzione del flusso veicolare atteso in modo tale da limitare la fluttuazione del flusso luminoso e salvaguardare quindi lo stress per le lampade (problema che si avrebbe nel caso di una regolazione istantanea).

Tale miglioramento richiede in particolare un salto di qualità nella parte di intelligenza sia per l'estrazione di informazioni avanzate da sensori a basso costo, sia per predire la domanda di utilizzo, sia per ottimizzare il consumo energetico.

In particolare, dapprima sono descritte le metodologie per la modellazione (naive, statistica, reti neurali), quindi sono proposti i risultati sulla predizione a 1 ora di flussi di traffico veicolare.

Successivamente sono esposte le diverse strategie di controllo (statica ed adattiva) e di seguito sono riportati i risultati sperimentali delle diverse strategie in termini di percentuale di risparmio energetico ottenuto rispetto al caso senza controllo dell'illuminazione.

I risultati del presente studio dimostrano che con metodologie di controllo adattive basate su sistemi predittivi innovativi si possono ottenere dei guadagni in termini di risparmio molto significativi.

#### 3.3.1. Le metodologie di modellazione

In questo paragrafo descriviamo le metodologie che sono state utilizzate, sviluppate e comparate per la modellazione a breve termine (1 ora) di flussi di traffico veicolare urbano.

##### **Metodo 'naive'**

Per fornire un confronto significativo tra i vari metodi un modello 'naive' va introdotto per quantificare i miglioramenti introdotti da metodi sicuramente più sofisticati ed "intelligenti". Per dati periodici un modello naive può essere il seguente:

$$X_t = X_{t-S}$$

dove  $S$  è il periodo osservabile. Questo modello non fa altro che predire il segnale al tempo  $t$  fornendo lo stesso valore osservato esattamente  $S$  istanti passati. Nel nostro caso il valore di  $S$  è pari a 1, ovvero un'ora essendo i dati campionati con frequenza oraria. Quindi, in pratica come stima non si fa altro che usare il dato misurato dell'ora precedente.

##### **Modellazione statistica**

In questo settore applicativo uno dei modelli più comunemente utilizzati è quello del profilo orario medio settimanale. Ovvero, dai dati a disposizione si calcola per i diversi giorni della settimana il valor medio del flusso di traffico ora per ora, ottenendo così un profilo medio di  $24 \times 7 = 168$  punti.

### L'ensembling di reti neurali artificiali

Le reti neurali artificiali (RNA) [Arbib, 1995][Haikyn, 1999] sono modelli di calcolo che si ispirano al funzionamento del cervello per risolvere problemi di classificazione, modellazione e predizione di elevata complessità, ovvero dipendenti da un elevato numero di variabili ed altamente non lineari, e pertanto non risolvibili attraverso metodi algoritmici. I primi studi di tali modelli risalgono agli anni 40 con [McCulloch and W. Pitts, 1943], successivamente negli anni 60 con [Rosenblatt, 1962] e [Minsky e Papert, 1969] e negli anni 80 con [Rumelhart et al., 1986]. Da allora questi modelli sono stati applicati in settori che vanno dall'ingegneria alla sociologia, dalla medicina alla finanza, etc. etc.

L'unità di calcolo elementare di una RNA è il neurone (o nodo), in esso si possono identificare tre componenti principali:

- Un insieme di connessioni in ingresso, ciascuna delle quali viene caratterizzata tramite un peso reale che ne definisce efficacia e tipologia.
- Un sommatore, che calcola la somma pesata dei segnali d'ingresso.
- Una funzione d'attivazione, tipicamente non lineare, che ricevuto come ingresso il segnale calcolato dal sommatore, determina lo stato di uscita del neurone.

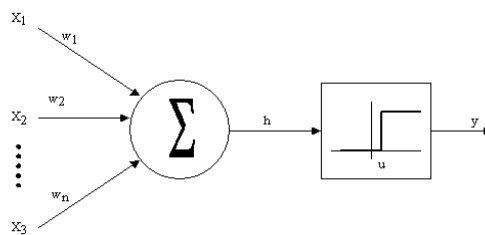


Fig. 3.4: modello di neurone artificiale

In termini matematici, indicando con  $x_i$  le componenti del vettore di ingresso,  $w_i$  i pesi sulle connessioni entranti del  $k$ -esimo neurone, l'uscita del neurone  $k$ -esimo, possiamo descrivere il comportamento di un neurone attraverso le seguenti equazioni:

$$y_k = \varphi(\text{net}_k - \theta_k) \quad (3.1)$$

Dove  $\text{net}_k$  è la combinazione lineare degli ingressi ed è chiamata input netto:

$$\text{net}_k = w^T x = \sum_{j=1}^n w_j x_j \quad (3.2)$$

Nella (3.1) abbiamo indicato con  $\theta_k$  il valore di soglia del  $k$ -esimo neurone, detto anche BIAS (Basic Input Attivazione System), cioè il grado di "sensibilità" con cui il neurone risponde alle perturbazione dell'input netto e con  $\varphi(\cdot)$  la funzione di attivazione. Ogni funzione monotona crescente e continuamente differenziabile, può rientrare tra queste, quella più comunemente utilizzata è il sigmoide:

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (3.3)$$

L'elemento che caratterizza i diversi tipi di RNA è la topologia delle connessioni dei neuroni. L'architettura più comunemente utilizzata è quella del tipo 'feed-forward'. In tale modello i neuroni sono organizzati a livelli: il primo è detto input layer perché riceve i vettori d'ingresso; poi vi sono uno o più strati nascosti (hidden layer) e uno di uscita (output layer). In tale tipo di rete neuroni prendono quindi il loro input solo dallo strato precedente, ed inviano il loro output solo allo strato seguente. Inoltre neuroni dello stesso strato non sono connessi tra loro. Il meccanismo di determinazione dei pesi delle diverse connessioni viene comunemente indicato addestramento. Tale procedura è a tutti gli effetti un problema di ottimizzazione in cui si richiede di minimizzare l'errore tra il dato reale e quello stimato, ovvero si adotta un meccanismo di 'apprendimento tramite esempi', ovvero un set di dati del fenomeno che si vuole modellare.

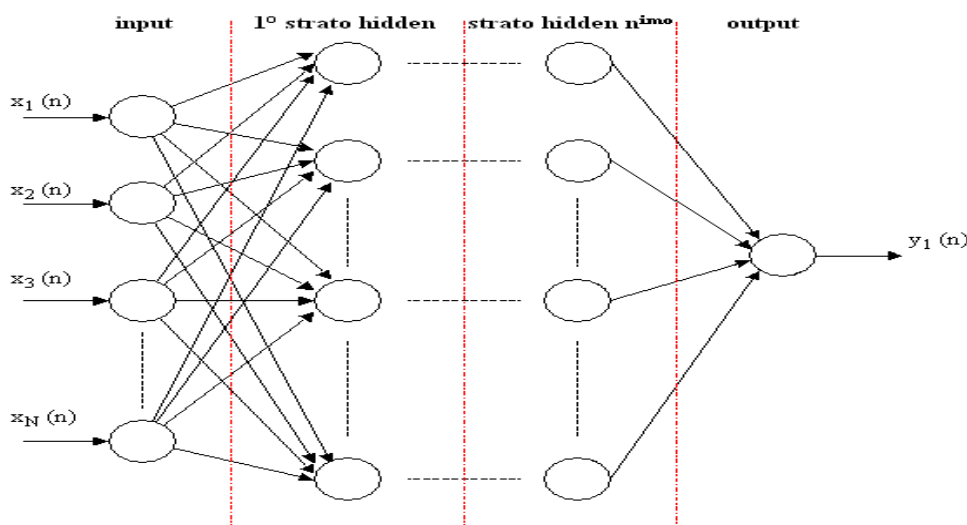


Fig. 3.5: modello di RNA feed-forward

Il concetto generale di 'ensembling' è quello di combinare tra loro n modelli in modo tale da ottenere un meta-modello capace di ottenere un'accuratezza superiore rispetto ai singoli modelli.

$$Y = f(y_1, \dots, y_n),$$

ove  $y_i$  è l'uscita dell'i-esimo modello (neurale)

Esistono diversi metodi per far questo [Krogh e Vedelsby, 1995],[Liu e Yao, 1999],[Breiman, 1999], tra questi il più semplice è quello di ottenere il meta-modello come combinazione lineare dei singoli modelli (noto anche Generalised Ensemble Method - GEM) e come caso particolare fra questi il più semplice (applicato in questo studio) è quello che (noto anche come Basic Ensemble Method - BEM) semplicemente fa la semplice media delle uscite.

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

### 3.3.2. La previsione a breve termine dei flussi di traffico veicolare urbano

Generalmente si parla di previsione a breve termine quando l'orizzonte temporale varia dall'ordine delle ore a quello di una settimana.



I dati di flussi di traffico normalmente mostrano una periodicità, spesso più di una, il flusso ad un preciso istante è generalmente dipendente dal valore del flusso nell'ora precedente ma anche nello stesso orario della settimana precedente e così via.

Una buona previsione deve essere accurata e, assai importante, presentare un errore massimo il più piccolo possibile. Infatti l'efficacia della gestione dell'illuminazione di una strada, o di una rete stradale, è fortemente influenzata dai picchi di errore ed un predittore con una bassa varianza può essere preferito ad uno che presenta un errore medio inferiore ma picchi di errore più accentuati. Sottostimare la richiesta può avere un impatto negativo sul Demand Response e può rendere il controllo più difficile. Al contrario una sovrastima può creare un surplus inatteso di produzione. In ambedue i casi è chiaro che più alto è l'errore e maggiori sono i costi di gestione, arrivando a situazioni in cui si è costretti a comprare elettricità dalla rete a costi più alti di quanto sarebbero stati grazie ad un'accurata previsione.

In tale contesto le tecniche di modellazione precedentemente descritte sono stati validate su dati reali provenienti dalla città di Terni su dati di flusso reali (valori medi orari) provenienti da 3 diverse strade le cui caratteristiche sono riportate nella seguente tabella.

	Descrizione	Tipo	Portata di servizio per corsia [veicoli/h]	Flusso di traffico minimo (FTMi)	Flusso di traffico massimo (FTMa)	Potenza minima
Strada 1	Strada extraurbana secondaria	C	600	25%	50%	50%
Strada 2	Strada urbana di scorrimento	D	950	25%	50%	50%
Strada 3	Strada urbana interquartiere	E	800	25%	50%	50%

Tabella 3.6: caratteristiche strade

Per sviluppare un modello predittivo neurale il caso più comune da considerare è quello che prende in ingresso i valori passati dell'uscita:

$$x_t = f(x_{t-1}, \dots, x_{t-N})$$

Il numero di nodi di ingresso e quindi il numero di intervalli da considerare come ingresso è una variabile critica per le applicazioni di previsione, poiché un numero troppo basso potrebbe limitare le informazioni disponibili per una previsione accurata mentre un numero troppo alto potrebbe rendere l'addestramento della rete troppo difficile per via della dimensione dello spazio delle soluzioni.

È stata quindi condotta un'analisi preliminare su una strada per determinare il numero ottimale di neuroni di input, ovvero l'ampiezza della storia passata ( $x_{t-N}$ ).

Per questa e tutte le successive elaborazioni il dataset, corrispondente a 3 mesi di misurazioni di valori medi orari di flussi veicolari, è stato partizionato in due sottoinsiemi, uno di training, l'altro di testing. Quest'ultimo è stato composto da 3 settimane, una per ogni mese, e serve a testare le capacità di generalizzazione della rete neurale.

Nella tabella seguente vengono riportati i dati sull'accuratezza nella previsione ad un'ora a valle dell'ensembling.

L'applicazione di tale metodologia su questa e tutte le successive analisi è stata compiuta su un set di 10 reti neurali.

N (ore precedenti in input)	Errore training	Errore testing
3	4.64 %	5.72 %
5	3.81 %	4.69 %
8	3.12 %	4.45 %

Tabella 3.7: analisi finestra temporale input

Da tale analisi si è visto che il modello migliore è quindi quello che ha come input tutti i valori delle precedenti 8 ore e sulla base di questo risultato sono stati condotti tutti gli esperimenti successivi. Nella tabella seguente vengono riportati gli errori medi nominali (ovvero il valore assoluto medio diviso il max-min del range) dei vari metodi messi a confronto. Per le reti neurali accanto all'errore medio (su 10 prove) viene riportata anche la deviazione standard. Inoltre per le reti neurali e per l'ensembling viene riportato tra parentesi anche la differenziazione tra training e testing.

	Naive	Statistico	Reti neurali	Ensembling
Strada 1	8.92 %	5.90 %	3.74 % $\pm$ 0.10 % (tr=3.54% $\pm$ 0.12% ts=5.12 % $\pm$ 0.26 %)	3.29 % (tr=3.12 %, ts=4.45 %)
Strada 2	9.99 %	7.14 %	4.00 % $\pm$ 0.10 % (tr=3.81% $\pm$ 0.10% ts=5.22 % $\pm$ 0.31 %)	3.43 % (tr=3.28 %, ts=4.37 %)
Strada 3	7.66 %	5.56 %	3.48 % $\pm$ 0.09 % (tr=3.40 % $\pm$ 0.08 % ts=3.70 % $\pm$ 0.28 %)	3.02 % (tr=2.98 %, ts=3.07 %)
Media	8.86 %	6.20 %	3.74 % $\pm$ 0.10 %	<b>3.25 %</b>

Tabella 3.8: comparazione modelli predittivi

Da tali numeri si evince come i metodi neurali siano sensibilmente più precisi dei metodi tradizionali (in particolare statistici). Inoltre, è da notare anche l'apprezzabile miglioramento che si ottiene passando dalle reti neurali al loro ensembling.

Nelle seguenti figure vengono comparati invece i segnali del metodo statistico (stat) e dell'ensembling neurale con storia di 8 ore (ens8).

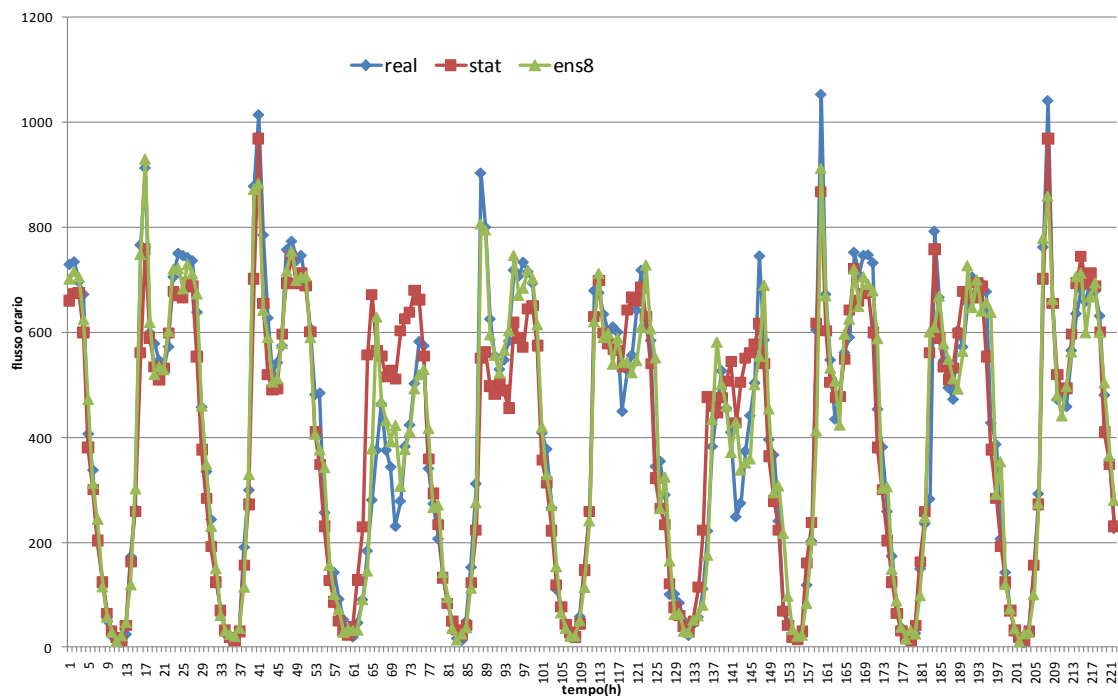


Grafico 3.3: confronto modelli di predizione strada 1



Grafico 3.4: confronto modelli di predizione strada 2

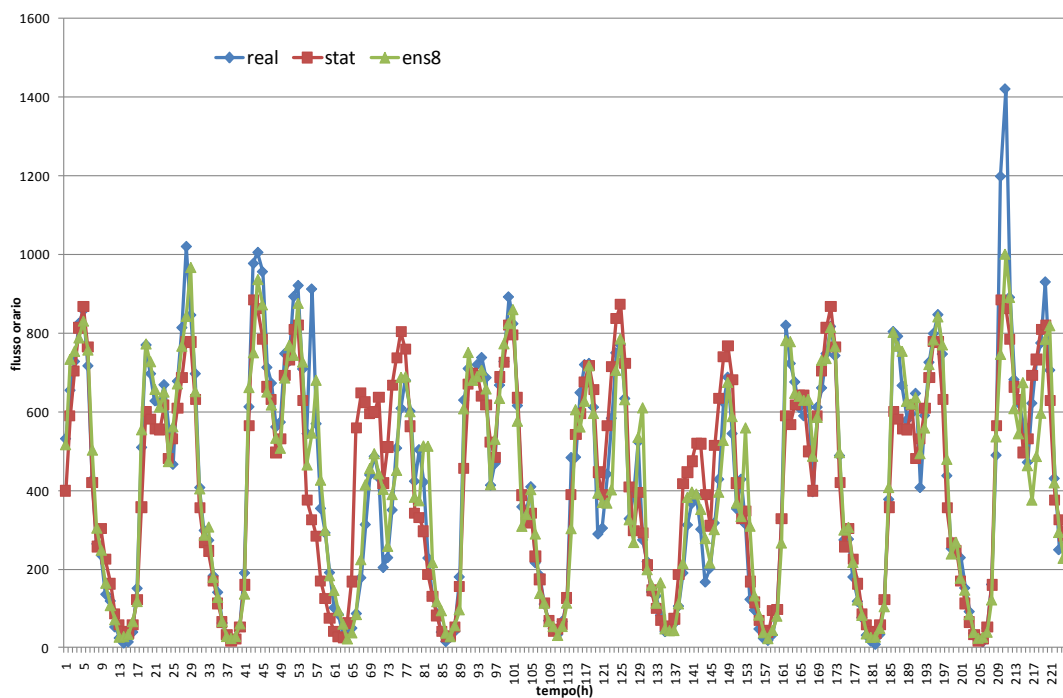


Grafico 3.5: confronto modelli di predizione strada 3

Da tali figure si nota facilmente come la metodologia proposta sia in grado di seguire situazioni anomale (fuori dal caso medio) molto meglio rispetto al metodo statistico. Questo risultato è dovuto al fatto che il modello neurale riesce a catturare la dinamica dei flussi di traffico e quindi è in grado di fornire una predizione sulla base del reale stato corrente di traffico. Questo fatto lo rende quindi molto sensibile anche alle anomalie.

Infine, è da sottolineare che tale strumento, oltre alla particolare applicazione, ha un valore scientifico a se stante che lo rende utilizzabile anche in altre problematiche riguardanti la gestione del traffico come ad esempio il controllo dei semafori.

### 3.3.3. Metodologie di controllo dell'illuminazione stradale

Per questo punto sono state impostate diverse strategie per il controllo dell'illuminazione con lo scopo di tradurre il flusso di traffico predetto in potenza di alimentazione delle lampade tenendo conto dei vincoli tecnologici e delle normative stradali.

Questo studio si basa su 3 mesi di dati corrispondenti ai mesi marzo-aprile-maggio ed è stato ipotizzato un funzionamento dell'illuminazione di 11 ore giornaliere dalle 20 alle 6.

Inoltre sono state ipotizzate tre strategie di controllo: nessun controllo (ovvero tengo il 100 % della potenza durante tutte le ore), statica e adattiva.

La strategia statica è molto semplice e per questo anche molto usata. Ovvero, si definiscono due fasce orarie durante le quali si applicano, in una, il 100 % della potenza e, nell'altra, (tipicamente la notte quando c'è il minor passaggio di veicoli) un percentuale di potenza minore. In questo studio la seconda fascia considera una potenza ridotta all'67 % (vedi tabella 3.5) ed è stata ipotizzata come orario tra le 24 e le 5, pari circa al 50 % del periodo di illuminazione.

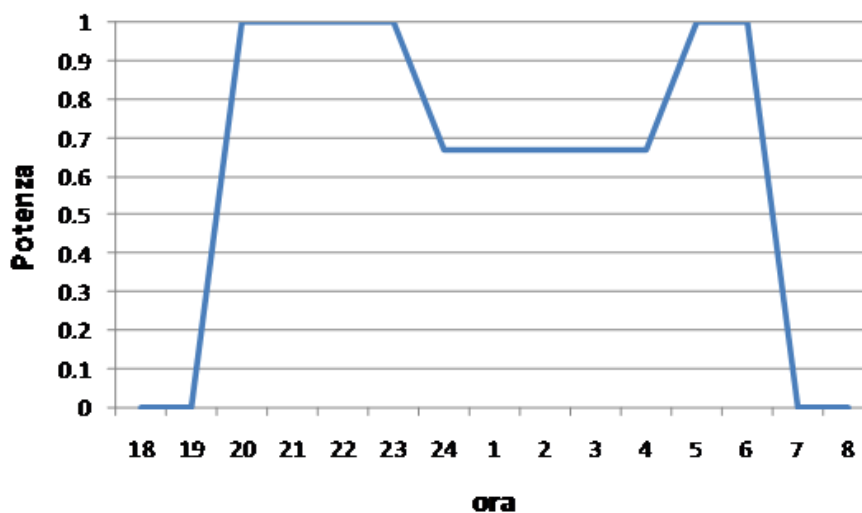


Grafico 3.6: strategia di controllo statica

La strategia adattiva invece è più raffinata. Ovvero, basandosi sulle previsioni di attività veicolare (sviluppate nel punto precedente), è capace di adattare ora per ora il flusso luminoso alla reale domanda del momento ottenendo così un duplice vantaggio sia in termini di risparmio che di confort.

Tale strategia suppone che siano montate lampade di tipo SAP che permettono una regolazione di flusso fino al 50 %.

Punto critico di quest'approccio è di avere un modello di previsione sufficientemente accurato.

La relazione che è stata sviluppata per mettere in relazione il flusso di traffico con la potenza erogata per l'illuminazione è la seguente:

detto  $x$  il flusso di traffico,  $y$  il valore nominale (da zero a uno) della potenza da erogare allora:

- se  $x > FTMa$   $y = 100 \%$
- se  $x < FTMi$   $y = 50 \%$
- se  $FTMi < x < FTMa$   $y = mx + q$

ove,  $FTMa$  e  $FTMi$  sono i flussi di traffico massimo e minimo definiti nella tabella 3.6 normalizzati rispetto alle portate di servizio definite nella stessa tabella,  $m = 2$ ,  $q = 0$  sono stati ricavati applicando l'equazione della retta passante per i punti  $A = (FTMi ; FTMa)$ ,  $B = (0,5 ; 1)$ , ovvero  $A = (0,25 ; 0,5)$ .

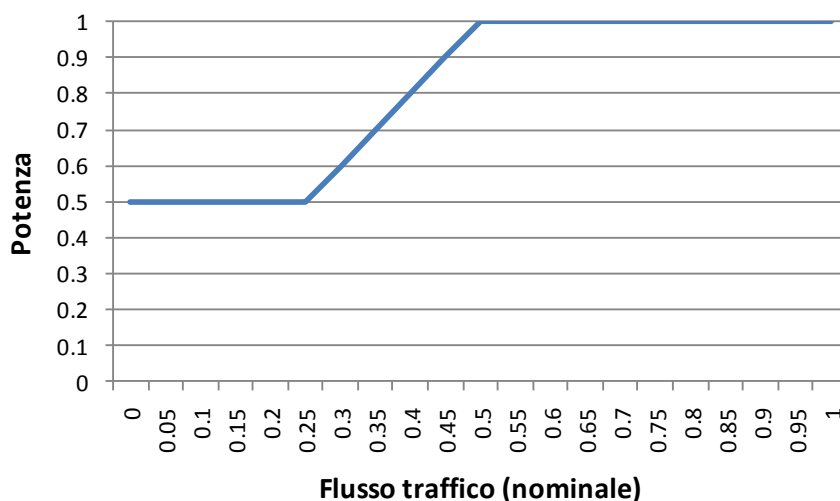


Grafico 3.7: strategia di controllo adattiva

### 3.3.4. Sperimentazione ed analisi

Lo studio sulle diverse strategie di controllo dell'illuminazione ha prodotto uno studio comparativo in cui sono stati valutati i risparmi energetici conseguiti.

Tutte le strategie di controllo sono state testate in modo off-line sulla stessa fascia oraria precedentemente definita e sui dati a disposizione (3 strade per 3 mesi città di Terni).

Nella seguente tabella vengono comparati i risparmi ottenuti dalle strategie statica, adattiva con predittore neurale (errore di stima 3%) e adattiva teorica con predittore perfetto (errore di stima 0%) rispetto al caso senza controllo, ovvero mantenendo il 100% della potenza per tutto il periodo considerato.

	Statico	Adattivo neurale	Adattivo teorico
Strada 1	15%	44.27%	44.55%
Strada 2	15%	37.31%	37.14%
Strada 3	15%	46.70%	46.51%
Media	15%	42.76%	42.73%

Tabella 3.9: comparazione risparmi ottenuti tra strategie di controllo

Dai dati di questa analisi appare evidente il notevole impatto sui consumi (risparmi medi di oltre il 40%) se si applicasse una strategia di controllo adattiva, in particolare si nota che i risparmi maggiori (circa il 45%) si otterrebbero per quelle strade a minor flusso di traffico (strade 1 e 3, vedi tabella 3.6). Inoltre, è da sottolineare il fatto che il controllo adattivo con i metodi di stima sviluppati offrono una performance che è quasi identica al caso teorico, il che valida la correttezza della metodologia sviluppata. Ovviamente, il successo di una strategia di controllo adattiva è strettamente legata all'accuratezza del modello di stima dei flussi, e nel caso in questione l'approccio neurale sviluppato offre l'accuratezza necessaria (errore 3%) affinché una tale strategia sia applicabile.

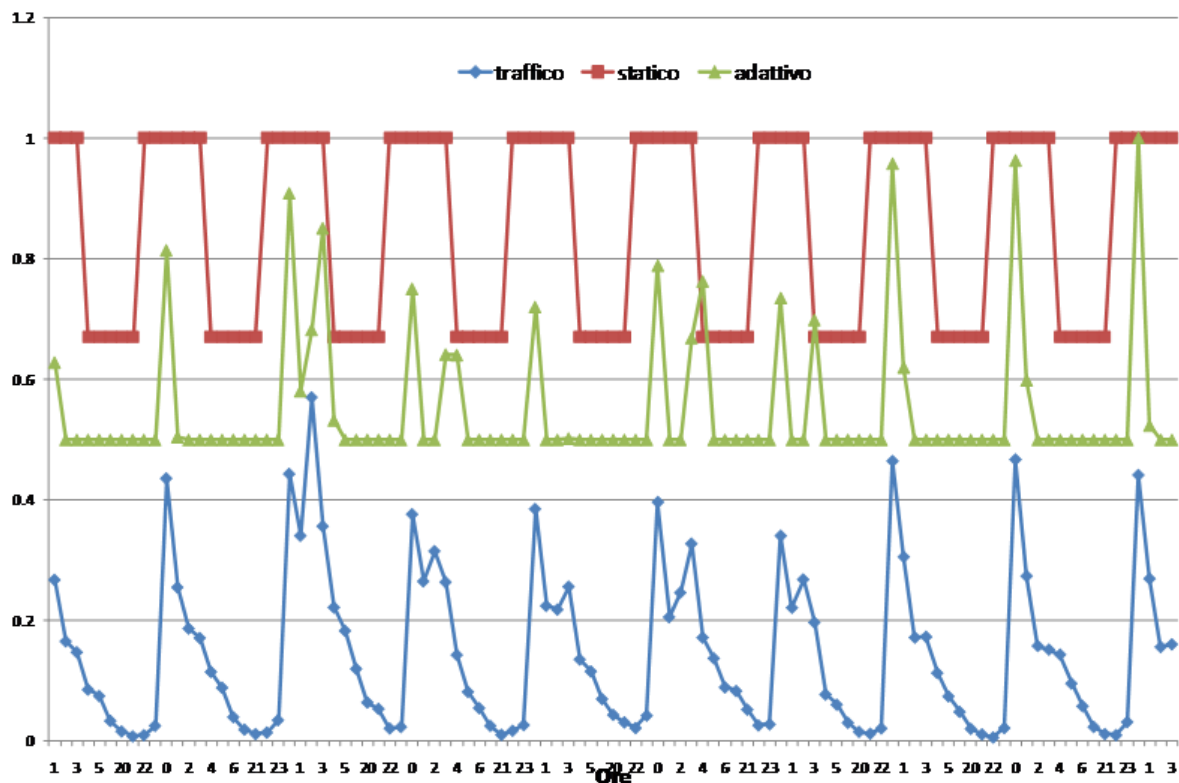


Grafico 3.8: comparazione strategie di controllo

Da tale grafico è evidente il vantaggio della strategia di controllo adattiva proposta. In particolare si nota come il flusso luminoso (e quindi anche la potenza) vengano regolate in funzione del flusso veicolare atteso implementando in tale modo una reale strategia di “energy on demand”. Inoltre in alcuni casi (due punti del grafico 3.8) il sistema adattivo regola correttamente l’illuminazione elevando la potenza mentre il sistema statico non è in grado di reagire a tale situazione anomala producendo una illuminazione al disotto di quanto previsto dalla normativa (discomfort). Si può concludere quindi che l’illuminazione adattiva produce un miglioramento sensibile sia in termini di risparmio energetico che di confort.

Infine, riportiamo anche il confronto sui risparmi ottenuti tra la diverse strategie relativo al solo periodo di riduzione del flusso della metodologia statica (h 0-5 al 67%).

	Statico	Adattivo neurale	Adattivo teorico
Strada 1	33%	50.7%	50%
Strada 2	33%	48.6%	47.6%
Strada 3	33%	50.4%	50%
Media	33%	49.9%	49.2%

Tabella 3.10: comparazione risparmi ottenuti tra strategie di controllo nell’orario di riduzione del flusso

### 3.3.5. Conclusioni

In questa sezione è stato presentato lo sviluppo di un sistema di controllo adattivo che supera il concetto della semplice regolazione di flusso (alimentazione ridotta della linea elettrica durante le ore notturne per risparmiare energia) ma che invece adatta l’energia erogata all’effettiva domanda del momento in modo tale da consumare energia soltanto nella misura e nel momento in cui l’energia è effettivamente richiesta.

Il lavoro ha affrontato dapprima il problema della modellazione di sistemi predittivi a breve termine (1 ora) dei flussi di traffico veicolare. Sono state descritte le metodologie per la modellazione (naive, statistica, reti neurali), quindi sono stati proposti i risultati sulla predizione a 1 ora di flussi di traffico veicolare. La sperimentazione ha prodotto sinteticamente i seguenti risultati : il metodo naive commette un errore del 8.9%, la modellazione statistica il 6.2%, quella neurale il 3.2%. Tali risultati dimostrano la bontà dell'approccio innovativo sviluppato per la predizione a 1 ora dei flussi di traffico. E' da notare che tale strumento, oltre alla particolare applicazione, ha un valore scientifico a se stante che lo rende utilizzabile anche in altre problematiche riguardanti la 'smart street' come ad esempio il controllo dei semafori.

Successivamente sono state esposte le diverse strategie di controllo : statica ed adattiva. La strategia statica consiste nel tenere per il 50% del periodo di illuminazione tutte le luci al 100% della potenza, mentre per il restante 50% del periodo di illuminazione al 67% della potenza. Tale strategia produce un risparmio rispetto al metodo senza controllo (100% della potenza per tutte le 10 ore di funzionamento) di circa il 15% nell'intero periodo di illuminazione e del 33% nella fascia oraria a potenza ridotta.

Fascia oraria	Risparmio energetico con regolazione <b>statica</b>	Risparmio energetico con regolazione <b>adattiva</b>
completa	15%	<b>42.76%</b>
ridotta	33%	<b>49.9%</b>

Tabella 3.11: quadro riassuntivo dei risparmi energetici

La strategia adattiva invece adatta la potenza al valore del flusso di traffico. Supponendo di avere la conoscenza esatta dei flussi di traffico (stimatore con errore 0%) otterremmo in teoria risparmi di oltre il 40% nell'intero periodo di illuminazione e del 50% se consideriamo la fascia oraria relativa al periodo in cui il controllo statico effettua una riduzione al 67%. Applicando il modello di stima sviluppato (errore del 3%) otteniamo dei risparmi quasi identici rispetto al caso teorico.

Il successo di tale strategia si fonda essenzialmente su due pilastri : il primo, quello di rendere adattivo il flusso luminoso in funzione del flusso di traffico. Il secondo, quello di avere un modello predittivo estremamente preciso ed accurato. In particolare, senza quest'ultimo non sarebbe possibile applicare una strategia di controllo adattivo.

## Riferimenti

Arbib M.A., The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, The MIT Press, Cambridge (MA),1995.

Breiman, L. Combining Predictors. In: Sharkey, A.J.C. (ed.): Combining Artificial Neural Nets – Ensemble and Modular Multi-net Systems. Springer, Berlin (1999) 31-50

Haykin S., Neural Networks, a comprehensive foundation (2<sup>nd</sup> edition), Prentice Hall, New Jersey, 1999.

Krogh A. and Vedelsby J. Neural network ensembles, cross validation, and active learning. In G. Tesauro, D.S. Touretzky, and T.K. Leen, editors, Advances in Neural Information Processing Systems, volume 7, pages 231–238. MIT Press, 1995.

Liu Y. and Yao X. Ensemble learning via negative correlation. Neural Networks, 12(10):1399–1404, 1999.

McCulloch W.S. and Pitts W. (1943) "A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity", Bull. Mathematical Biophysics, Vol. 5, pp. 115-133.

Minsky M. and Papert S. (1969). "An Introduction to Computational Geometry", MIT Press, Cambridge, Mass.

Rosenblatt R.(1962). "Principles of Neurodynamics", Spartan Books, New York.

Rumelhart D.E. and McClelland J.L. (1986). "Parallel Distributed Processing: Exploration in the Microstructure of Cognition", MIT Press, Cambridge, Mass.

## **4. ANALISI TECNICO ECONOMICA COMPARATIVA DELLA METODOLOGIA SMART SU UNA REALTA' URBANA**

In questo capitolo verrà svolta l'analisi tecnico-economica su quattro tipologie di intervento, tra cui la metodologia adattiva sviluppata da ENEA, scelte mediante l'utilizzo di indicatori economici quali il valore attuale netto (VAN) e il tempo di ritorno attualizzato (TRA). Le quattro tipologie di intervento sono:

- sostituzione delle lampade al mercurio con quella al sodio ad alta pressione;
- regolazione di linea del flusso luminoso;
- telegestione punto-punto del flusso luminoso;
- telegestione adattiva punto –punto del flusso luminoso.

Queste 4 verranno qualificate su un caso reale, più precisamente sul Comune di Castelnuovo Magra.

### **4.1. Caratteristiche del comune oggetto del caso studio**

Castelnuovo è un antico borgo situato sul monte Bastione, un colle che degrada verso la piana del fiume Magra, in provincia della Spezia in Liguria e fu fondato tra il 1187 e il 1203.

La scelta di questo comune è motivata principalmente da due ragioni; la prima è la quantità e qualità dei dati a disposizione sul sistema di illuminazione attuale di tale Comune, derivanti dalla compilazione della Scheda Illuminazione Pubblica in modo coerente a quanto detto nelle Linee Guida che l'ENEA pubblicherà entro l'anno; la seconda è la varietà di tipologie di strade presenti: extraurbane, urbane soggette a diversi livelli di traffico, aree pedonali e del centro storico.

Castelnuovo Magra copre una superficie di 14,93 km<sup>2</sup> e con i suoi 8251 abitanti ha una densità di 553 abitanti/km<sup>2</sup>.

Allo stato attuale il Comune ha 868 punti luce per una potenza installata di circa 110 kW che diventano pressappoco 135 kW considerando le perdite di linea e dell'impianto. Tali perdite rappresentano il 23 % della potenza installata. Sono installate 5 tipologie diverse di lampade: al sodio ad alta pressione (SAP), al mercurio (HG), fluorescenti (FLO), a LED (LED) e altre tipologie varie di minore importanza (ALTRO). L'impianto, come si vede nel grafico 4.1, è solo per il 32 % di proprietà del Comune e per il 68 % di ENEL SOLE.



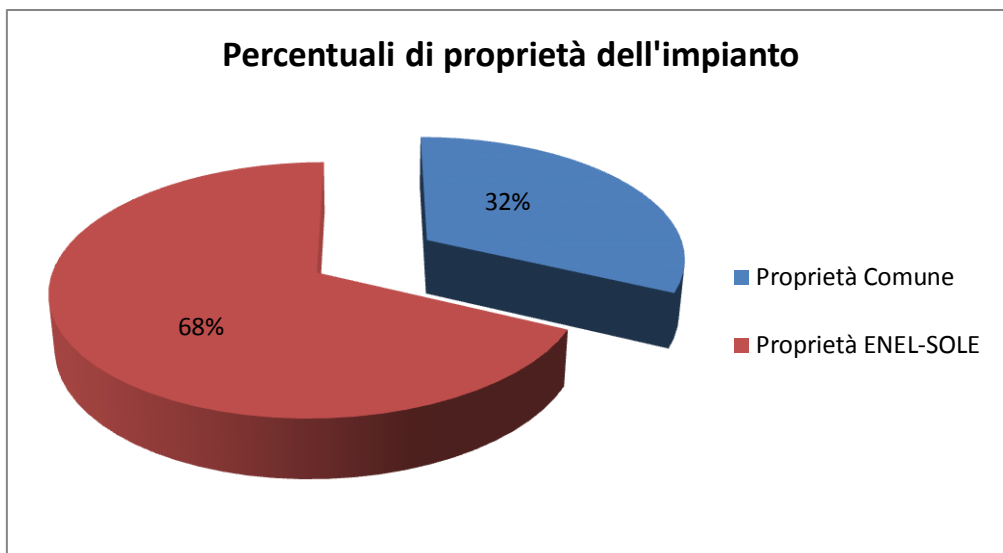


Grafico 4.1: percentuali di proprietà dell'impianto di illuminazione pubblica

Altre informazioni sulle lampade presenti sono riportate nella tabella 4.1.

TIPO	W	Quantità	Potenza installata [W]	Potenza totale [W]	Perdite [%]
Comune					
ALTRO	100	18	1800	2214	23
ALTRO	70	36	2520	3099	23
FLO	18	3	54	66	22
FLO	30	12	360	399	11
HG	125	34	4250	5161	21
HG	80	4	320	394	23
LED	60	27	1620	1992	23
LED	70	13	910	1119	23
LED	90	3	270	332	23
SAP	100	14	1400	1784	27
SAP	150	53	7950	10159	28
SAP	250	57	14250	17684	24
		274	35704	44403	24
Comune FV					
SAP	100	4	400	510	28
		4	400	510	28
ENEL SOLE					
HG	125	577	72125	87586	21
SAP	100	5	500	637	27
SAP	150	7	1050	1342	28
SAP	70	1	70	92	31
		590	73745	89657	22
TOTALE					
		868	109849	134570	23

*n.b. Comune FV: punti luce connessi a impianti fotovoltaici*

Tabella 4.1: caratteristiche dei punti luce

Complessivamente le 5 tipologie sono divise come riportato dalla tabella 4.2 e dai grafici 4.2 e 4.3.

	Quantità	Potenza installata [kW]	Potenza totale [kW]
HG	615	76,7	93,1
FLO	15	0,4	0,5
LED	43	2,8	3,4
SAP	141	25,6	32,2
ALTRO	54	4,3	5,3
NON HG	253	33,2	41,4
TOTALE	868	109,8	134,6

Tabella 4.2: punti luce e potenza per tipologia di lampada

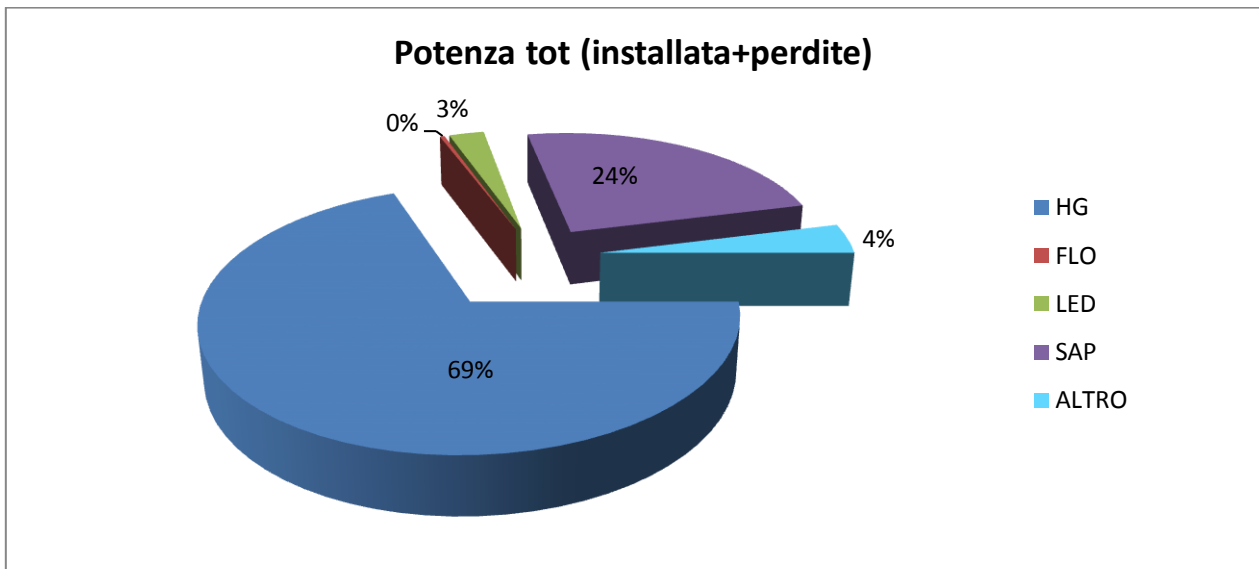


Grafico 4.2: ripartizione percentuale della potenza totale sulle 5 tipologie utilizzate

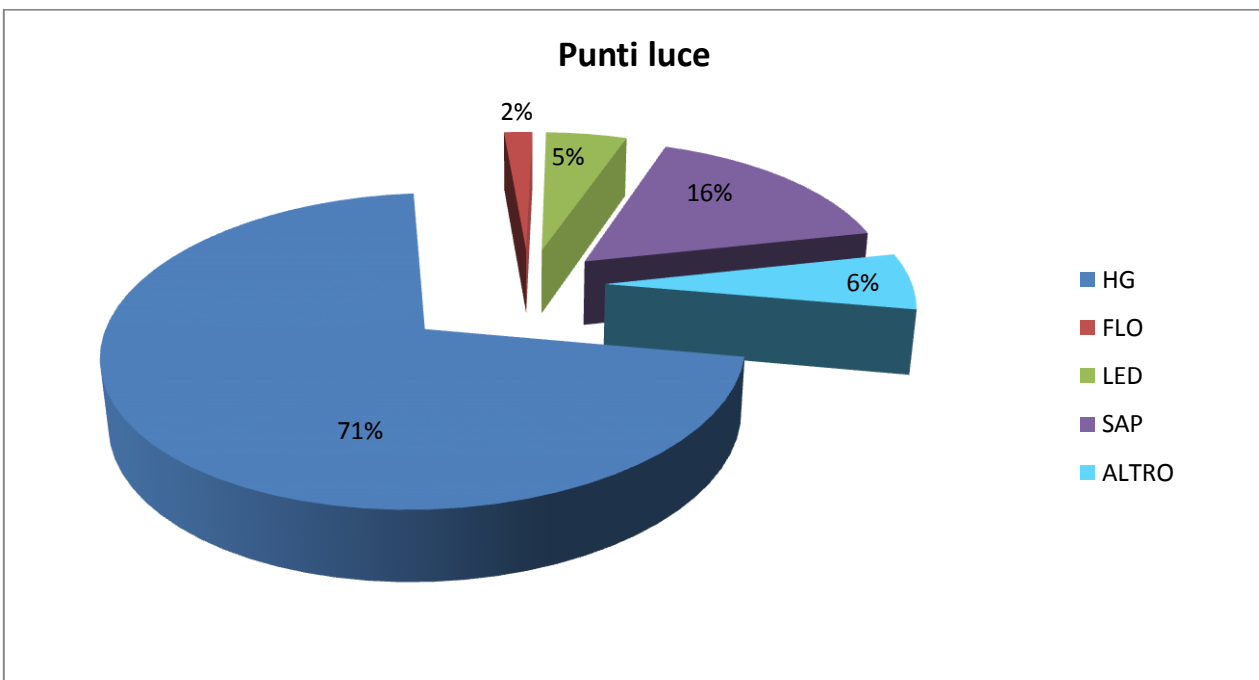


Grafico 4.3: ripartizione percentuale dei punti luce sulle 5 tipologie utilizzate

Si è visto nel capitolo precedente come la percentuale di presenza di lampade al mercurio rispetto al totale sia importante per avere un'idea del risparmio energetico conseguibile (percentuale di potenza) e dell'entità del corrispondente investimento economico (percentuale dei punti luce); come si vede sopra tale presenza è molto marcata, giacché con 615 punti luce e 93 kW corrisponde a circa il 70 % del totale.

Il Comune ha dichiarato di aver assorbito dalla rete elettrica un'energia di 561886 kWh/anno; considerando che i candelabri fotovoltaici rientrano nella somma della potenza del sito, ma non concorrono per la determinazione dell'energia consumata, l'impianto è rimasto acceso nel corso dell'anno 4200 ore.

Dunque la potenza che comporta un assorbimento di energia elettrica dalla rete è pari a quella totale (134,6 kW) decurtata della quota dei candelabri fotovoltaici (0,5 kW), ossia 134,1 kW.

Questo ha comportato l'utilizzo di 105 tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) cui corrispondono 332 tonnellate di anidride carbonica (tCO<sub>2</sub>) emesse in atmosfera.

Ipotizzando un costo dell'energia di 0,14 €/kWh e della potenza impegnata di 36 €/(kW\*anno) i costi energetici sostenuti sono stati complessivamente di circa 83500 euro (tabella 4.3), calcolati mediante la seguente formula:

$$C_E = C_{FE} + C_{VE} = P * C_P + E * C_E = P * C_P + P * h * C_E$$

dove:

- C<sub>E</sub>: spesa totale per l'energia annua (83490 €/anno);
- C<sub>FE</sub>: spesa fissa per l'energia annua (4286 €/anno) (4 %);
- C<sub>VE</sub>: spesa variabile per l'energia annua (78664 €/anno) (96 %);
- P: potenza totale (134,1 kW);
- C<sub>P</sub>: costo unitario annuo per potenza impegnata (36 €/(kW\*anno));
- E: energia assorbita all'anno (561886 kWh/anno);
- C<sub>E</sub>: costo unitario dell'energia (0,14 €/kWh);
- h: numero di ore di funzionamento all'anno (4191 h/anno)

Energia annua assorbita	561886	kWh/anno
Ore annue di funzionamento	4191	h/anno
Spesa fissa energia annua	4826	€/anno
Spesa variabile energia annua	78664	€/anno
Spesa totale energia annua	83490	€/anno
Consumo equivalente	105	TEP/anno
Emissioni	332	tCO <sub>2</sub> /anno
Costo unitario per l'energia	0,140	€/kWh
Costo annuo per unità di potenza impegnata	36	€/(kW*anno)

Tabella 4.3: tabella riassuntiva su energia assorbita e spesa energetica

Le sorgenti luminose sono distribuite su 17 quadri elettrici, con una potenza per singolo quadro molto variabile, come si può notare nella tabella 4.4.

Quadro	HG	SAP	FLO	LED	ALTRO	Pot installata [W]	Pot installata [kW]	Pot totale [kW]
1	72125	320				72445	72,4	89,7
2	1250	3300				4550	4,6	5,7
3		6150	180			6330	6,3	7,8
4		7900	180		4320	12400	12,4	15,3
5		2400				2400	2,4	3,1
6			54			54	0,1	0,1
7		400				400	0,4	0,5
8		450				450	0,5	0,6
9				240		240	0,2	0,3
10				390		390	0,4	0,5
11				600		600	0,6	0,7
12				660		660	0,7	0,8
13		2400		770		3170	3,2	4,0
14		600				600	0,6	0,8
15	1820			140		1960	2,0	2,4
16	1500					1500	1,5	1,8
17		400				400	0,4	0,5
tot	76695	24320	414	2800	4320	108549	108,5	134,6

*n.b. i valori delle potenze per tipologia di lampada sono espressi in Watt*

*Tabella 4.4: i 17 quadri elettrici*

I costi relativi alla manutenzione sono stati calcolati considerando per ognuna delle tre tipologie di lampada più diffuse nel territorio (mercurio, sodio alta pressione e fluorescenti) il costo unitario per sostituzione, dato dalla somma del costo della lampada e costo per la manodopera, e il numero di sostituzioni annue, dipendente dal numero totale di lampade e dalla durata di vita media di quest'ultime.

$$C_M = \sum_{i=1}^k C_{Mi} = \sum_{i=1}^K N_{Si} * C_{Si} = \sum_{i=1}^K n_{Si} * N_{Li} * C_{Si} = \sum_{i=1}^K \frac{h_{eq}}{d_i} * N_{Li} * (C_{Li} + C_{MDi})$$

dove:

- $C_M$ : spesa annua per la manutenzione (25225 €/anno);
- $C_{Mi}$ : spesa annua per la manutenzione delle lampade di tipo i-esimo;
- $k$ : numero di tipi di lampade considerate (3);
- $h_{eq}$ : numero di ore equivalenti di funzionamento;
- $N_{Si}$ : numero di sostituzioni annue di lampade di tipo i-esimo;
- $C_{Si}$ : costo unitario complessivo di sostituzione di una lampada di tipo i-esimo
- $n_{Si}$ : numero volte che ogni lampada di tipo i-esimo viene sostituita in un anno;
- $N_{Li}$ : numero di lampade di tipo i-esimo;
- $d_i$ : durata di vita media per le lampade di tipo i-esimo;
- $C_{Li}$ : costo di acquisto di una lampada di tipo i-esimo;
- $C_{MDi}$ : costo per la manodopera per sostituire una lampada di tipo i-esimo (61 €/pl).

La situazione attuale per quanto riguarda tutti gli aspetti della manutenzione è riassunta nella tabella 4.5.

i	d <sub>i</sub> [h]	C <sub>Li</sub> [€/pl]	C <sub>Si</sub> [€/pl]	N <sub>Li</sub> [pl]	durata [anni] (=1/n <sub>Si</sub> )	N <sub>Si</sub> [pl/anno]	C <sub>Mi</sub> [€/anno]
HG	9000	12	73	615	2 anni 2 mesi	286	20908
SAP	17000	50	111	141	4 anni 1 mese	35	3859
FLO	10000	12	73	15	2 anni 5 mesi	6	459
Numero di sostituzioni e spesa manutenzione annue						327	25225

Tabella 4.5: tabella riassuntiva sulla manutenzione

Come si evince dalla tabella 4.5 più dell'80 % della spesa per la manutenzione deriva dalla sostituzione delle lampade al mercurio. Questo perché tali lampade hanno una durata di vita media (9000 ore) pari a circa la metà di quelle SAP (17000 ore) e perché rappresentano il 70 % dei punti luce totali.

La spesa complessiva sostenuta dal Comune per l'illuminazione pubblica è evidentemente data dalla somma della spesa totale per l'energia e di quella per la manutenzione; tale cifra risulta essere pari a 108715 €/anno. Come si può notare è un valore che incide molto nel bilancio di un Comune di circa 8000 abitanti. Nel grafico 4.4 è riportata l'incidenza di ogni voce sulla spesa totale.

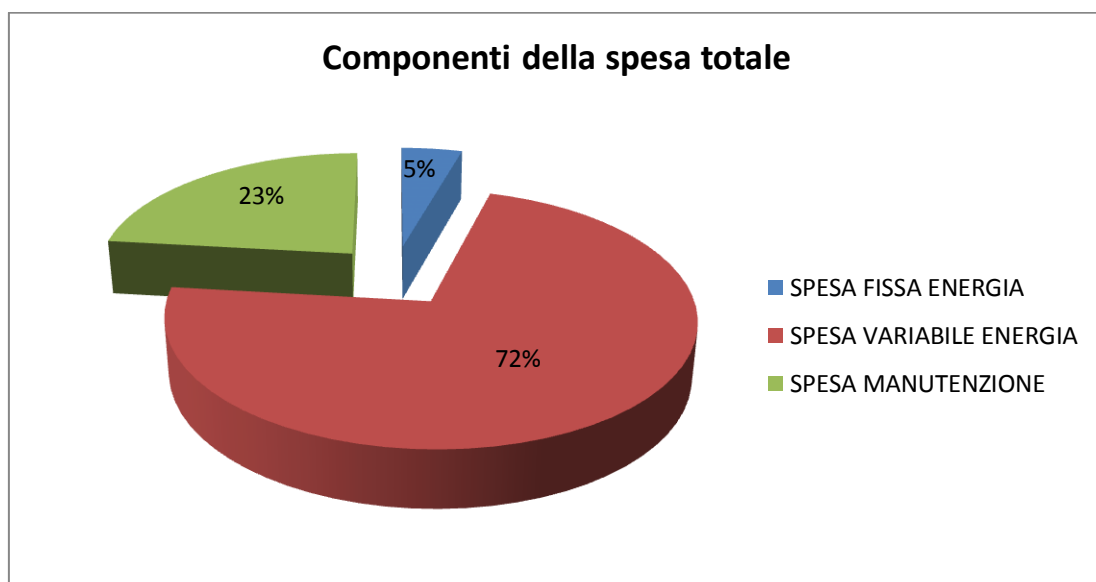


Grafico 4.4: componenti della spesa totale

Come detto sono state scelte, analizzate e confrontate tra loro quattro soluzioni differenti che sono state scelte queste per ragioni di diversa natura, che verranno spiegate nei paragrafi successivi dove verranno illustrate nel dettaglio.

## 4.2. Analisi tecnico-economica su un caso reale delle strategie di intervento

Nella figura sotto sono riportate con i nomi con cui saranno chiamate nel resto del presente elaborato.

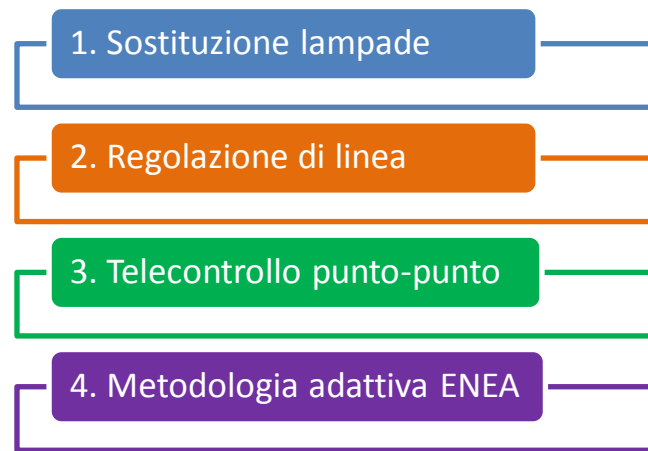


Fig. 4.2: le quattro strategie di intervento

Per l'analisi di tipo economico sono stati scelti due indici molto significativi e conosciuti: il valore attuale netto e il tempo di ritorno attualizzato.

Più precisamente, il valore attuale netto è una metodologia tramite cui si definisce il valore attuale (VAN o NPV=Net Present Value) di una serie attesa di flussi di cassa, non solo sommandoli contabilmente ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento (costo opportunità dei mezzi propri).

Il VAN, nell'ipotesi di flussi di cassa costanti, è dato dall'espressione seguente:

$$VAN = -I_0 + FC \sum_{k=1}^n \frac{1}{(1+i)^k} = -I_0 + FC * FA$$

con

$$i = r - f - f'$$

dove:

- $I_0$ : costo dell'investimento iniziale;
- FC: flusso di cassa (costante per gli n anni);
- k: anno k-esimo;
- n: durata dell'iniziativa economica;
- i: interesse di calcolo o interesse reale;
- FA: fattore di annualità.
- r: costo medio ponderato del capitale;
- f: inflazione;
- f': deriva dell'inflazione per il settore in considerazione rispetto all'andamento nazionale;

Attraverso il calcolo del VAN, oltre che stabilire la convenienza attesa di un singolo investimento, è anche possibile confrontare la convenienza tra due o più investimenti in concorrenza tra loro. Data la definizione, è chiaro che il più conveniente tra n investimenti concorrenti sarà quello con il VAN maggiore. Bisogna notare però che un raffronto diretto tra VAN per investimenti è possibile solo se il periodo (il

max  $k = n$  della formula precedente) di attualizzazione è lo stesso per tutti gli investimenti considerati. È altresì evidente che un raffronto diretto può essere operato solo se il capitale investito inizialmente è uguale in tutte le  $n$  alternative d'investimento.

Il valore del costo opportunità dipende dalla disponibilità e meno del capitale necessario per sostenere l'investimento iniziale. Nel primo caso è il più basso tra i tassi di interesse a cui sono stati investiti i propri soldi; nella seconda ipotesi è il più basso tasso di interesse a cui si potrebbe ottenere tale cifra ( $I_0$ ).

Dopo un'attenta analisi, per questo studio è stato scelto un valore del costo del capitale del 7 %, dell'inflazione del 2 % (fonte ISTAT) e della deriva rispetto all'inflazione del settore dell'energia dell'1 %; di conseguenza un interesse di calcolo del 4 % (si veda la figura 4.4).

Considerando la vita fisica, tecnologica, commerciale e del contesto produttivo, è stata scelta una durata dell'iniziativa economica ( $n$ ) pari a 15 anni.

Il secondo indice economico utilizzato è, come detto, il tempo di ritorno attualizzato.

Esso rappresenta il numero di anni necessario per compensare l'investimento iniziale attraverso flussi positivi. In pratica è la prima scadenza in cui si verifica un'inversione di segno nei saldi di cassa; è quindi il valore di  $n$  che rende nullo il VAN.

È possibile ricavare il TRA dall'andamento del grafico del VAN in funzione del tempo; il TRA sarà il valore temporale dove tale curva intersecherà l'asse del tempo, come mostrato in figura 4.3.

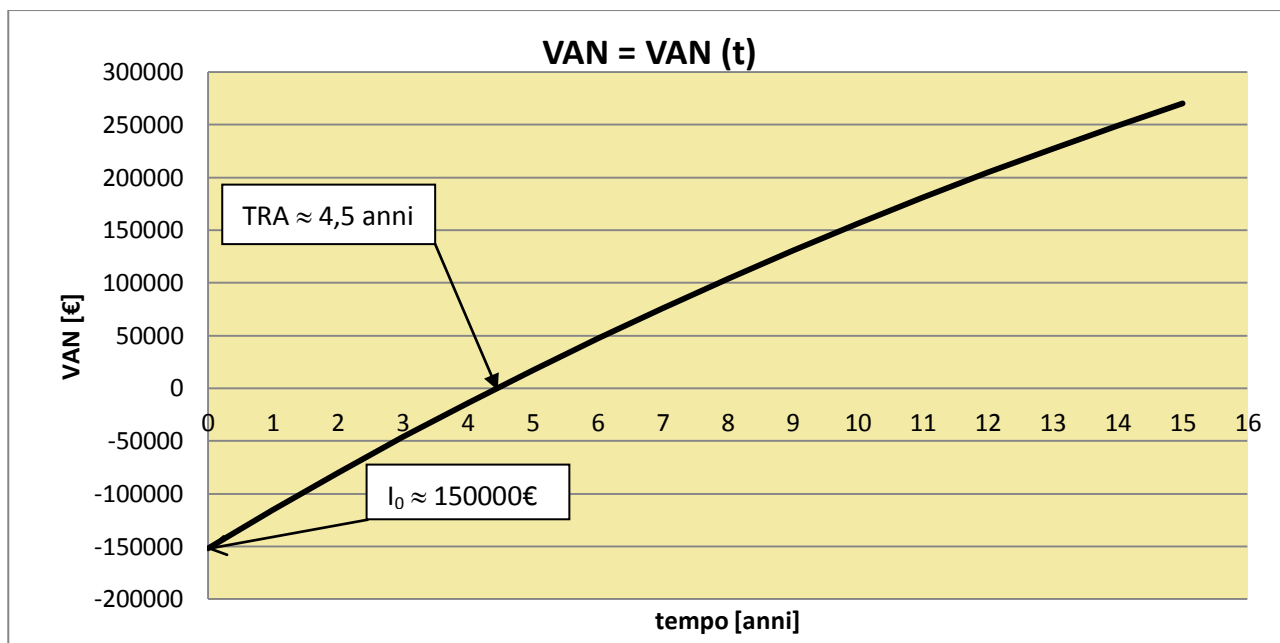


Fig. 4.3: rappresentazione grafica del TRA

I limiti di questo indice si manifestano in presenza di flussi di cassa non costanti e che cambiano da positivi a negativi nel corso degli anni. Questo comporterebbe che il grafico del VAN potrebbe intersecare più volte l'asse delle ascisse con la diretta conseguenza di non poter più individuare un univoco valore del TRA. Fortunatamente in tutte le quattro soluzioni analizzate è possibile ritenere costanti i flussi di cassa ed utilizzare quindi il TRA come strumento di confronto.

Per trovare il TRA in modo analitico, ipotizzando i flussi di cassa costanti, basta esplicitare  $n$  dall'equazione del VAN posta uguale a zero, utilizzando le proprietà delle sommatorie.

$$TRA = \log_{(1+i)} \frac{FC}{FC - I_0 * i}$$

Nelle figure 4.4 e 4.5 sono schematizzati i parametri  $i$  e FA utilizzati per il calcolo del VAN e del TRA delle quattro soluzioni proposte.

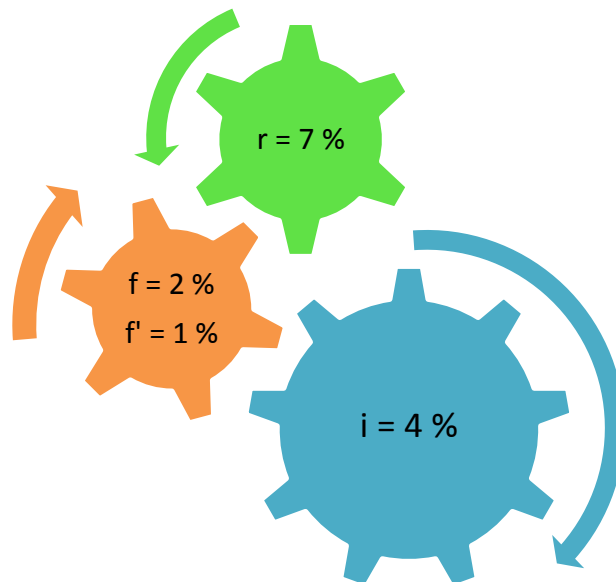


Fig. 4.4: valore dell'interesse di calcolo,  $i = i(r, f, f')$

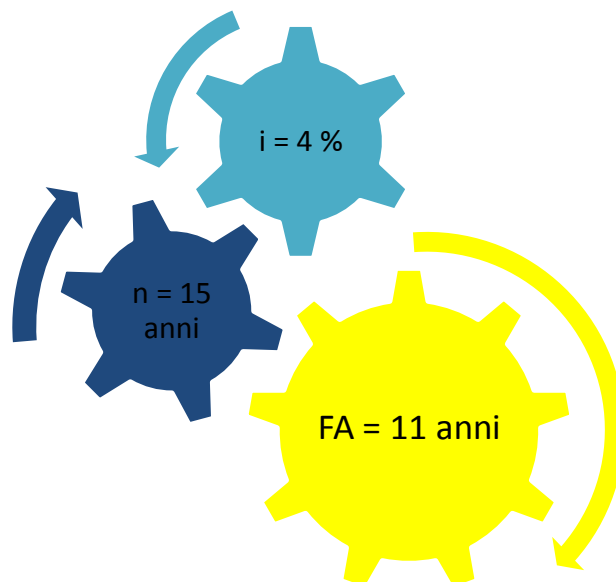


Fig. 4.5: valore del fattore di annualità,  $FA = FA(i, n)$



#### 4.2.1. Soluzione convenzionale - Sostituzione delle lampade HG con SAP

Il primo degli interventi proposti prevede la semplice sostituzione delle lampade al mercurio con le più efficienti al sodio ad alta pressione; tale scelta trova fondamento nel fatto che questo è l'intervento che fino ad oggi è stato quello più diffuso; proprio per questo è stato definito convenzionale.

Pertanto i 615 punti luce al mercurio distribuiti nei quadri 1, 2, 15 e 16 per un totale di 76,7 kW (93,1 kW considerando le perdite) vengono così sostituiti: le 611 lampade HG da 125 W vengono sostituite con altrettante lampade SAP da 100 W e le 4 lampade HG da 80 W sempre con lampade SAP ma da 70 W. In questo modo la potenza totale diminuisce di 14,9 kW, passando da 134,6 a 119,7 kW; con un conseguente risparmio annuo di energia elettrica assorbita di 63 MWh. Ciò comporta vantaggi per la spesa totale per l'energia, sia per la componente variabile sia per quella fissa, con un risparmio in termini economici maggiori di 9000 euro l'anno. Anche a livello ambientale diminuiscono i TEP consumati e la CO<sub>2</sub> emessa nell'atmosfera.

I benefici di questo intervento si manifestano anche nella gestione dell'impianto, con una diminuzione della spesa per la manutenzione di più di 4000 euro annui; grazie alla maggior durata di vita delle lampade SAP che compensa il loro maggior costo di acquisto.

Complessivamente il risparmio annuo ammonta a quasi 13400 euro.

Nella tabella seguente sono sintetizzate tutte le variazioni rispetto allo stato attuale.

Energia annua assorbita	499	MWh/anno
Ore di funzionamento annuo	4191	h/anno
Spesa fissa energia annua	4289	€/anno
Spesa variabile energia annua	69909	€/anno
Spesa totale energia annua	74198	€/anno
Consumo equivalente	93	TEP/anno
Emissioni	295	tCO <sub>2</sub> /anno
Sostituzioni totali	193	sostituzioni/anno
Spesa annua manutenzione	21148	€/anno
Spesa annua totale	95346	€/anno
<b>Risparmi</b>		
Energia annua assorbita	-63	MWh/anno
	-11	%
Spesa fissa energia annua	-537	€/anno
Spesa variabile energia annua	-8755	€/anno
Spesa totale energia annua	-9292	€/anno
Spesa manutenzione	-4077	€/anno
Spesa totale	-13369	€/anno
	-12	%

Tabella 4.6: variazione della situazione tra la soluzione 1 e lo stato attuale

Il costo complessivo per realizzare tale intervento è stato calcolato considerando un costo di sostituzione di circa 200 euro per ogni punto luce, arrivando così a circa 121000 euro.

In questa cifra, oltre al costo di acquisto delle lampade, sono compresi anche i costi dell'armatura in cui ha sede la lampada, sia perché obsoleti sia per le diverse caratteristiche geometriche richieste dalle lampade SAP, e i costi di installazione.

	Prezzo unitario [€]	Numero sostituzioni	Costo voce [€]
SOSTITUZIONE ARMATURE HG con SAP	197,06	615	121191,90
			121191,90

Tabella 4.7: costo di investimento della soluzione 1

Grazie a tutte queste informazioni è possibile calcolare il valore attuale netto e il tempo di ritorno di questa soluzione.

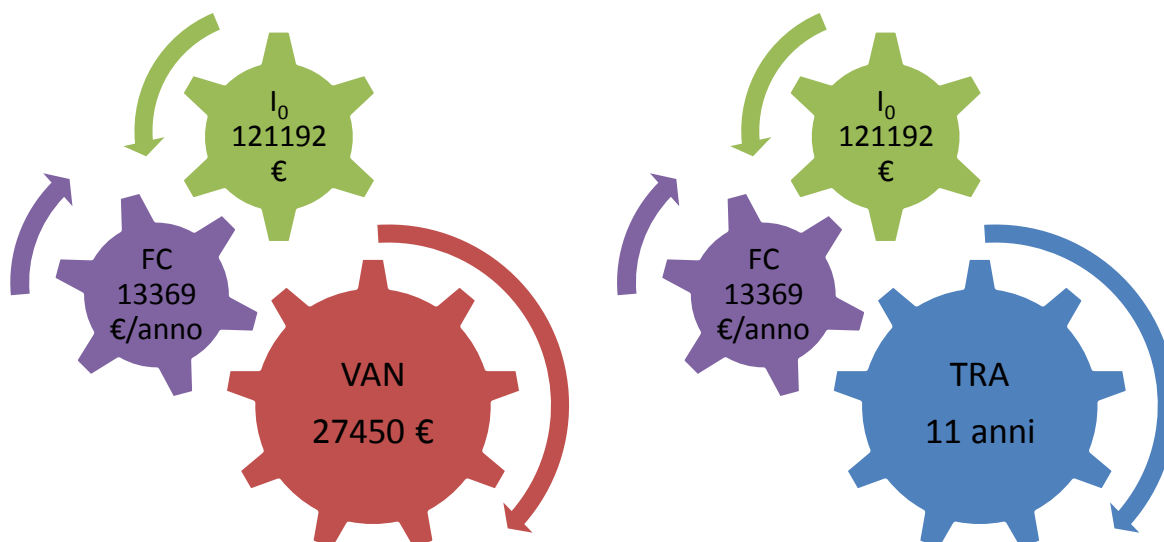


Fig. 4.6: VAN e TRA della prima soluzione (convenzionale)

#### 4.2.2. Soluzione proposta - Regolazione di linea del flusso luminosa

La seconda soluzione proposta è stata scelta poiché è quella commercialmente più diffusa ed è quella che viene maggiormente proposta ai Comuni dalle società, come le E.S.Co., che operano nel settore dell'illuminazione pubblica; per queste ragioni è stata definita "proposta".

Prevede, oltre alla sostituzione delle lampade al mercurio, l'installazione di un orologio astronomico su ogni quadro elettrico e di un regolatore del flusso luminoso solo sui quadri che gestiscono una potenza rilevante. L'orologio astronomico serve a razionalizzare le accensioni e gli spegnimenti dell'impianto mentre il regolatore di flusso permette di parzializzare la potenza assorbita istante per istante nelle ore centrali della notte e di stabilizzare la tensione di alimentazione durante tutto l'arco temporale di accensione (si veda il capitolo 5). La regolazione di linea comporterà quindi vantaggi economici sia dal punto di vista energetico che della manutenzione.

Il sistema di accensione-spegnimento permette di abbassare il numero di ore annue di funzionamento a 4000.

Per l'installazione dei regolatori di flusso sono stati scelti i due quadri elettrici che gestiscono le potenze maggiori, ossia il numero 1 e il numero 4; i due regolatori controllano rispettivamente 590 punti luce e 75,6 kW e 94 punti luce e 15,3 kW. È così regolata una potenza di 90,9 kW pari al 76 % della totale.

Lo studio è stato eseguito scegliendo 1200 ore di sola stabilizzazione e 2800 ore di stabilizzazione e regolazione; il primo regime permette un risparmio energetico del 10 % e un allungamento della vita delle lampade del 20 %, il secondo regime del 30 % per entrambi i parametri.

In questo modo nelle ore di sola stabilizzazione e nelle ore in cui avviene anche la regolazione la potenza è rispettivamente di 110 kW e 91,9 kW; per un'energia elettrica annua assorbita di 389 MWh.

Da non sottovalutare è la riduzione del 30 % di gas serra emessi e dei conseguenti TEP risparmiati.

Per quanto riguarda la manutenzione ci sono, in questo caso, benefici maggiori derivanti dalla riduzione delle ore assolute di funzionamento per le lampade dei quadri non regolati, 4000 /anno invece di 4191, che si riducono ulteriormente considerando le ore equivalenti di funzionamento per le lampade collegate ai quadri 1 e 4, 2920 h<sub>eq</sub>/anno.

Come si può notare nella tabella 4.8, la spesa annua totale passa così da 108715 a 74523 euro, con un risparmio di più di 34000 euro pari al 32 % del totale.

Energia annua assorbita	389	MWh/anno
Ore di funzionamento annuo	4000	h/anno
Ore equivalenti	2920	h <sub>eq</sub> /anno
Spesa fissa energia annua	4289	€/anno
Spesa variabile energia annua	54499	€/anno
Spesa totale energia annua	58788	€/anno
Consumo equivalente	73	TEP/anno
Emissioni	230	tCO <sub>2</sub> /anno
Sostituzioni totali	144	sostituzioni/anno
Spesa annua manutenzione	15735	€/anno
Spesa annua totale	74523	€/anno
Risparmi		
Energia annua assorbita	-173	MWh/anno
	-31	%
Spesa fissa energia annua	-537	€/anno
Spesa variabile energia annua	-24165	€/anno
Spesa totale energia annua	-24702	€/anno
Spesa manutenzione	-9490	€/anno
Spesa totale	-34192	€/anno
	-32	%

*n.b. le ore equivalenti di funzionamento si riferiscono solo alle lampade regolate (quadri 1 e 4)*

*Tabella 4.8: variazione della situazione tra la soluzione 2 e lo stato attuale*

Come visto questa opzione richiede l'installazione di 17 orologi astronomici, che hanno un costo unitario di 115 euro, di un regolatore per un quadro con potenza di circa 15 kW, che costa 9623 euro, e di un regolatore per un quadro con potenza di circa 75 kW, che ha un prezzo di 15000 euro; oltre ovviamente alla sostituzione delle lampade al mercurio. Il costo di investimento totale risulta pertanto di 148365 euro.

	Prezzo unitario [€]	Numero sostituzioni	Costo voce [€]
Sostituzione armature HG con SAP	197,06	615	121191,90
Orologio astronomico	150,00	17	2550,00
Regolatore quadro 15 kW	9623,57,00	1	9623,57
Regolatore quadro 75 kW	15000,00	1	15000,00
			148365,47

*Tabella 4.9: costo di investimento della soluzione 2*

Come si può vedere dalle figure 4.7 il valore attuale netto e il tempo di ritorno di questa seconda soluzione sono molto interessanti.

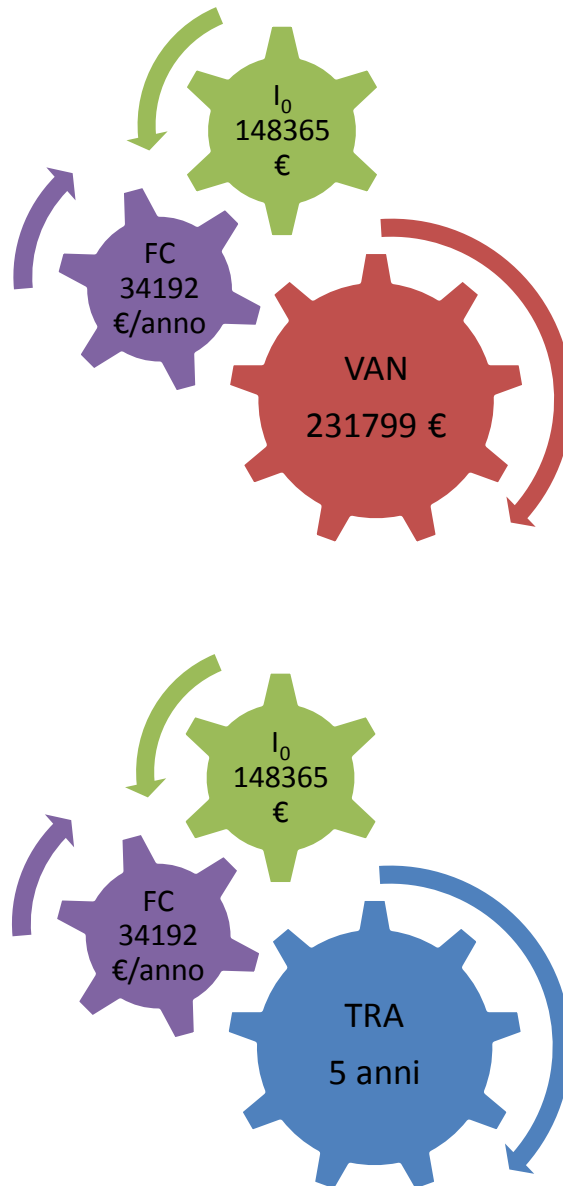


Fig. 4.7: VAN e TRA della seconda soluzione (proposta)

#### 4.2.3. Soluzione avanzata - Telegestione punto-punto del flusso luminoso

Ulteriore evoluzione della regolazione del flusso luminoso è la possibilità di telegestire da remoto ogni singolo punto luce. La motivazione della scelta di questa tecnologia risiede nelle interessanti conseguenze che un tale tipo di controllo ha sul risparmio energetico, sulla gestione dell'impianto e sulla qualità del servizio offerto. Inoltre tale soluzione è la prima, tra quelle analizzate, che sfrutta tecnologie abilitanti per gli smart service. Attualmente è la soluzione più avanzate già disponibili sul mercato.

Al contrario di quanto si potrebbe pensare però non è economicamente conveniente dotare di un regolatore tutti i punti luce dell'impianto perché la telegestione punto-punto richiede anche l'installazione di un dispositivo su ogni quadro elettrico. Ecco quindi che, come nel caso della regolazione di linea, verranno installati i regolatori solo sui punti luce che sono collegati ai due quadri con potenza maggiori.

Saranno dunque dotati di tale strumentazione i 684 punti luce, il 79 % del totale, dei quadri 1 e 4, per una relativa potenza di 90,9 kW, dopo aver sostituito tutte le lampade al mercurio.

Anche in questo caso avremo 1200 ore in regime di stabilizzazione e 2800 in quello di regolazione, solo che in quest'ultimo il risparmio energetico sarà del 40 % e l'allungamento della vita delle lampade del 35 %.

Il maggior risparmio energetico deriva dal fatto che potendo regolare ogni punto luce in modo indipendente dagli altri sarà possibile ridurre maggiormente la potenza di quelli che si trovano in zone che richiedono un illuminamento minore; si ricorda che al contrario nella regolazione di linea tutti i punti luce collegati ad un quadro elettrico vengono regolati sul medesimo valore di tensione di alimentazione imposta dalla sorgente che deve garantire il fascio luminoso più potente.

Durante la stabilizzazione del flusso la potenza istantanea sarà di 110 kW mentre durante la regolazione di 82,8 kW; moltiplicando tali valori per le rispettive ore di funzionamento si ottiene un assorbimento energetico annuo di 364 MWh, riducendo di 117 tonnellate le emissioni di CO<sub>2</sub>.

Oltre ad una maggiore efficienza energetica, questa soluzione permette maggiori risparmi sulla manutenzione; infatti diminuisce ulteriormente il numero di sostituzioni annue grazie al minor numero di ore equivalenti (2780 h<sub>eq</sub>/anno) delle 684 lampade regolate e stabilizzate, inoltre la telegestione garantisce una migliore gestione riducendo i costi per la ricerca dei guasti. In questo modo il costo di sostituzione di una singola lampada (C<sub>Si</sub>) si riduce da 61 a 46 euro.

Grazie alla regolazione di linea del flusso luminoso la spesa annua che il Comune dovrebbe sostenere scende a poco meno di 69000 euro, di cui circa 55000 per la componente energetica e 14000 per la manutenzione dell'impianto.

Energia annua assorbita	364	MWh/anno
Ore di funzionamento annuo	4000	h/anno
Ore equivalenti	2780	h <sub>eq</sub> /anno
Spesa fissa energia annua	4289	€/anno
Spesa variabile energia annua	50935	€/anno
Spesa totale energia annua	55224	€/anno
Consumo equivalente	68	TEP/anno
Emissioni	215	tCO <sub>2</sub> /anno
Sostituzioni totali	138	sostituzioni/anno
Spesa annua manutenzione	13603	€/anno
Spesa annua totale	68827	€/anno
Risparmi		
Energia annua assorbita	-198	MWh/anno
	-35	%
Spesa fissa energia annua	-537	€/anno
Spesa variabile energia annua	-27729	€/anno
Spesa totale energia annua	-28266	€/anno
Spesa manutenzione	-11622	€/anno
Spesa totale	-39899	€/anno
	-37	%

*n.b. le ore equivalenti di funzionamento si riferiscono solo alle lampade regolate (quadri 1 e 4)*

*Tabella 4.10: variazione della situazione tra la soluzione 3 e lo stato attuale*

I costi totali per questa soluzione sono pari a 230942 euro, dovuti alla sostituzione delle lampade al mercurio, all'installazione degli orologi astronomici, all'installazione dei regolatori sui singoli punti luce, sui quadri elettrici e alla strumentazione e al software per la telegestione.

	Prezzo unitario [€]	Numero sostituzioni	Costo voce [€]
Sostituzione armature HG con SAP	197,06	615	121191,90
Orologio astronomico	150,00	17	2550,00
Regolatore punto luce	150,00	684	102600,00
Regolatore quadro	300,00	2	600,00
Software telegestione	4000,00	1	4000,00
			230941,90

*Tabella 4.11: costo di investimento della soluzione 3*

La telegestione punto-punto nonostante una maggiore efficienza energetica rispetto alla soluzione proposta vede aumentare di molto il costo di investimento, con relativo abbassamento del VAN e innalzamento del TRA.

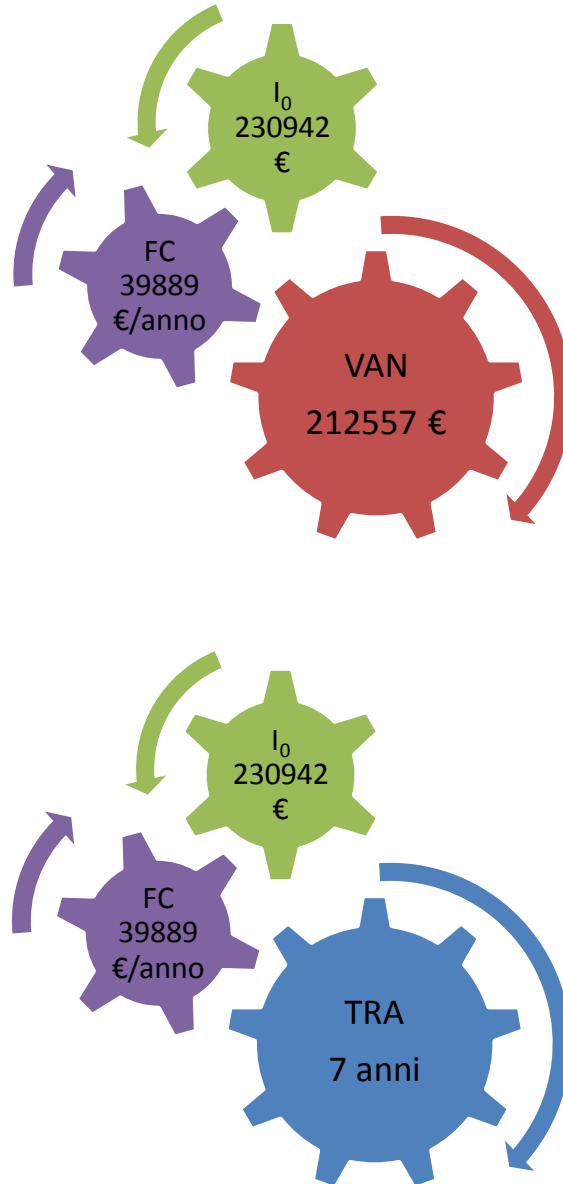


Fig. 4.8: VAN e TRA della terza soluzione (avanzata)



#### 4.2.4. Soluzione innovativa - Illuminazione di tipo adattiva

L'ultima tra le soluzioni proposte è decisamente innovativa ed infatti si basa su tecnologie ICT che l'ENEA sta tuttora sviluppando e che quindi non sono totalmente disponibili sul mercato. Questa soluzione costituisce già di per sé uno smart service ed in più ne permette l'implementazione di ulteriori altrettanto interessanti in ottica smart city.

Infatti si prevede la creazione di un'illuminazione di tipo adattivo (si veda il capitolo 6) che permetta ad ogni punto luce di seguire nel tempo l'andamento della richiesta effettiva di illuminamento.

In questo modo si ottengono notevoli vantaggi sia sul fronte del risparmio energetico che sui costi di manutenzione; inoltre consente una gestione più efficiente, un'altissima qualità del servizio e una sicurezza impensabili con i sistemi visti finora, perfino con quelli più avanzati.

Il fulcro di questa soluzione è come visto nel capitolo 6 il palo intelligente, cioè un palo dotato di una strumentazione e di una sensoristica che, sfruttando la tecnologia PLC, gli permette di fare una previsione della domanda a breve termine e di regolare il flusso luminoso di conseguenza.

Lo sviluppo di queste tecnologie ICT è ad un punto tale da permettere di calcolare con ottima approssimazione i costi da sostenere e i conseguenti vantaggi energetici, ambientali economici e sociali.

Anche in questa ultima opzione verranno dotati del sistema di telegestione adattiva punto-punto tutti i punti luce dei quadri elettrici 1 e 4.

L'illuminazione di tipo adattivo permette, per queste sorgenti luminose, un numero maggiore di ore annue in regime di regolazione, 3000 invece di 2800, durante le quali il risparmio energetico raggiunge il 50 %, grazie ad una potenza istantanea ridotta a soli 74 kW, e la vita delle lampade aumenta del 40 %.

La gestione smart dell'illuminazione garantisce, rispetto allo stato attuale, una riduzione del 41 % dell'energia elettrica annualmente assorbita dalla rete, pari ora a 331 MWh, delle tonnellate equivalenti di petrolio consumate, 62 TEP, e del diossido di carbonio prodotto che ammonta a 196 tCO<sub>2</sub>.

Come spiegato, tra i vantaggi dell'adattività del sistema di illuminazione c'è una manutenzione ottimizzata e meno frequente; infatti il numero di sostituzioni all'anno scende a 132 per un costo complessivo che è pari a circa la metà di quello attuale.

La spesa complessiva annua, ora pari a 63604 euro, invece si riduce del 41 %.

Energia annua assorbita	331	MWh/anno
Ore di funzionamento annuo	4000	h/anno
Ore equivalenti	2600	h <sub>eq</sub> /anno
Spesa fissa energia annua	4289	€/anno
Spesa variabile energia annua	46352	€/anno
Spesa totale energia annua	50641	€/anno
Consumo equivalente	62	TEP/anno
Emissioni	196	tCO <sub>2</sub> /anno
Sostituzioni totali	132	sostituzioni/anno
Spesa annua manutenzione	12963	€/anno
Spesa annua totale	63604	€/anno
Risparmi		
Energia annua assorbita	-231	MWh/anno
	-41	%
Spesa fissa energia annua	-537	€/anno
Spesa variabile energia annua	-32312	€/anno
Spesa totale energia annua	-32849	€/anno
Spesa manutenzione	-12263	€/anno
Spesa totale	-45112	€/anno
	-41	%

*n.b. le ore equivalenti di funzionamento si riferiscono solo alle lampade regolate (quadri 1 e 4)*

*Tabella 4.12: variazione della situazione tra la soluzione 4 e lo stato attuale*

Per sostituire le lampade al mercurio, installare gli orologi astronomici, i regolatori sui punti luce, quelli sui quadri elettrici, le telecamere da esterno e acquistare il sistema per la telegestione sono necessari poco più di 300000 euro.

	Prezzo unitario [€]	Numero sostituzioni	Costo voce [€]
Sostituzione armature HG con SAP	197,06	615	121191,90
Orologio astronomico	150,00	17	2550,00
Regolatore punto luce	250,00	684	171000,00
Regolatore quadro	2500,00	2	5000,00
Software telegestione	4000,00	1	4000,00
Telecamera da esterno	500,00	8	4000,00
			307741,90

*Tabella 4.13: costo di investimento della soluzione 4*

#### 4.2.4.1. Soluzione smart - Smart Lighting

In realtà il grande vantaggio di questa soluzione consiste nella possibilità di implementare praticamente in modo gratuito altri servizi smart di notevole interesse e che se acquistati singolarmente avrebbero un costo non trascurabile.

Si tratta del sistema di monitoraggio del traffico e di quello per la sicurezza.

Attualmente uno dei metodi più utilizzati per monitorare il flusso veicolare è basato sulle spire induttive gestite da un sistema di trasmissione dei dati e da un server. Le spire hanno un costo unitario di 1250 euro mentre il sistema di gestione di 10000 euro.

Durante lo sviluppo dell'illuminazione adattiva, si è visto che per fare ciò che fanno due spire induttive basta una telecamera. Pertanto per monitorare le strade controllate dai quadri elettrici numero 1 e 4 servirebbero 16 spire, con un costo complessivo, considerando la strumentazione di trasmissione e gestione, di 30000 euro.

Per garantire un'efficiente servizio di sicurezza bisognerebbe installare 8 telecamere da esterno da 500 euro cadauna e un software per la registrazione e gestione delle immagini dal costo di 1000 euro; tale servizio avrebbe quindi un costo di 5000 euro.

L'installazione delle telecamere necessarie per permettere la previsione a breve della richiesta di illuminazione fornisce questi due servizi aggiuntivi grazie alle tecnologie ICT sviluppate per l'illuminazione adattiva senza la necessità di ulteriori installazioni, che come visto richiederebbero 35000 euro di investimento.

Si può così ottenere l'effettivo costo di investimento per la soluzione 4, andando a decurtare da quello ipotizzato prima (307741,90 €) tale cifra (35000 €), pari quindi a 272741,90 euro.

	Prezzo unitario [€]	Numero sostituzioni	Costo voce [€]
Sostituzione armature HG con SAP	197,06	615	121191,90
Orologio astronomico	150,00	17	2550,00
Regolatore punto luce	250,00	684	171000,00
Regolatore quadro	2500,00	2	5000,00
Software telegestione	4000,00	1	4000,00
Telecamera da esterno	500,00	8	4000,00
			307741,90
Spire induttive	16	1250,00	-20000,00
Sistema di trasmissione e server	1	10000,00	-10000,00
Telecamere di sicurezza	8	500,00	-4000,00
Sistema di gestione sicurezza	1	1000,00	-1000,00
			272741,90

Tabella 4.14: costo di investimento della soluzione 4 considerando i servizi smart implementati

Come era prevedibile per l'ultima soluzione i due indici economici sono lievemente peggiori che negli altri casi. Questo poiché essendo una tecnologia tuttora in via di sviluppo includerà inizialmente tutti i costi della ricerca che è stato necessario svolgere.

In realtà tutto questo può avere aspetti positivi perché si può verosimilmente ipotizzare che, con la diffusione e il consolidamento di questa tecnologia, i costi ad essa connessi potranno diminuire.

Inoltre già ad oggi questa opzione diventa più appetibile considerando i due servizi aggiuntivi, descritti in precedenza, implementati in quello di illuminazione.

A questo punto questa può essere considerata quasi come una quinta soluzione che può essere definita "soluzione innovativa smart" o più semplicemente smart lighting.

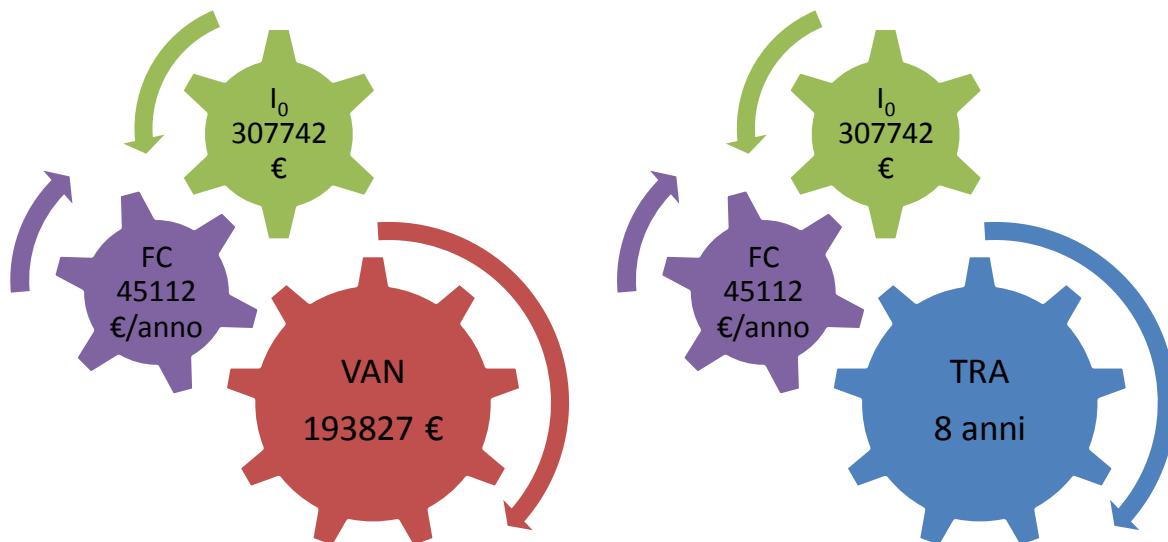


Fig. 4.9: VAN e TRA della quarta soluzione (innovativa)

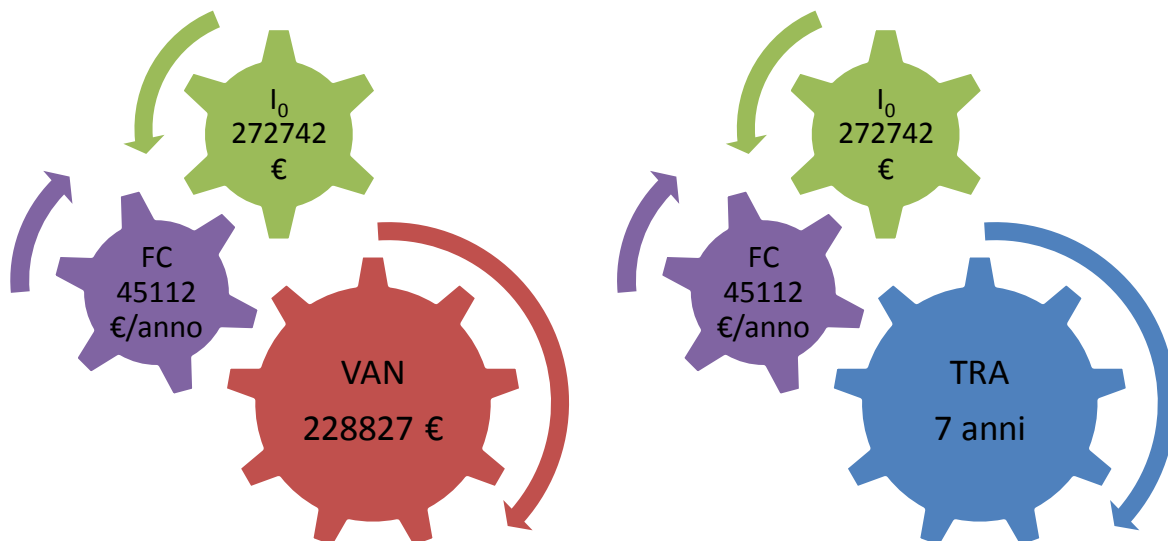


Fig. 4.10: VAN e TRA della quinta soluzione (smart lighting)

### 4.3. Confronto delle varie soluzioni

La tabella che segue riassume nel dettaglio come variano, rispetto allo stato attuale, potenza, energia assorbita, spese sostenute, risparmi e parametri economici per le quattro soluzioni presentate nel capitolo precedente.

Si ricorda che la soluzione innovativa e quella smart sono, a livello pratico, identiche; la differenza tra le due risiede nel fatto che in quella smart i costi di investimento sono stati ridotti considerando i due servizi smart aggiuntivi che sono erogati oltre all'illuminazione di tipo adattivo. Per questo motivo gli unici parametri che avranno diversi sono, appunto, il costo di investimento iniziale e di conseguenza il tempo di ritorno e il valore attuale netto. Di conseguenza nell'analisi comparata di questo capitolo non si farà riferimento alla soluzione smart per tutti quei valori che sono uguali a quelli della soluzione innovativa.

	START	CONVENZIONALE	PROPOSTA	
Potenza totale	134,6	119,7	119,7	kW
Energia annua assorbita	562	499	389	MWh/anno
Ore annue di funzionamento	4.191	4.191	4.000	h/anno
Ore equivalenti	4.191	4.191	2.920	h <sub>eq</sub> /anno
Spesa fissa energia	4.826	4.289	4.289	€/anno
Spesa variabile energia	78.664	69.909	54.499	€/anno
Spesa totale energia	83.490	74.198	58.788	€/anno
Consumo equivalente	105	93	73	TEP/anno
Emissioni	332	295	230	tCO <sub>2</sub> /anno
Sostituzioni totali	327	193	144	sostituzioni/anno
Spesa manutenzione	25.225	21.148	15.735	€/anno
Spesa annua totale	108.715	95.346	74.523	€/anno
Risparmi				
Risparmio energia	-	63	173	MWh/anno
	-	11	31	%
Risparmio spesa fissa energia	-	537	537	€/anno
Risparmio spesa variabile energia	-	8.755	24.165	€/anno
Risparmio spesa totale energia	-	9.292	24.702	€/anno
Risparmio spesa manutenzione	-	4.077	9.490	€/anno
Risparmio spesa totale	-	13.369	34.192	€/anno
	-	12	32	%
Risparmio emissioni CO <sub>2</sub>	-	37	102	tCO <sub>2</sub> /anno
Analisi economica				
Spesa energia per punto luce	96,19	85,48	67,73	€/en/(pl*anno)
Spesa manutenzione per punto luce	29,06	24,36	18,13	€/man/(pl*anno)
Spesa annua per punto luce	125,25	109,85	85,86	€/pl*anno)
Spesa annua per abitante	13,18	11,56	9,03	€/ab*anno)
Costo di investimento	-	121.192	148.365	€
Flussi di cassa	-	13.369	34.192	€/anno
VAN	-	27.450	231.799	€
TRA	-	11	5	anni
Livello di comfort	3	3	1	

segue

	AVANZATA	INNOVATIVA	SMART	
Potenza totale	119,7	119,7	119,7	kW
Energia annua assorbita	364	331	331	MWh/anno
Ore annue di funzionamento	4.000	4.000	4.000	h/anno
Ore equivalenti	2.780	2.600	2.600	heq/anno
Spesa fissa energia	4.289	4.289	4.289	€/anno
Spesa variabile energia	50.935	46.352	46.352	€/anno
Spesa totale energia	55.224	50.641	50.641	€/anno
Consumo equivalente	68	62	62	TEP/anno
Emissioni	215	196	196	tCO <sub>2</sub> /anno
Sostituzioni totali	138	132	132	sostituzioni/anno
Spesa manutenzione	13.603	12.963	12.963	€/anno
Spesa annua totale	68.827	63.604	63.604	€/anno
<b>Risparmi</b>				
Risparmio energia	198	231	231	MWh/anno
	35	41	41	%
Risparmio spesa fissa energia	537	537	537	€/anno
Risparmio spesa variabile energia	27.729	32.312	32.312	€/anno
Risparmio spesa totale energia	28.266	32.849	32.849	€/anno
Risparmio spesa manutenzione	11.622	12.263	12.263	€/anno
Risparmio spesa totale	39.899	45.112	45.112	€/anno
	37	41	41	%
Risparmio emissioni CO <sub>2</sub>	117	136	136	tCO <sub>2</sub> /anno
<b>Analisi economica</b>				
Spesa energia per punto luce	63,62	58,34	58,34	€ <sub>en</sub> /(pl*anno)
Spesa manutenzione per punto luce	15,67	14,93	14,93	€ <sub>man</sub> /(pl*anno)
Spesa annua per punto luce	79,29	73,28	73,28	€/(pl*anno)
Spesa annua per abitante	8,34	7,71	7,71	€/(ab*anno)
Costo di investimento	230.942	307.742	272.742	€
Flussi di cassa	39.899	45.112	45.112	€/anno
VAN	212.557	193.827	228.827	€
TRA	7	8	7	anni
Livello di comfort	2	3	3	

Tabella 4.15: quadro riassuntivo delle soluzioni presentate

Tali risultati verranno in questo capitolo analizzati più nello specifico al fine di confrontare tra loro le varie ipotesi di intervento.

Il primo termine di paragone è l'energia elettrica annualmente assorbita; essa naturalmente, essendo ogni soluzione basata sulla precedente, va via via diminuendo dall'ipotesi convenzionale a quella innovativa. I risparmi percentuali rispetto allo stato attuale per le quattro proposte di intervento sono rispettivamente dell'11 %, 31 %, 35 % e 41 %.

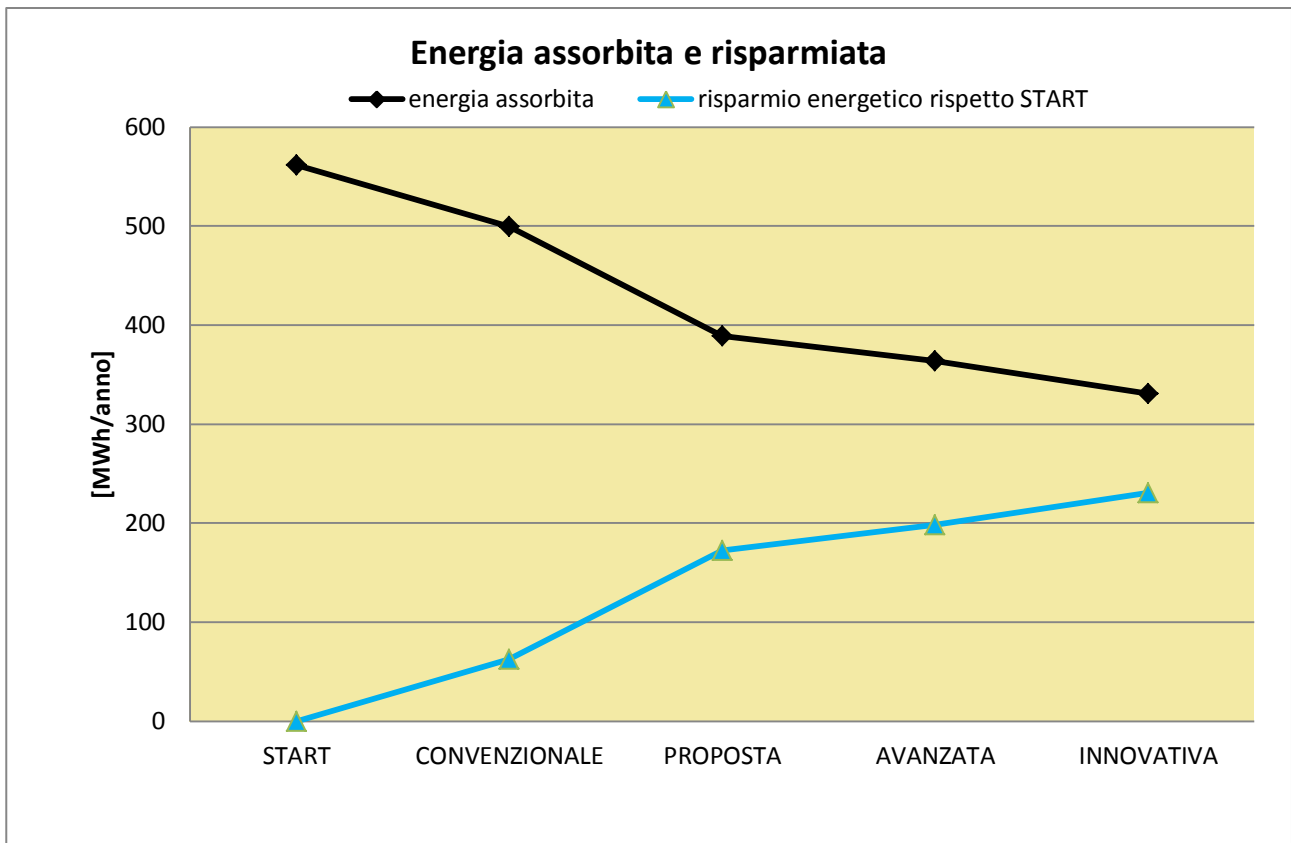


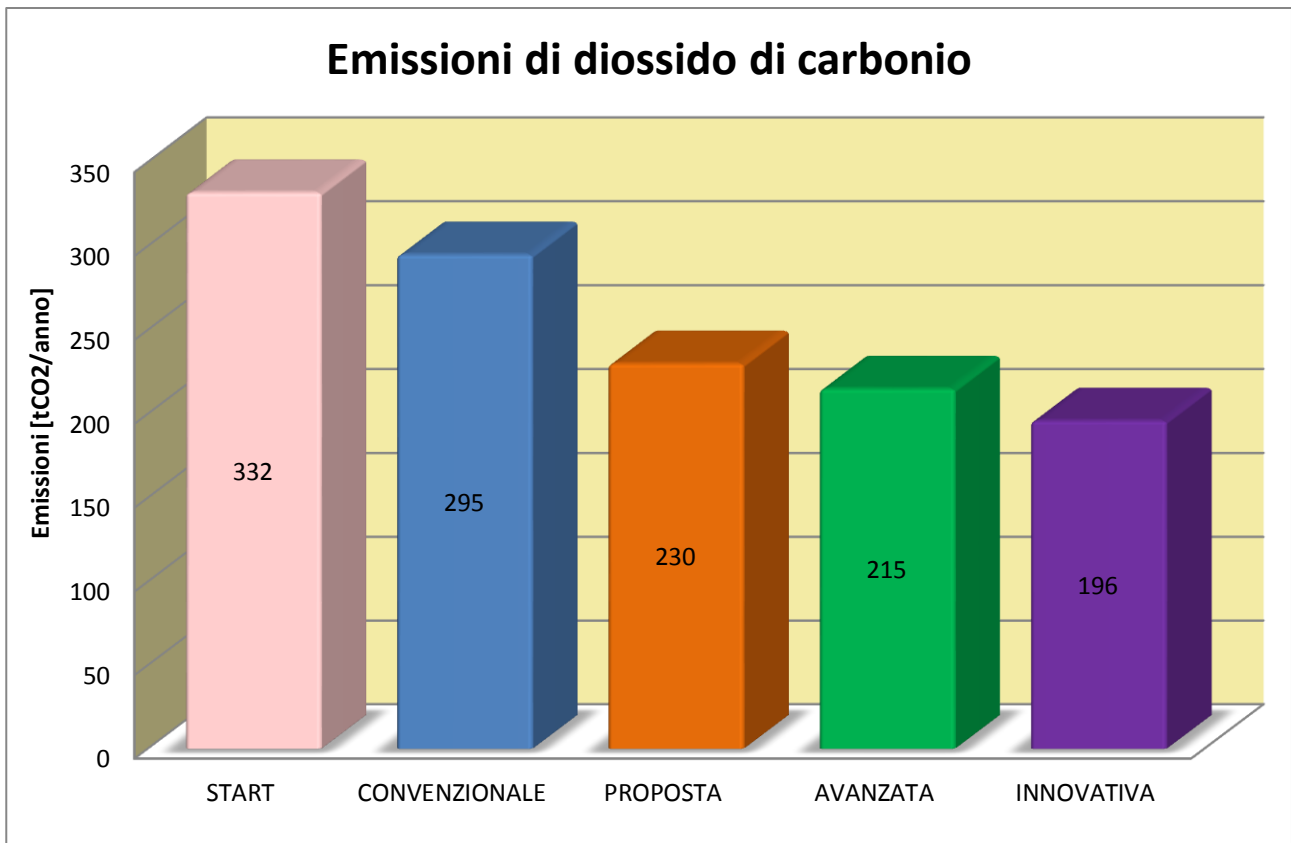
Grafico 4.5: energia assorbita e risparmiata annualmente nelle varie ipotesi

Con la condivisione di CESI RICERCA ed ENEA si adotta come valore di conversione del MWh elettrico in kg di anidride carbonica l'equivalenza:

$$1 \text{ MWh} = 500 \div 600 \text{ kg CO}_2$$

In questo modo è possibile collegare direttamente il fabbisogno energetico all'emissione di gas triatomici, come appunto la CO<sub>2</sub>, responsabili dell'effetto serra. Come si vede dal grafico 4.6 già la sola sostituzione delle lampade al mercurio comporta una riduzione di 37 tonnellate all'anno sulla produzione di tale inquinante. Essendo energeticamente più efficienti, le altre tre soluzioni garantiscono una riduzione ancora maggiore con, rispettivamente, 102, 117 e ben 136 tCO<sub>2</sub>/anno risparmiate.

Per capire l'importanza di questi dati dal punto di vista dell'impatto ambientale bisogna ricordare che il Comune oggetto di questo studio di riqualificazione dell'impianto di illuminazione pubblica conta solamente 8.251 abitanti.



*Grafico 4.6: emissione annua di diossido di carbonio nei vari casi*

Uno degli aspetti chiave per le Amministrazioni Comunali quando intraprendono una qualsiasi iniziativa economica è il risparmio, in termini monetari, che tale azione produce.

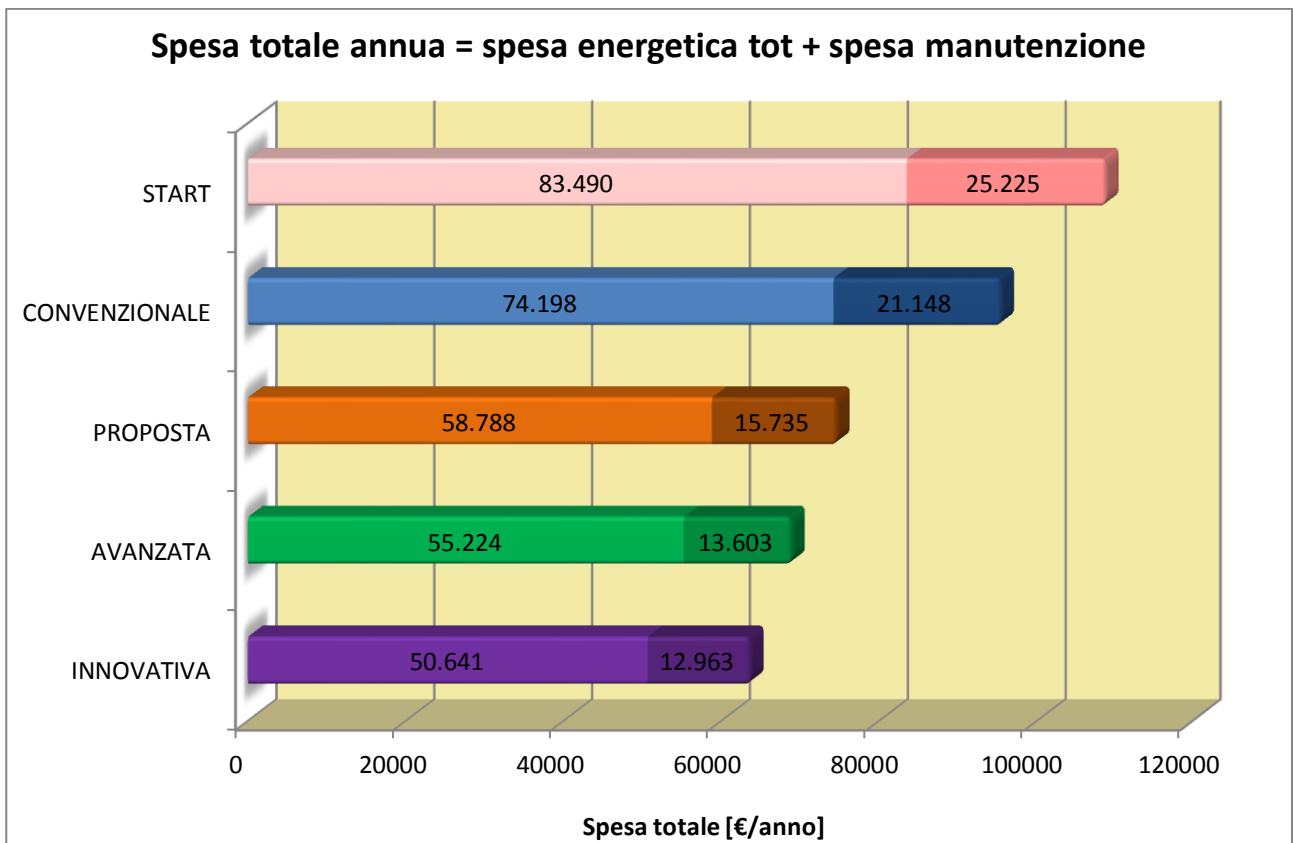
Come spiegato precedentemente tutte le soluzioni presentate permettono un risparmio consistente sia per la spesa energetica sia per quella legata alla manutenzione dell'impianto. I risparmi sulla spesa in bolletta riguardano sia i costi fissi, legati alla potenza installata, che quelli variabili, legati ai chilowattora annui assorbiti dalla rete, che sono la voce preponderante.

La riduzione dei costi fissi è garantita dalla minor potenza installata grazie all'utilizzo di lampade SAP; quella dei costi variabili dalla riduzione del numero di ore annue di accensione dell'impianto e, quando previsto, dagli effetti positivi della stabilizzazione e regolazione del flusso luminoso. La diminuzione dei costi per la manutenzione deriva dalla maggior durata di vita delle Lampade SAP, che riduce il numero di sostituzioni annue, dalla riduzione delle ore di vita equivalenti, per le lampade regolate, e dalla riduzione dei costi di ricerca dei guasti delle lampade telegestite. In più la riduzione nel numero annuo di sostituzioni delle lampade porta come beneficio quello di dover smaltire meno materiale e soprattutto di non dover smaltire lampade contenenti mercurio, altamente pericoloso.

Grazie alle azioni di efficientamento energetico la spesa del Comune passa dagli attuali 108.715 euro a 95.346 euro mediante la semplice sostituzione delle lampade obsolete e a 74.523 euro se si effettua anche la regolazione di linea del flusso luminoso. Le due soluzioni abilitanti alla smart city consentono risparmi ancora più marcati e riducono la spesa annua rispettivamente a 68.827 euro (soluzione avanzata) e a 63.604 euro (soluzione innovativa).

Nel grafico 4.7 è riportato l'andamento di entrambe le voci di spesa, quella energetica (a sinistra sulle barre) e quella per la manutenzione (a destra).





*n.b. per "spesa energetica tot" (a sinistra sulle barre) si intende la somma dei costi energetici fissi e variabili*  
*Grafico 4.7: spesa totale annua ripartita tra spesa la energetica e per la manutenzione*

É interessante analizzare come il beneficio economico si ripartisca sui singoli cittadini e sul singolo punto luce, valutando le voci di spesa in funzione di questi parametri.

La figura 4.11 mostra l'incidenza sulla spesa, energetica, per la manutenzione e totale, di una lampada e di un abitante e la confronta con la media dei Comuni aderenti a Lumière.

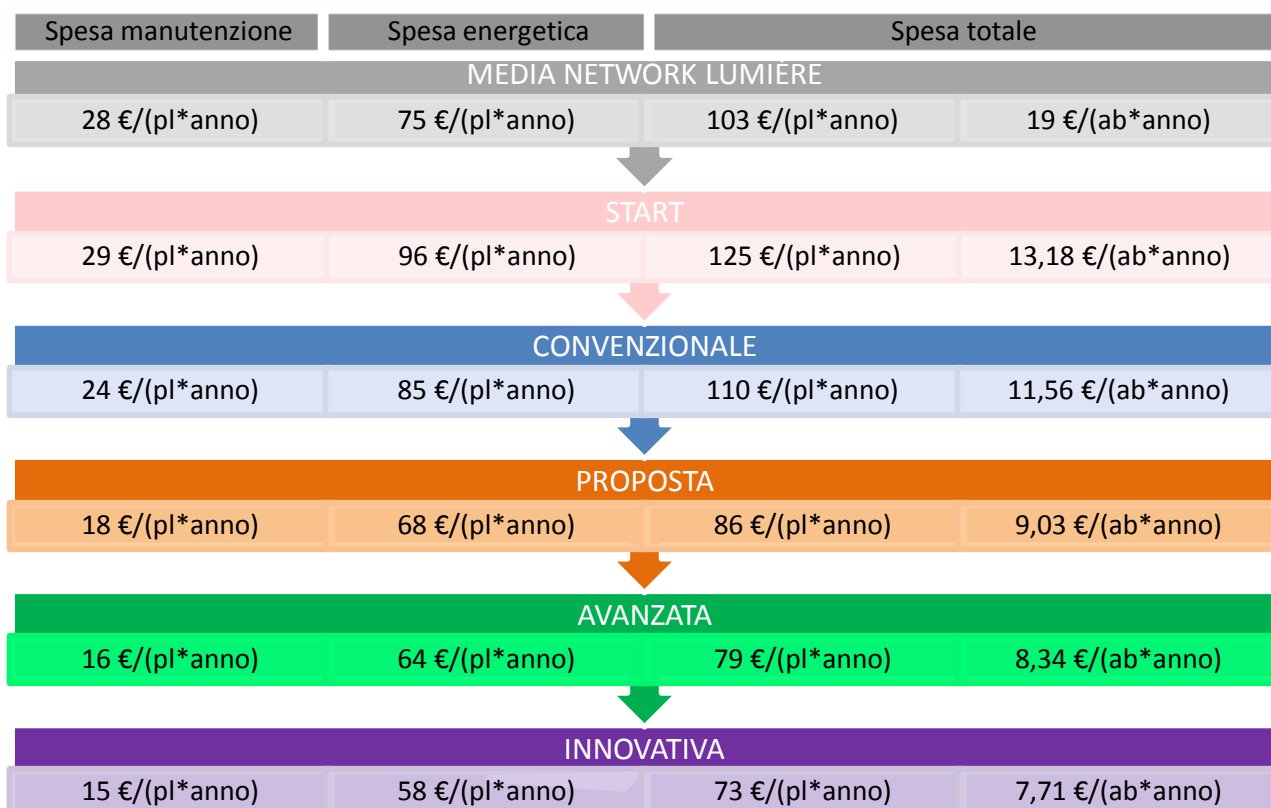


Fig. 4.11: incidenza della spesa sul singolo abitante e sul singolo punto luce

Come si vede Castelnuovo Magra ha una spesa media per punto luce maggiore rispetto alla media dei Comuni del Network di ben 22 euro; mentre quella che deve sostenere ogni abitante è già allo stato attuale inferiore alla media.

La riqualificazione dell'impianto di illuminazione permette di scendere a valori ben al di sotto della media dei Comuni di Lumière, come dimostrato dai soli 73 euro che richiede ogni punto luce nell'ipotesi di illuminazione adattiva rispetto ai 125 euro dello stato attuale e ai 103 euro della media.

Altro elemento cruciale con cui in pratica tutti i Comuni si scontrano è la costante scarsità delle loro risorse economiche. A causa di questa limitazione un costo di investimento troppo alto potrebbe diventare un ostacolo insormontabile; proprio per questo motivo sempre più spesso i Comuni si rivolgono alle E.S.Co. per trovare i fondi necessari attraverso il meccanismo del finanziamento tramite terzi.

Per avere un'idea dell'ordine di grandezza dei costi di investimento delle opere di riqualificazione dell'illuminazione pubblica questi sono riportati nella figura seguente.

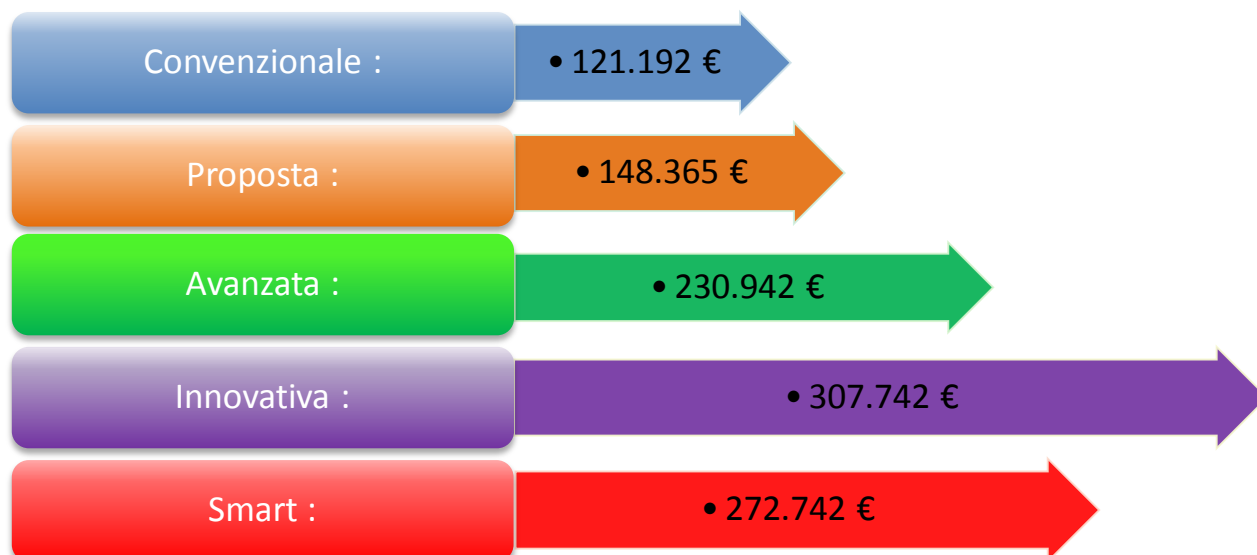


Fig. 4.12: costi di investimento delle varie soluzioni

Grazie al calcolo di tutti i dati esposti finora è stato possibile, come mostrato precedentemente, calcolare due indici economici, il VAN e il TRA, utilizzati come strumenti per confrontare le soluzioni presentate.

Il grafico 4.8 riporta l'andamento del VAN in funzione del tempo; qui è possibile leggere, oltre ovviamente al VAN al termine della durata dell'iniziativa economica, il TRA e il costo di investimento.

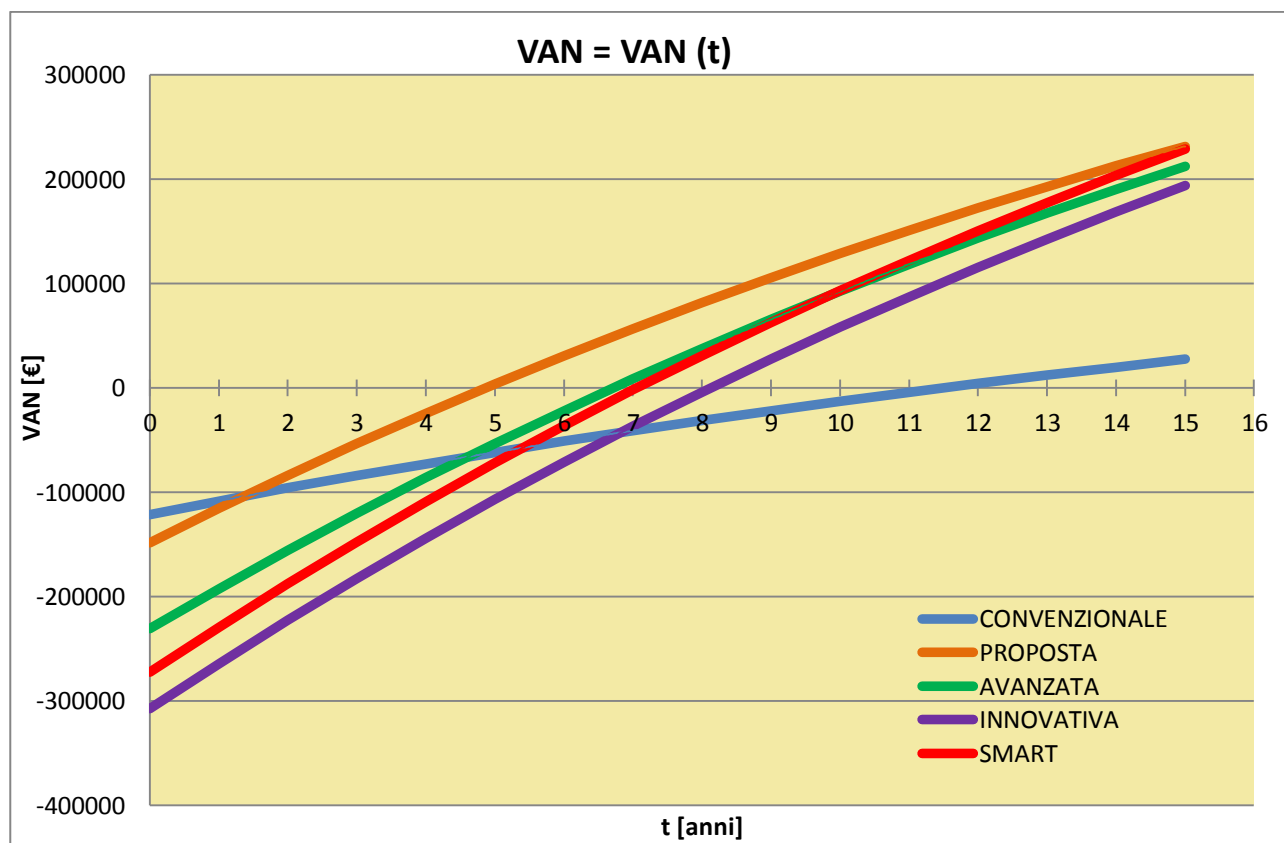


Grafico 4.8: andamento del VAN per le varie soluzioni presentate

Per svolgere un'analisi comparativa tra le cinque diverse soluzioni in modo esaustivo, oltre al VAN, al TRA e al costo di investimento, sono molto importanti anche il risparmio percentuale di energia assorbita dalla rete elettrica e il livello di comfort che le diverse opzioni garantiscono.

Per quanto riguarda il livello di comfort si può dire che la semplice sostituzione delle lampade al mercurio garantisce un livello del servizio molto alto. In realtà ciò, anche se di per sé è una cosa buona, è dovuto al fatto che tale soluzione è sovradimensionata rispetto al reale fabbisogno luminoso. Infatti, il numero di ore anno, pari a quello allo stato attuale (4.196 h/anno), è piuttosto alto; inoltre il flusso luminoso è mantenuto al 100 % della potenza, e anche di più a causa delle fluttuazioni della tensione di alimentazione, anche nelle ore centrali della notte quando non è necessario.

La seconda soluzione garantisce al contrario il livello di comfort più basso tra tutte le ipotesi oggetto di questo studio. Questo perché la gestione del flusso luminoso sul singolo quadro elettrico permette sì un maggiore risparmio energetico, ma obbliga a regolare tutti i punti luce connessi a quel quadro nel medesimo modo; senza poter quindi ottimizzare tale regolazione.

Questo problema viene in parte risolto con la telegestione punto-punto del flusso luminoso, giacché permette di gestire singolarmente ogni sorgente luminosa. Il suo limite, che è anche il motivo per cui si necessita di un'illuminazione che si basa sull'effettiva domanda, consiste nel fatto che tale gestione, seppur sul singolo punto luce, venga fatta solo su delle previsioni della domanda e non può quindi far fronte a situazioni anomale.

Pertanto un'illuminazione di tipo adattivo ha il duplice vantaggio di garantire un maggiore risparmio energetico e, al tempo stesso, una qualità del servizio che non può essere raggiunta con nessuna delle tecnologie precedenti.

Nel grafico 4.9 sono riportati per le cinque soluzioni i tempi di ritorno attualizzati in funzione del risparmio energetico percentuale, parametrizzati tramite il livello di comfort (rappresentato dalla dimensione delle bolle).

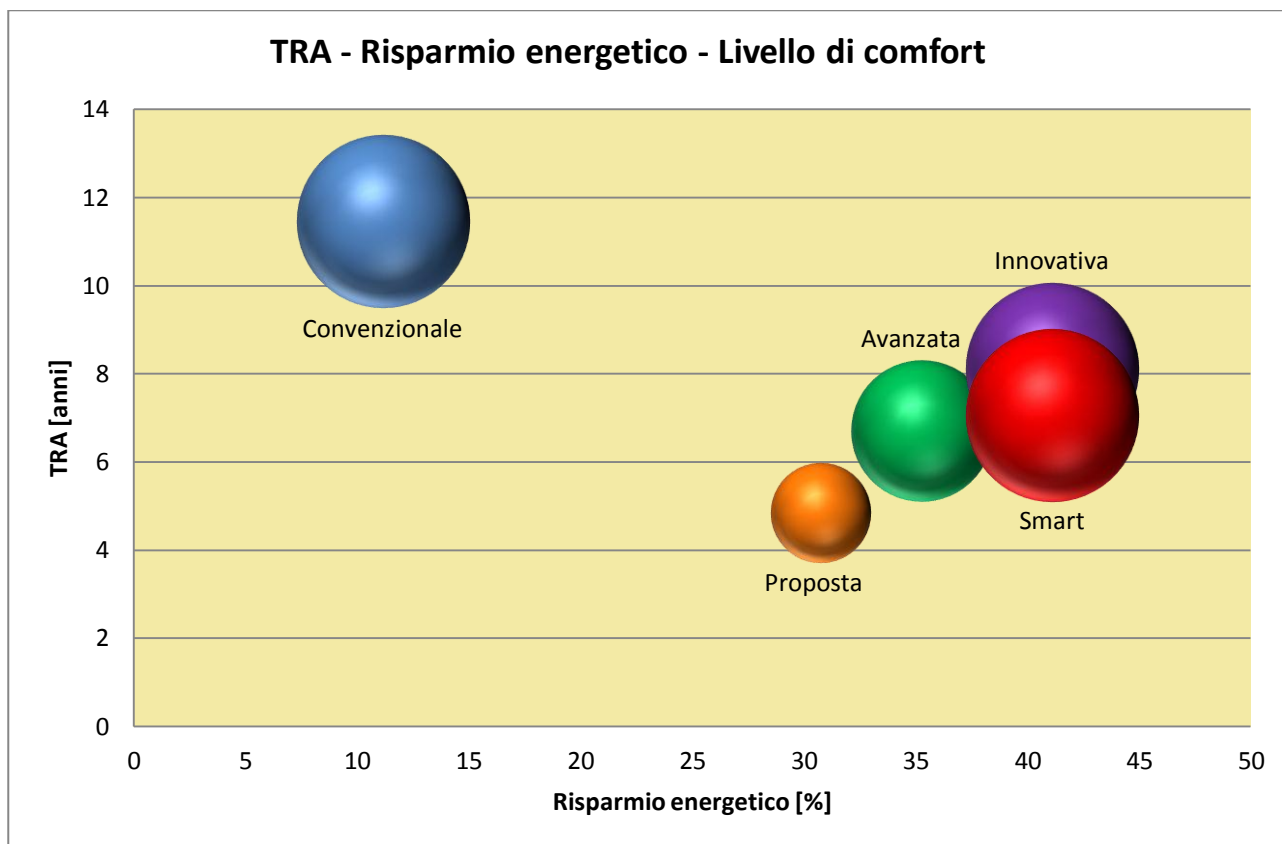


Grafico 4.9: TRA in funzione del risparmio energetico % e del livello di comfort

Alla luce dello studio condotto sulle cinque soluzioni presentate, è ora possibile compiere le seguenti considerazioni finali.

Scegliere di sostituire semplicemente le lampade al mercurio con le più efficienti lampade al sodio ad alta pressione è una scelta che, anche se comporta un risparmio energetico del 10 % circa, non è molto sensata ed è anzi un po' obsoleta. Questo perché, come mostrano i grafici 4.8 e 4.9 questa soluzione ha un elevato tempo di ritorno (11 anni) e un bassissimo VAN (27.450 €). Tuttavia questa è la soluzione che fino ad oggi è stata la più diffusa; probabilmente perché è quella che nell'immaginario collettivo è ritenuta migliore.

Per quanto detto finora si può affermare che sono preferibili gli interventi misti, ossia quelli che oltre alla sostituzione delle lampade provvedono anche alla regolazione e stabilizzazione del flusso luminoso.

A tal proposito è necessario dire che dal punto di vista prettamente economico la scelta più vantaggiosa sarebbe quella di intervenire prima sulla regolazione, sempre per step successivi (linea, punto-punto, adattiva), e poi sulla sostituzione delle lampade. Dal punto di vista pratico ci sono almeno due buone ragioni per fare come normalmente si usa.

La prima è che regolare il flusso luminoso senza sostituire le lampade porterebbe a sovradimensionare il sistema di regolazione nel caso in cui in un secondo momento fossero installate lampade a più alta efficienza. La seconda è di tipo tecnologico. Infatti, le lampade ai vapori di mercurio non possono essere sottoalimentate oltre una certa soglia e ciò comporta che i risparmi energetici effettivamente conseguibili non sono quelli che il sistema di regolazione permetterebbe.

Come si vede dal grafico 4.8 queste sono, dal punto di vista economico, molto più simili tra loro, infatti convergono tutte verso un VAN di circa 200.000 euro e hanno un TRA che si aggira tra i 5 e gli 8 anni.

Più in dettaglio, la soluzione proposta è, tra queste, la migliore dal punto di vista economico, avendo un tempo di ritorno di soli 5 anni, un costo iniziale inferiore a 150.000 euro e un VAN di circa 230.000 euro. I limiti di questa scelta riguardano il basso livello di comfort e di risparmio energetico.

La soluzione complessivamente migliore presente ad oggi sul mercato è quella della telegestione sul singolo punto luce. In primo luogo perché garantisce il livello di efficienza energetica più alto possibile (-35 %); inoltre utilizza tecnologie abilitanti per gli smart service e che creano infrastrutture che determineranno uno sviluppo futuro. La telegestione punto-punto crea in sostanza un indotto di servizi che miglioreranno la qualità della vita nelle città, proprio come suggerisce il concetto di smart city.

L'ultima soluzione, quella adattiva, si può considerare come una logica e naturale evoluzione della precedente e non come una sua alternativa. La smart lighting rappresenta il futuro nel campo dell'illuminazione; non è abilitante agli smart service, è già di per sé uno smart service. Oltretutto implementa altri due servizi smart, come la videosorveglianza e il monitoraggio del traffico, e potrà integrarne altri di grande interesse economico, sociale, e ambientale.

Come ultima riflessione è possibile pensare a quali effetti avrebbe sul sistema paese una riqualificazione dell'illuminazione pubblica di tutti i Comuni che hanno aderito al Network Lumière.

A tale scopo è stato sviluppato un configuratore basato su un foglio di calcolo. Per i Comuni di cui si dispongono i dati, la potenza totale, comprensiva delle perdite, è di 14.339 kW (14,3 MW) e il 40,8 % dei punti luce è dotato di lampade ai vapori di mercurio; inoltre mediamente gli impianti rimangono accesi per 4.300 ore l'anno. Questo strumento considera che mediamente le lampade SAP con cui si sostituiscono quelle HG hanno una potenza nominale del 25 % in meno a parità di flusso luminoso emesso e che è possibile controllare all'incirca il 75 % della potenza totale.

I risultati ottenuti sono molto interessanti: con l'illuminazione di tipo adattivo si potrebbe avere un risparmio energetico maggiore del 40 %, con una riduzione di 26 GWh l'anno di energia elettrica assorbita dalla rete. Tale valore rappresenta lo 0,08 % dell'intero fabbisogno nazionale, pari a circa 310 TWh l'anno. Questo comporterebbe una riduzione nelle emissioni annue di anidride carbonica di 15.231 tonnellate con conseguente beneficio per tutta la collettività.

In termini economici i risparmi annui sono tutt'altro che trascurabili; la riqualificazione comporterebbe per tutti i Comuni una riduzione annuale di 3.600.000 euro solo per quanto riguarda la componente energia della bolletta.

Con questo configuratore sono stati calcolati, anche se con un'approssimazione leggermente maggiore, gli effetti di una riqualificazione di tutti gli impianti di illuminazione pubblica in Italia. Questa proiezione si basa su alcuni dati e su alcune ipotesi che sono conseguenza dei dati raccolti nel progetto Lumière.

In Italia i consumi di energia elettrica per l'illuminazione pubblica sono di circa 6,1 TWh l'anno cui corrisponde una spesa di circa 854 milioni di euro; supponendo lo stesso numero di ore/anno di accensione dei Comuni del Network (4.300) ne deriva una potenza installata di 1.419 MW.

Se si ipotizza che la percentuale di lampade al mercurio sia del 41 % e che quelle al sodio abbiano una potenza inferiore del 25 %, la potenza installata, grazie a tale sostituzione, diminuisce di 145 MW (10 %).

Telegestendo il 75 % della potenza installata con un sistema di tipo adattivo i risparmi energetici ed economici sono notevoli; l'energia assorbita diminuirebbe di 2,6 TWh l'anno (42 %), le emissioni di anidride carbonica di 1.506.940 tonnellate l'anno e la relativa spesa di quasi 360 milioni di euro. Per capire l'entità del risparmio energetico basta confrontarlo con il fabbisogno nazionale (309,8 TWh/anno) e notare che rappresenta quasi l'1 % di tale valore.

Per cercare conferma dei dati a livello nazionale, questi sono stati ricalcolati in altri due modi; più precisamente considerando i risultati, decisamente attendibili, ottenuti per i Comuni del Network ed estendendoli all'intera Nazione mediante il rapporto tra gli abitanti e le superfici. Mediando tutti i risultati si vede che non si discostano troppo da quelli sopra riportati.

	Castelnuovo	Lumière	Proiezione Italia	
Situazione iniziale				
Numero di abitanti	8.251	638.601	60.340.328	abitanti
Superficie	15	2.304	301.336	km <sup>2</sup>
Potenza installata iniziale (comprese perdite)	134	14.339	1.418.605	kW
Spesa potenza impegnata iniziale	4.826	516.189	51.069.767	€/anno
Ore accensione	4.191	4.300	4.300	h/anno
Energia annua iniziale	561.886	61.655.914	6.100.000.000	kWh/anno
Spesa componente energia iniziale	78.664	8.631.828	854.000.000	€/anno
Parametri di intervento				
% di riduzione sulla potenza delle SAP rispetto HG	16	25	25	%
% di lampade HG sul totale	69	41	41	%

Situazione finale				
Potenza installata finale (comprese perdite)	119	12.877	1.274.003	kW
Spesa potenza impegnata finale	4.289	463.573	45.864.098	€/anno
Energia annua finale	331.087	35.784.876	3.540.418.616	kWh/anno
Spesa componente energia finale	46.352	5.009.883	495.658.606	€/anno
Risparmi				
Risparmio su potenza installata	-15	-1.462	-144.602	kW
Risparmio su spesa per potenza installata	-537	-52.616	-5.205.670	€/anno
Risparmio energetico	-231	-25.871	-2.559.581	MWh/anno
Risparmio energetico %	-41	-42	-42	%
Risparmio emissioni	-136	-15.231	-1.506.940	tCO <sub>2</sub> /anno
Risparmio su spesa componente energia	-32.312	-3.621.945	-358.341.394	€/anno
Risparmio energetico % rispetto energia Italia	-7,45E-05	-0,008	-0,8	%

Tabella 4.16: effetti sul sistema paese dell'illuminazione smart

In conclusione è possibile affermare che un'illuminazione di tipo adattivo, che sfrutta le tecnologie ICT e che è basata sulla trasmissione di dati digitali, avrebbe ripercussioni decisamente positive su tutto il sistema paese e per tutte le Amministrazioni Comunali, dal punto di vista energetico, ambientale ed economico.

Comuni del Network Lumière	Proiezione Italia
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Potenza installata: 14 MW</li> <li>•ΔPotenza installata: -1,4 MW</li> <li>•Energia attuale: 61,7 GWh/anno</li> <li>•ΔEnergia: -42 %</li> <li>•ΔEnergia: -26 GWh/anno</li> <li>•ΔEmissioni: -15.231 tCO2/anno</li> <li>•ΔSpesa energetica: -3,7 MLN €</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Potenza installata: 1.419 MW</li> <li>•ΔPotenza installata: -145 MW</li> <li>•Energia attuale: 6100 GWh/anno</li> <li>•ΔEnergia: -42 %</li> <li>•ΔEnergia: -2600 GWh/anno</li> <li>•ΔEmissioni: -1.506.940 tCO2/anno</li> <li>•ΔSpesa energetica: -358 MLN €</li> <li>•ΔEnergia rispetto ai consumi nazionali: -0,8 %</li> </ul>

Fig. 4.13: effetti della smart lighting sul sistema paese

La smart lighting aumenterebbe considerevolmente l'efficienza energetica del nostro Paese e garantirebbe notevoli risparmi economici; inoltre, come benefico effetto collaterale, contribuirebbe a rispettare le direttive europee e mondiali, come quelle imposte dal protocollo di Kyoto, che prevedono la drastica riduzione delle emissioni di gas serra. Consentirebbe elevati risparmi in termini monetari non solo a livello nazionale ma anche alle Amministrazioni Comunali e creerebbe un indotto di tecnologie accompagnato da un notevole sviluppo non solo nel settore dell'illuminazione, ma anche in quello dei trasporti, nella gestione degli edifici, nella sicurezza e in generale nella qualità dei servizi offerti ai cittadini e turisti.

In poche parole la smart lighting si può considerare la porta di ingresso per la Smart City.



## 5. SPERIMENTAZIONE SU UN CASO REALE: Realizzazione di un sistema di telegestione e di telecontrollo di tipo adattivo per impianti di illuminazione esterna per il C.R. ENEA Casaccia (RM)

Al fine di sperimentare e qualificare la tecnologia di illuminazione adattiva è stato progettato un intervento su un'area localizzata all'interno del C.R. ENEA Casaccia (RM). Tale intervento consiste nell'installazione di un sistema innovativo di telegestione e telecontrollo per impianti di illuminazione esterna; il sistema sarà composto da specifica strumentazione a livello delle singole lampade e del quadro elettrico e da un sistema di trasmissione ed elaborazione dati.

Il progetto prevede la telegestione, di tipo adattivo, sul singolo punto luce delle torri faro presenti nel C.R. ENEA della Casaccia, utilizzando la tecnologia delle onde convogliate (PLC) per la trasmissione delle informazioni e dei comandi.

Le torri, alte circa 25 m, sono 7 per un totale di 62 punti luce, le lampade sono al sodio ad alta pressione di 400 W l'una, per una potenza nominale totale di 24,8 kW. Tutte le torri sono collegate al medesimo quadro elettrico e si trovano ad una distanza da quest'ultimo compresa tra i 90 m e i 360 m circa. I dati nel dettaglio sono riportati nella seguente tabella.

Numero identificativo	Numero di lampade	Potenza totale [W]	Note
1	8	3200	Ingresso vecchio
2	10	4000	Parcheeggio nord verso ingresso vecchio
3	10	4000	Parcheeggio nord verso ingresso nuovo
4	5	2000	Interna vicino ingresso nuovo
5	10	4000	Ingresso nuovo
6	9	3600	Parcheeggio pullman
7	10	4000	Parcheeggio sud
	<b>62</b>	<b>24800</b>	
8	5	2000	(NON FUNZIONANTE) Interna vicino parcheggio pullman

Le figure seguenti mostrano la disposizione delle torri e le distanze che le separano tra di loro e dal quadro elettrico.

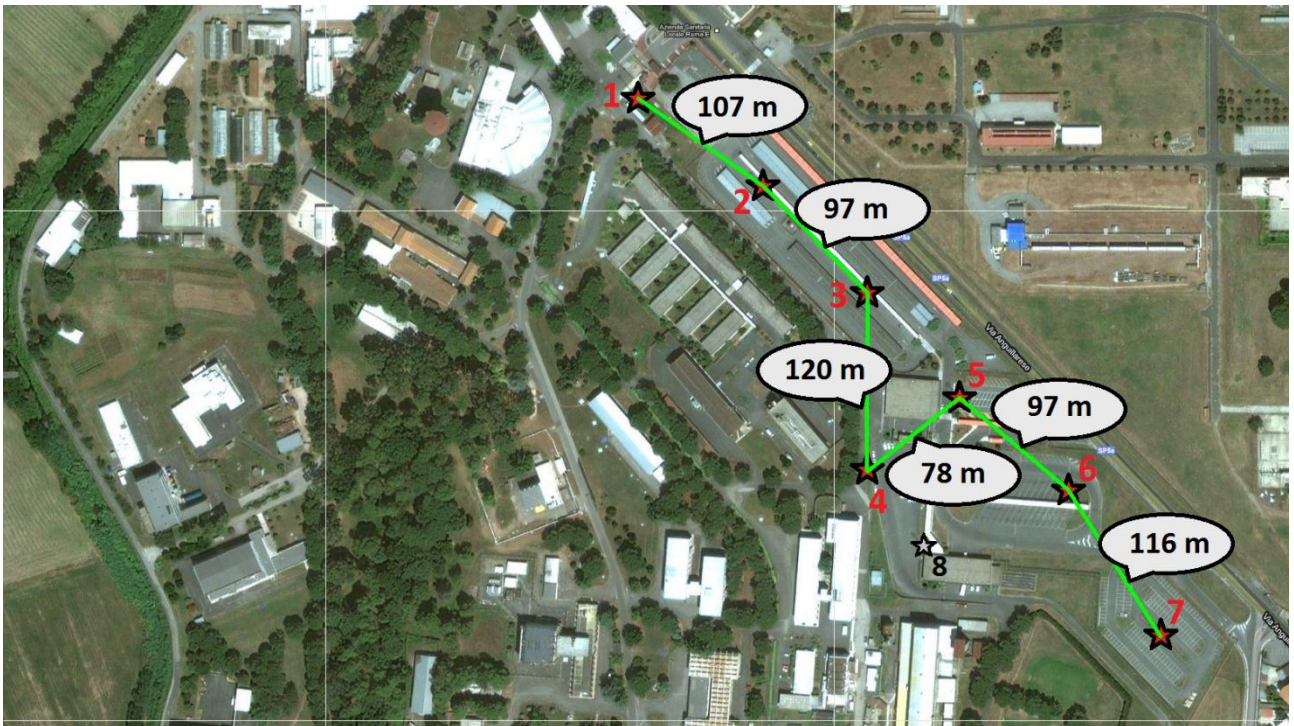


Fig. 5.1: Distanza tra le torri

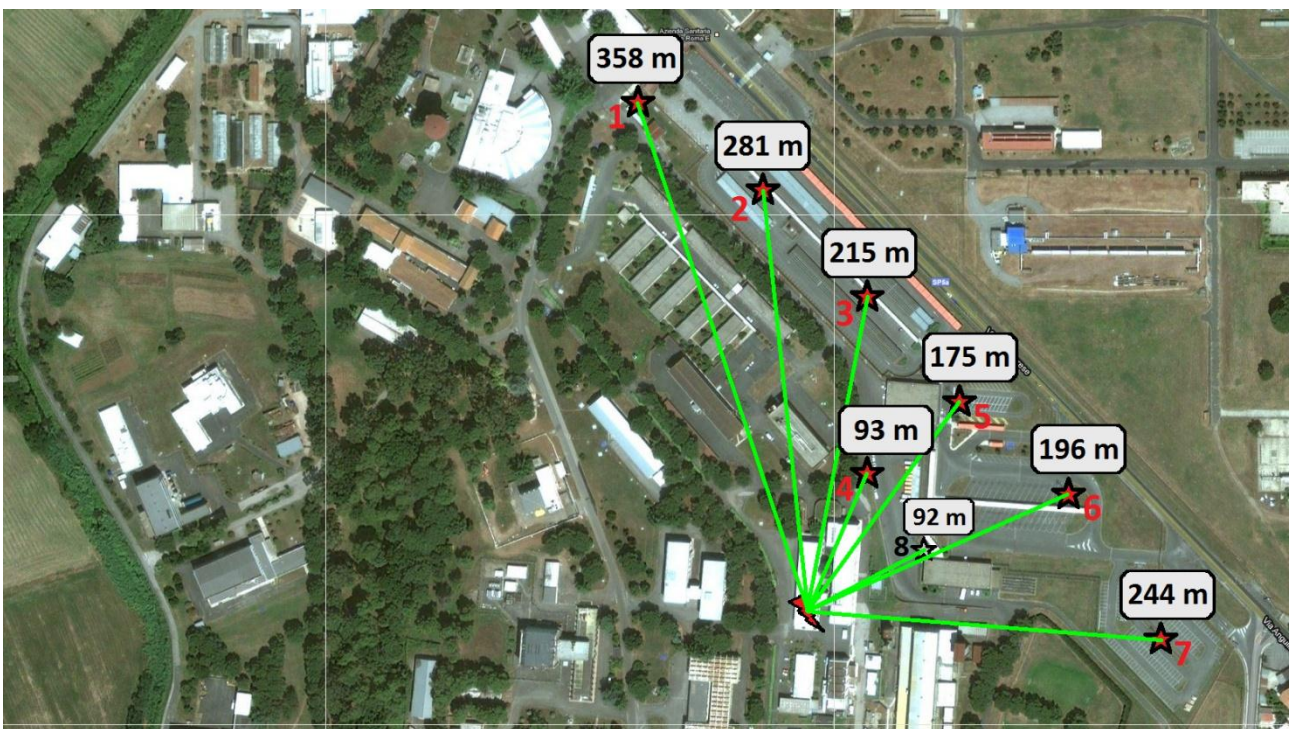


Fig. 5.2: Distanza delle torri dal quadro elettrico

Il sistema prevede la regolazione del singolo punto luce basata sull'elaborazione delle immagini inviate dalle telecamere grazie ad un software in grado di estrapolare un indice che misuri il flusso veicolare e pedonale in tempo reale istante per istante.

È prevista l'installazione di due telecamere sulle torri 2 e 5 che monitorino il flusso veicolare e pedonale nel parcheggio del centro e su un piccolo tratto della via Anguillarese.

È così possibile ridurre fino al 45 % i consumi energetici programmando i comandi di spegnimento, accensione o riduzione del flusso luminoso di ogni punto luce e l'on/off puntuale degli impianti attraverso l'orologio astronomico. Elimina gli sprechi energetici generati dalle accensioni diurne per la ricerca delle lampade guaste e riduce le dispersioni di linea per basso fattore di potenza.

L'illuminazione adattiva garantisce un notevole risparmio anche per quanto riguarda la manutenzione in quanto diminuisce il numero di sostituzioni annue e il costo di ricerca dei guasti.

Ciò è possibile in quanto la stabilizzazione della tensione di alimentazione aumenta la durata delle lampade riducendo il numero di ore equivalenti di funzionamento, il sistema fornisce in tempo reale tutte le informazioni sullo stato degli impianti, consente interventi di manutenzione tempestivi e mirati, misura l'effettiva resa dei componenti installati, i tempi d'intervento e l'efficacia del servizio offerto. I costi generali di manutenzione si riducono così fino al 55 %.

Oltre ai vantaggi economici la telegestione adattiva permette la riduzione dell'inquinamento atmosferico e luminoso, offre una maggior sicurezza e qualità del servizio e trasforma gli impianti di illuminazione in una rete di comunicazione intelligente. Grazie alla tecnologia a banda larga su rete elettrica e ai dispositivi già installati per la telegestione dell'illuminazione, il lampione diventa un punto intelligente in grado di erogare servizi aggiuntivi (gestione di edifici, sistemi di video-sorveglianza, display informativi, hot spot wi-fi, ricarica di veicoli elettrici...) di pubblica utilità e sicurezza senza necessità di nuovi e costosi cablaggi.

I principali componenti del sistema sono:

- Regolatori sul singolo punto luce (uno per ogni lampada);
- Regolatore sul quadro elettrico;
- Server e software di gestione;
- Telecamere da esterno.

## 6. CONCLUSIONI

Nell'ottica della riduzione dei consumi dell'energia elettrica è stata posta l'attenzione sull'illuminazione pubblica. Il quadro sullo stato attuale dell'illuminazione pubblica in termini di tecnologie e strumentazione è risultato incoraggiante, sebbene sia ancora deficitaria l'implementazione sistematica in grande scala. Il tempo di ritorno economico è infatti direttamente proporzionale all'implementazione massiccia di strumentazione sugli apparati di illuminazione pubblica. Inoltre lo sfruttamento delle onde convogliate consente una gestione centralizzata delle informazioni e dell'elaborazione dati senza nessun costo aggiuntivo in termini di cablaggio e una possibilità computazionale molto elevata, difficilmente raggiungibile elaborando i dati in loco.

La lacuna che ENEA vuole colmare con questa attività è quella di sviluppare un sistema di controllo automatico ed adattivo in grado di gestire autonomamente e distintamente ogni palo della luce.

Sono state presentate le tecnologie di gestione del flusso luminoso, dal punto di vista dei sistemi di accensione/spengimento, della stabilizzazione e regolazione della tensione di alimentazione e del telecontrollo del flusso luminoso.

Il primo obiettivo dell'attività è quindi quello di identificare una strategia ed una conseguente architettura per un sistema di telegestione adattiva ed integrato per la gestione del "sistema-illuminazione" di una realtà territoriale complessa con capacità di diagnostica e monitoraggio ed adattamento per pilotare il sistema in funzione del grado di fruizione degli impianti, delle condizioni climatiche e del grado di funzionalità degli impianti stessi.

Lo stato attuale del sistema di monitoraggio, basato sull'acquisizione video da telecamere, permette di estrarre un indice di flusso del traffico. Tale indice consente di estrarre informazioni molto importanti sullo stato corrente del traffico in un'area di interesse, quali il numero di veicoli transitati, la valutazione del background e l'identificazione degli oggetti in movimento..

In prospettiva, nella prosecuzione dell'attività, tali tecnologie verranno integrate con altri sensori, come ad esempio quello per il monitoraggio della qualità dell'aria, e sviluppato un sistema che controlla una sottorete (smart street o smart square) e successivamente un insieme di sottoreti (rete urbana).

Il sistema di controllo che è stato sviluppato supera il concetto della semplice regolazione oraria di flusso ma invece adatta l'energia erogata all'effettiva domanda del momento in modo tale da consumare energia soltanto nella misura e nel momento in cui l'energia è effettivamente richiesta (*Energy on Demand*). È stato dimostrato su un caso reale che la strategia di controllo adattiva può produrre mediamente un risparmio di oltre il 40% rispetto al 15% di risparmio che si ottiene con un controllo del flusso luminoso tradizionale. Il controllo avviene attraverso regolazione oraria sulla base di un modello predittivo innovativo dei flussi veicolari.

L'illuminazione di tipo adattivo, che sfrutta le tecnologie ICT e che è basata sulla trasmissione di dati digitali, avrebbe ripercussioni decisamente positive su tutto il sistema paese e per tutte le Amministrazioni Comunali, dal punto di vista energetico, ambientale ed economico.

La smart lighting aumenterebbe considerevolmente l'efficienza energetica del nostro Paese e garantirebbe notevoli risparmi economici; inoltre, come benefico effetto collaterale, contribuirebbe a rispettare le direttive europee e mondiali, come quelle imposte dal protocollo di Kyoto, che prevedono la drastica riduzione delle emissioni di gas serra. Consentirebbe elevati risparmi in termini monetari non solo a livello

nazionale ma anche alle Amministrazioni Comunali e creerebbe un indotto di tecnologie accompagnato da un notevole sviluppo non solo nel settore dell'illuminazione, ma anche in quello dei trasporti, nella gestione degli edifici, nella sicurezza e in generale nella qualità dei servizi offerti ai cittadini e turisti.

È stato presentato il progetto che verrà realizzato presso il C.R. ENEA Casaccia che prevede la realizzazione di un sistema di telegestione e di telecontrollo di tipo adattivo per impianti di illuminazione esterna per le torri faro presenti nel centro.

In conclusione l'introduzione di un sistema di controllo autonomo ed adattivo, a fronte di costi iniziali non elevati, può portare ad un incremento significativo del risparmio energetico sulla scala dell'intero distretto urbano.