

Politecnico di Torino



Tesi di Laurea Magistrale In Architettura Costruzione Città

*Illuminazione pubblica: da un modello economico lineare
a un modello circolare.*

Relatore:

Prof.ssa Elena Piera Montacchini

Candidato:

Andrea Arnaudo

Correlatore:

Prof.ssa Silvia Tedesco

A.A. 2024/2025

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	3
1.1	Obiettivi e struttura della tesi	3
1.2	Premessa: l'illuminazione pubblica in Italia	4
2	TRANSIZIONE DA UN MODELLO ECONOMICO LINEARE A UN MODELLO CIRCOLARE NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA.....	5
2.1	Dal modello lineare a quello circolare: una scelta obbligata.	5
2.1.1	Concetti e modelli nell'economia circolare.	6
2.1.2	Cinque modelli di business circolari adattati al mondo della pubblica illuminazione.	8
2.1.3	Paradigma delle R.....	11
2.2	Gli stakeholder coinvolti nella transizione	12
2.2.1	Le amministrazioni	12
2.2.2	E.s.co.....	14
3	QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO	16
3.1	Criteri ambientali minimi (CAM).....	16
3.1.1	Obiettivi e campi di applicazione dei CAM	17
3.1.2	CAM per l'acquisizione di apparecchi e sorgenti luminose per illuminazione pubblica e la progettazione di impianti per illuminazione pubblica.....	19
3.1.3	CAM per servizio di illuminazione pubblica	20
3.2	La Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD) per i sistemi di illuminazione pubblica secondo la PCR EPDItaly020.....	22
3.2.1	Descrizione generale	22
3.2.2	EPD realizzate nel settore dell'illuminazione pubblica	25
4	CASI STUDIO E LINEE GUIDA DI RIFERIMENTO.....	26
4.1	Casi studio in Italia.....	26
4.1.1	Premessa: principi di circolarità applicati al contesto italiano	26
4.1.2	Progetto per l'illuminazione pubblica del comune di San Pier d'Isonzo.....	26
4.1.3	Progetto per l'illuminazione pubblica del comune di Gabicce mare	28
4.2	Casi studio in Olanda	31
4.2.1	Due progetti pilota per appalti circolari olandesi	31

4.2.2	Gara pubblica per la città di Amsterdam	33
4.2.3	Gara pubblica per tre città delle Drechtsteden.....	34
4.2.4	Studio analitico dei progetti pilota.....	35
4.3	Linee guida sulla circolarità per l'illuminazione pubblica olandese	43
4.3.1	Fase di progettazione e iniziativa.....	44
4.3.2	Fase di acquisto e realizzazione	46
4.3.3	Fase di gestione, manutenzione, durata.....	47
4.3.4	Fase di demolizione e riciclaggio.....	50
5	PROPOSTA DI UNA GUIDA PER LA CIRCOLARITÁ DELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA RISPETTO ALLE FASI DEL CICLO VITA DEGLI IMPIANTI	52
5.1	Introduzione e descrizione struttura.....	52
5.2	Fase di progettazione	54
5.3	Fase di utilizzo E manutenzione	65
5.4	Fase di dismissione\riciclo	85
6	CONCLUSIONI	91

1 INTRODUZIONE

1.1 OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA TESI

Il presente lavoro ha l’obiettivo di analizzare l’applicazione dei principi dell’Economia Circolare nel settore dell’illuminazione pubblica a livello nazionale.

Dopo una breve introduzione volta a chiarire cosa sia l’illuminazione pubblica e come venga gestita in Italia, il secondo capitolo è dedicato all’esposizione dei principali concetti di Economia Circolare, sia in termini generali che adattati specificamente al contesto dell’illuminazione pubblica, ambito di analisi della tesi.

Il terzo capitolo si concentra sul quadro normativo di riferimento, descrivendo i Criteri Ambientali Minimi (CAM) e le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD). Tali strumenti forniscono indicazioni per la progettazione e l’acquisto di prodotti secondo criteri circolari.

Nel capitolo riguardante i casi studio si vuole evidenziare e analizzare lo stato dell’arte dell’economia circolare per quanto riguarda i progetti di illuminazione pubblica, mettendo in mostra gli aspetti positivi e le eventuali mancanze. Vengono inseriti due casi studio in ambito Nazionale, progetti di riqualificazione urbana, e due Olandesi, gare pubbliche per l’aggiudicazione degli appalti per l’illuminazione. Infine, viene presentato il caso studio di una guida pubblicata per fornire indicazioni e suggerimenti al fine di migliorare la circolarità dell’illuminazione pubblica olandese.

L’ultimo capitolo è dedicato alla presentazione di una proposta personale: una guida per l’applicazione dell’economia circolare all’illuminazione pubblica italiana. La guida si articola in una serie di proposte operative finalizzate a incrementare la circolarità degli impianti in tutte le fasi del loro ciclo di vita, dalla progettazione, alla gestione e manutenzione, fino alla dismissione.

Il tema centrale della tesi riguarda quindi l’applicazione dei principi dell’economia circolare al settore dell’illuminazione pubblica in Italia, con un focus principale sugli aspetti legati ai componenti degli impianti e ai materiali impiegati per la loro realizzazione.

1.2 PREMESSA: L'ILLUMINAZIONE PUBBLICA IN ITALIA

L'illuminazione urbana è un servizio di pubblica utilità e infrastruttura essenziale per ogni città d'Italia. Su tutto il territorio nazionale si stimano circa 10 milioni di punti luce, 1 ogni 6 abitanti in media¹, e si stima che il costo annuale per questo servizio nel 2019 sia stato pari a 1.8 miliardi, cioè 30.5 euro pro capite². L'impatto del servizio è sicuramente molto alto in termini economici ed energetici.

La prima rilevante trasformazione verso un modello circolare nel settore dell'illuminazione pubblica è rappresentata dall'introduzione della tecnologia a LED, adottata in maniera sistematica a partire dal 2017. Tale innovazione ha avuto come obiettivo principale la riduzione dei consumi energetici associati ai punti luce. Questa fase di transizione è tuttora in corso e ha già prodotto risultati significativi in termini di risparmio energetico e ottimizzazione della spesa per l'energia elettrica.

Una volta migliorati i consumi e, di conseguenza il risparmio energetico, il passo successivo della ricerca dovrà concentrarsi verso una maggior attenzione ai materiali impiegati al fine di ridurre sempre più le risorse utilizzate.

Inoltre, va evidenziata la specificità del contesto italiano, caratterizzato da una marcata eterogeneità nella gestione degli impianti di illuminazione pubblica. Le differenze si manifestano sia su scala regionale che provinciale, in quanto la responsabilità della gestione ricade sui singoli Comuni. Questi ultimi possono scegliere se aderire o meno al sistema Consip³, approvare o respingere i progetti esecutivi proposti e determinare autonomamente l'allocazione delle risorse economiche destinate a tale servizio. Successivamente verrà analizzato nel dettaglio il ruolo di questo ente nel capitolo dedicato agli stakeholder principali del servizio di illuminazione pubblica.

Occorre infine considerare che le concessioni per la gestione degli impianti possono avere una durata variabile, generalmente compresa tra i 5 e i 15 anni. Questo elemento introduce una potenziale discrepanza temporale tra l'evoluzione normativa e tecnologica e la durata effettiva dei contratti in essere, rendendo possibile un disallineamento rispetto alle soluzioni più aggiornate disponibili sul mercato.

¹ EDISON NEXT, "Illuminazione pubblica: i benefici del LED", 10 gen. 2024, <https://www.edisonnext.it/next-journal/illuminazione-pubblica-i-benefici-del-led/>

² A cura di Osservatorio CPI, autori: Diego Bonata, Fabio Falchi, Luca Favero, Emma Rosenfeld, Alejandro Sanchez, "LED: una soluzione per l'illuminazione pubblica in Italia?", 18 giu. 2022, https://osservatoriocpi.unicatt.it/ocpi-pubblicazioni-led-una-soluzione-per-l-illuminazione-pubblica-in-italia?utm_source=chatgpt.com#_ftn2

³ CONSIP S.p.A. (Concessionaria Servizi Informativi Pubblici) è la società del Ministero dell'Economia e delle Finanze che ha il compito di ottimizzare la spesa pubblica attraverso strumenti di acquisto innovativi e trasparenti, favorendo efficienza, risparmio e legalità nelle forniture pubbliche. Fonte: <http://www.consip.it>

2 TRANSIZIONE DA UN MODELLO ECONOMICO LINEARE A UN MODELLO CIRCOLARE NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA

2.1 DAL MODELLO LINEARE A QUELLO CIRCOLARE: UNA SCELTA OBBLIGATA.

Il consumo e l'uso di risorse naturali per la maggior parte negli ultimi 150 anni hanno seguito il modello lineare. I materiali vengono ricavati, lavorati, utilizzati ed infine gettati come rifiuti. Noto anche come modello “*take-make-dispose*” segue un'economia industriale, di mercato, con materie prime sempre nuove e con l'obiettivo del consumismo di massa. Questo ha prodotto effetti negativi sull'ambiente, dall'aumento costante del volume di rifiuti all'insostenibile livello di estrazione di acqua. Inoltre, molte lavorazioni incidono sull'inquinamento dell'aria e dell'atmosfera, con l'aumento di inquinanti volatili e con le variazioni di temperature. L'idea di poter possedere risorse naturali infinite è un modello che è giunto al termine.

Il modello dell'economia circolare offre la possibilità di iniziare questa trasformazione di cui il mondo necessita. Il punto focale di questo sistema consiste nel progettare prodotti e sistemi con una maggiore durabilità e con la possibilità di essere facilmente riparati, riutilizzati e smontati per il riciclo. Occorre dunque sfruttare al massimo ogni materiale utilizzato, cercare di allungare il ciclo di utilizzo dei manufatti per ridurre sprechi e rifiuti difficilmente smaltibili. Utilizzando un sistema circolare è possibile ricavare valore dagli scarti, proprio come fa il nostro pianeta in processi ciclici mai fini a sé stessi.

Il concetto di economia circolare viene descritto molto bene da Bompan e Brambilla ⁴(2016, pp.17-18):

“un universo produttivo in cui la materia assume forme che di volta in volta appaiono oggetti fini a sé stessi, distanti da ogni altra configurazione, ma che finiscono sempre per trasmutarsi, per assumere nuove sembianze. In un flusso continuo che sposta il valore dall'essere al divenire, perché una parte del bene resta sempre in circolo e chi lo usa si limita ad affittare una quota del tempo e del lavoro che servono ad alimentare la catena della sua esistenza. [...] una sorta di reincarnazione perpetua. [...] in altri casi ancora la circolarità consiste nell'uso comune di quei beni”.

⁴ Emanuele Bompan, Nicoletta Brambilla, “Che cosa è l'economia circolare”, Milano: Edizioni Ambiente, 2016.

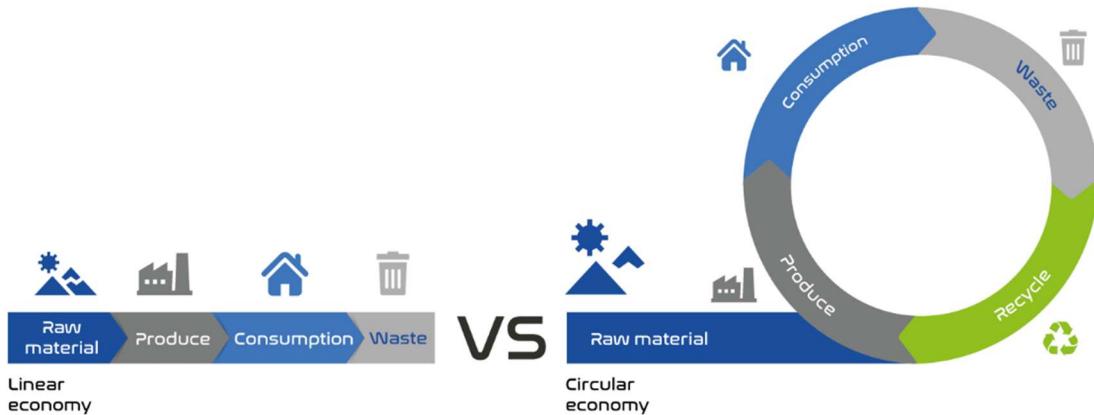


Figura 1 Schema di confronto tra modello lineare e modello circolare. Immagine di ATRIA INNOVATION, fonte: atriainnovation.com

2.1.1 CONCETTI E MODELLI NELL'ECONOMIA CIRCOLARE.

Nel diagramma che segue si intersecano i flussi continui dei cicli tecnici e biologici dei materiali. Viene rappresentata in forma schematica una serie di processi fondamentali per comprendere le molteplici attività che alimentano il paradigma dell'economia circolare. Il sistema si fonda contemporaneamente sui cicli interni e sulla catena a cascata. I primi sono finalizzati a minimizzare l'utilizzo di materiali rispetto a un modello lineare: quanto più il ciclo è ristretto, tanto più il riutilizzo di materiali ed energia risulta efficiente; un numero maggiore di cicli consecutivi corrisponde invece a un'estensione del processo di riuso e riciclo. La logica a cascata, invece, prevede la diversificazione degli usi di un materiale lungo la catena del valore. Per esempio, il legno utilizzato in edilizia può successivamente essere convertito in biocarburante, mentre i metalli strutturali come l'acciaio, grazie alla loro durabilità, possono essere reintegrati nel settore metallurgico.⁵

È inoltre opportuno ampliare il concetto di riciclo, includendo non solo il recupero dei materiali per la realizzazione dello stesso prodotto, ma anche la loro riconversione in nuove applicazioni. In tal senso si distinguono due modalità principali: il downcycling, in cui il processo comporta una riduzione della qualità del materiale, e l'upcycling, in cui invece le proprietà vengono migliorate o valorizzate in contesti differenti.

Nel settore dell'illuminazione pubblica, l'introduzione dei principi dell'economia circolare rappresenta una sfida particolarmente complessa e graduale, poiché implica un profondo cambiamento di paradigma rispetto al modello tradizionale fondato esclusivamente sulle prestazioni energetiche e illuminotecniche degli impianti. È necessario passare da un approccio focalizzato sulla progettazione e realizzazione dell'opera a una visione più ampia

⁵ GXN Innovation, 3XN Architects, MT Højgaard, VIA Byggeri, Kingo Karlsen, Vugge til Vugge Danmark, henrik•innovation (2019), "Building a circular future", Danimarca, KLS PurePrint.

che includa l'intero ciclo di vita dell'infrastruttura: dalla manutenzione fino alla dismissione e al recupero dei componenti. In tale contesto, il modello economico deve evolversi, integrando nel calcolo dei costi non solo l'installazione, ma anche i risparmi generati dalla manutenzione efficiente, e i potenziali ricavi derivanti dal riutilizzo, riciclo o rivendita dei materiali a fine vita. Questo approccio permette di offrire soluzioni economicamente più sostenibili e potenzialmente più vantaggiose anche per gli enti pubblici, spostando l'attenzione dal solo costo iniziale al valore generato nel tempo.

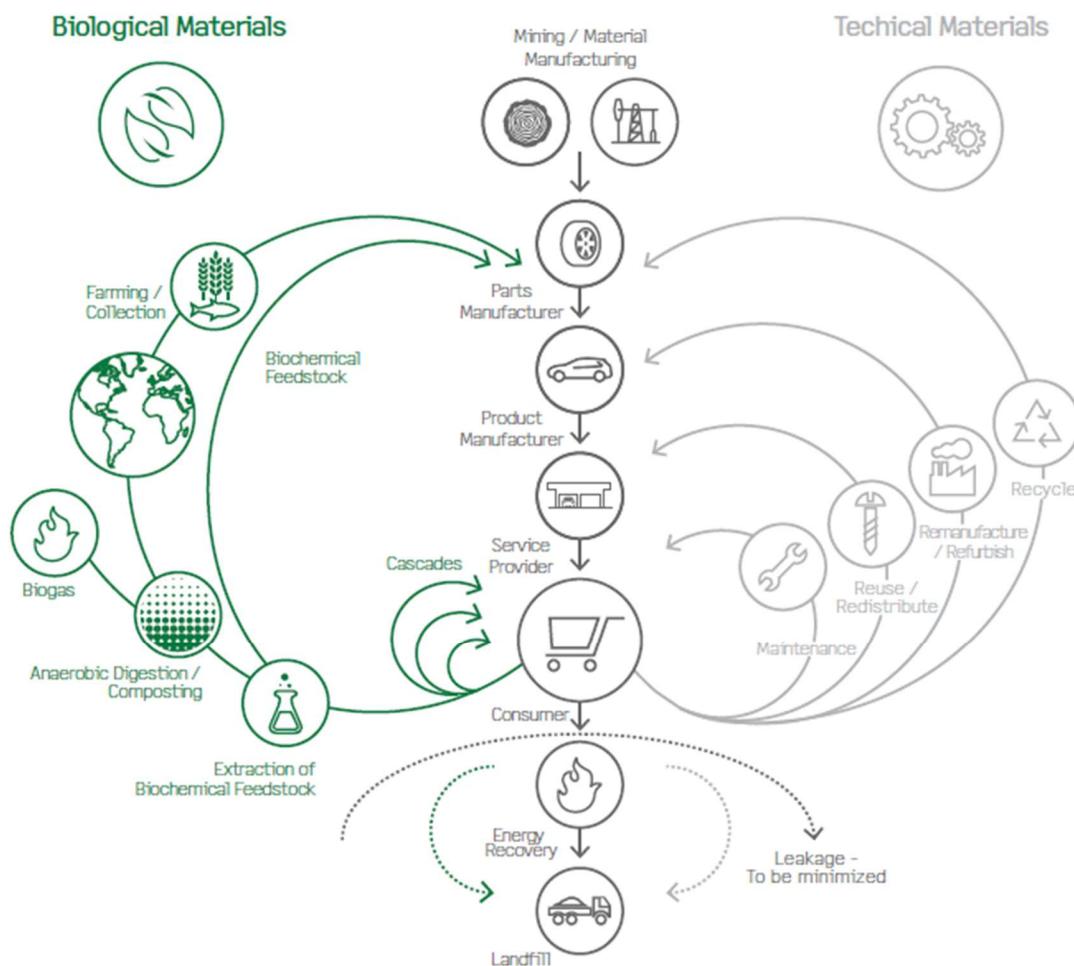


Figura 2 Schema del ciclo di vita dei materiali biologici e tecnici. Fonte: "Building a Circular Economy", pag. 179

2.1.2 CINQUE MODELLI DI BUSINESS CIRCOLARI ADATTATI AL MONDO DELLA PUBBLICA ILLUMINAZIONE.

Il modello circolare si basa sul concetto economico di ottimizzazione dei processi e dei guadagni, riduzione degli sprechi e riutilizzo delle risorse. Ci sono poi diversi modelli di business che vengono utilizzati in questo ambito, spesso mescolati tra loro, soprattutto quando vengono calati nei contesti di produzione reali.

In particolare, sono interessanti i cinque modelli suggeriti da Peter Lacy e Jakob Rutqvist⁶, di seguito analizzati e applicati al settore dell'illuminazione pubblica tramite situazioni e casistiche che possono rappresentare come esempio il modello proposto.

1. Filiera di produzione circolare.

Il concetto principale dietro a questo modello suggerisce un cambiamento alla base della filiera produttiva, la scelta delle materie prime diventa fondamentale. Il passaggio da risorse distruttive e non sostenibili ad altre completamente rinnovabili, riutilizzabili e biodegradabili facilmente deve essere alla base delle nuove produzioni. La qualità dei prodotti deve poi garantire la possibilità di usarli in diversi cicli di vita per ridurre costi e i flussi di rifiuti.

Nell'ambito degli impianti di illuminazione pubblica si possono valutare ad esempio la sostituzione delle guaine in poliolefina, polimero derivato dal petrolio o gas naturale, con altre realizzate in materiali circolari.

Oppure sostituire, laddove è possibile, i plinti in calcestruzzo non riciclabile con fondazioni a vite in acciaio, riutilizzabile al 100%.

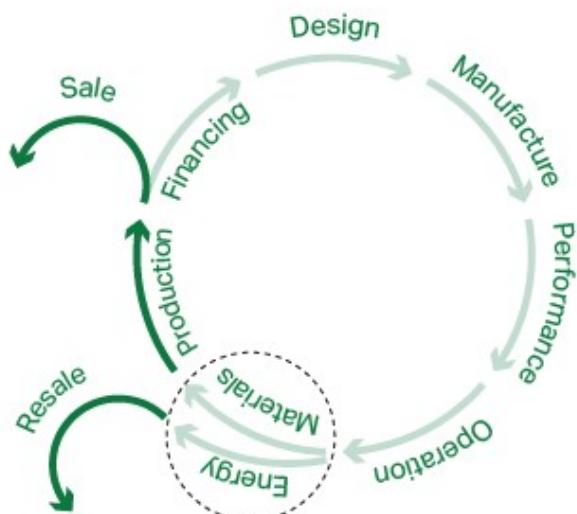


Figura 3 Schema filiera di produzione circolare. Fonte: "Building a Circular Economy", pag. Introduction XXI

⁶ Peter Lacy, Jacob Rutqvist, "Waste to Wealth", Palgrave Macmillan, 2015

2. Recupero e riciclo.

Questo modello enfatizza lo sfruttamento di prodotti alla fine della loro vita, per poterli riutilizzare in un modo differente. Il recupero e il riciclo non si basano solamente sulle materie prima, ma anche sull'energia necessaria per i vari processi produttivi. Si tratta di un sistema che aiuta a diminuire i costi di costruzione e spesso dei costi gestionali. All'interno dei sistemi di illuminazione questo concetto può essere applicato per quanto riguarda il fine vita di alcuni componenti: i sostegni in ferro verniciato e acciaio zincato possono essere riciclati completamente e alcuni componenti

elettrici buoni di apparecchi non funzionanti sono riutilizzabili per ripararne altri.

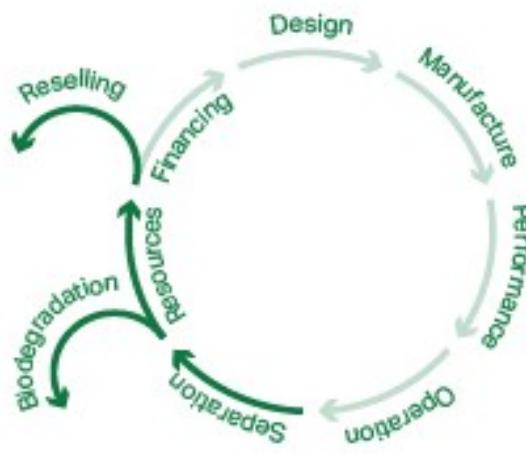


Figura 4 Schema recupero e riciclo. Fonte: "Building a Circular Economy", pag. Introduction XXII

3. Estensione del ciclo di vita del prodotto

Estendere il ciclo di vita di un prodotto e valutare i benefici di tale azione sono alla base di questo modello di business. Se lo si applica all'illuminazione pubblica bisogna tenere in considerazione l'importanza della manutenzione ordinaria su tutti i componenti del sistema punto luce, a partire dalla corretta protezione alla base del palo, fino alla corretta gestione elettrica dell'apparecchio. Si possono poi considerare diverse forme di prevenzione verso eventuali guasti elettrici causati da eventi atmosferici che portano alla rottura degli apparecchi, tra queste quella di dimensionare correttamente gli interruttori magnetotermici all'interno dei quadri di comando, oppure si possono installare dei "rompi tratta" per sezionare gli impianti.

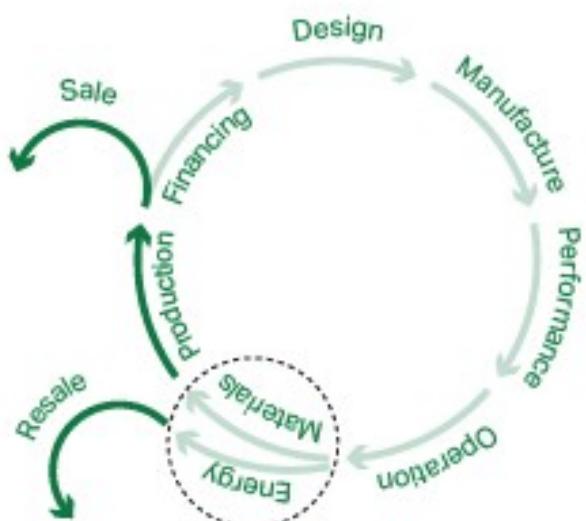


Figura 5 Schema estensione del ciclo vita del prodotto. Fonte: "Building a Circular Economy", pag. Introduction XXII

4. Piattaforme di sharing

Sebbene sia un aspetto poco comune, anche questo modello trova applicazione nell'illuminazione pubblica attraverso forme di cooperazione intercomunale o tra enti e basi dati condivise per l'ottimizzazione degli impianti. È conveniente utilizzare magazzini comuni a più enti per stoccare il materiale necessario alla manutenzione, è possibile noleggiare apparecchi di illuminazione in maniera temporanea e anche condividere servizi e piattaforme utili alla gestione dell'illuminazione. Ad esempio, spesso molti Comuni dividono la quota di servizio delle piattaforme online per la gestione delle

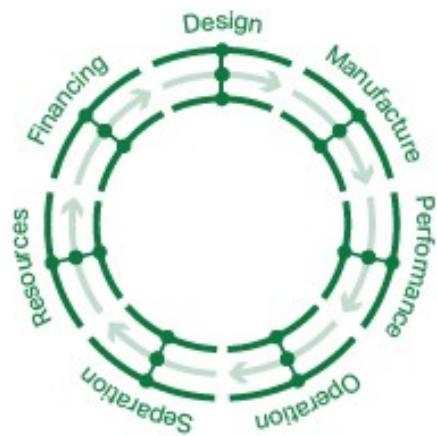


Figura 6 Schema piattaforme di sharing. Fonte: "Building a Circular Economy", pag. Introduction XXIII

segnalazioni dei guasti (Hyperlux ad esempio).

5. Prodotti come servizi a pagamento

Questo modello è sicuramente basato su quello precedente di condivisione, si tratta di considerare un prodotto, un edificio o parte specifica di esso come un servizio a pagamento. Non sempre, infatti, è economicamente vantaggioso acquistare completamente un bene o addirittura un edificio, in molti casi conviene infatti pagarne per il tempo di utilizzo in una sorta di noleggio a medio-lungo termine.

Per quanto riguarda le concessioni di pubblica illuminazione questo concetto viene applicato su larga scala. I proprietari degli impianti, in questo caso i Comuni, concedono in gestione il loro perimetro per tutta la durata del contratto pagando un canone annuale. Il concessionario è così responsabile della manutenzione, gestione e fornitura elettrica di tutti i punti luce. Dal punto di vista delle amministrazioni comunali questa è una

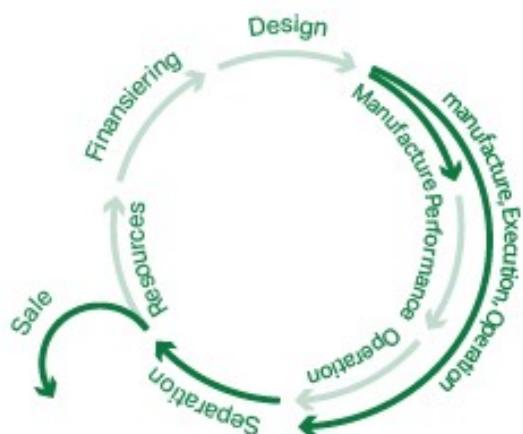


Figura 7 Prodotti come servizi a pagamento. Fonte: "Building a Circular Economy", pag. Introduction XXIII

scelta positiva in termini di circolarità perché per adempiere a tutti i fabbisogni avrebbero bisogno di uffici tecnici dedicati, personale qualificato e mezzi di lavoro e attrezzature specifici. Il costo di queste necessità sarebbe molto alto e difficile da gestire, inoltre con un solo Comune da seguire sarebbero sprecate e non utilizzate per gran parte del tempo.

2.1.3 PARADIGMA DELLE R

Il paradigma delle R è un concetto fondamentale dell'economia circolare perché definisce le azioni guida per raggiungere gli obiettivi di circolarità. La maggior parte delle indicazioni circolari si basa su un primo modello detto delle 3R (Ridurre, Riutilizzare e Riciclare), successivamente è stato aggiunto il concetto di Riparazione nel modello 4R. Infine, all'interno dell'articolo *"Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions"*⁷ si fa riferimento ad un modello esteso e più completo, quello delle 9R.

Di seguito il modello completo che verrà utilizzato all'interno della proposta di linea guida fatta in questa tesi:

Obiettivo	Strategia	Definizione
Fabbricare e utilizzare il prodotto in maniera più intelligente	R0 Rifiutare R1 Ripensare	Rendere il prodotto superfluo abbandonando la sua funzione o offrendo la stessa funzione con un prodotto radicalmente diverso Fare uso intensivo di un prodotto (es: condivisione)
Estendere la vita del prodotto e delle sue parti	R2 Ridurre R3 Riuso R4 Riparare R5 Rinnovare R6 Rifabbricare R7 Riqualificare	Aumentare l'efficienza nella produzione o uso dei prodotti riducendo l'uso di risorse naturali o materiali Riuso di un prodotto scartato ancora in buone condizioni e che svolge la sua funzione originale parte di un nuovo consumatore Riparazione e manutenzione di un prodotto malfunzionante così da poterlo utilizzare nella sua funzione originale Ripristinare un vecchio prodotto e aggiornarlo Usare prodotti scartati o sue parti in un nuovo prodotto con stessa funzione Usare prodotti scartati o sue parti in un nuovo prodotto con una funzione diversa
Applicazione utile dei materiali	R8 Riciclo R9 Recupero	Processare i materiali per ricavarne la stessa qualità o più bassa Recupero di energia tramite incenerimento dei materiali

⁷ Julian Kirchherr, Denise Reike, Marko Hekkert, *"Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions"*, Elsevier, 2017, pp. 223-224.

2.2 GLI STAKEHOLDER COINVOLTI NELLA TRANSIZIONE

Il servizio di illuminazione pubblica viene frammentato tra due principali stakeholder: il Comune (amministrazioni) proprietario degli impianti e l'azienda incaricata della gestione di tali impianti (*E.S.Co*⁸).

La descrizione dei due stakeholder che segue è sviluppata in coerenza con il tema di questa tesi, l'economia circolare, e si focalizza sugli aspetti che influiscono maggiormente su questo paradigma. Le informazioni e le dinamiche analizzate derivano dall'esperienza professionale diretta maturata dall'autore della tesi nel ruolo di responsabile dei progetti e della gestione degli impianti di pubblica illuminazione, svolto all'interno di uno studio tecnico privato. Tale esperienza è stata acquisita attraverso la conduzione operativa di commesse affidate da entrambi gli stakeholder considerati.

2.2.1 LE AMMINISTRAZIONI

Il primo protagonista dell'illuminazione pubblica è sicuramente il Comune, proprietario degli impianti (anche chiamato “concedente” nei contratti di appalto). Il ruolo del Comune è quello di affidare in concessione gli impianti ad una *E.S.Co* e di controllarne l'operato per tutta la durata del contratto. La scelta della concessione può avvenire tramite una gara pubblica indetta dal concedente stesso oppure tramite l'adesione al servizio ministeriale Consip⁹. Nel primo caso viene ingaggiato un promotore che presenta per primo un *Project financing* da pubblicare come base di gara, successivamente viene approvato dal comune e tutti gli altri concorrenti possono partecipare. In base al punteggio definitivo verrà scelto il concessionario degli impianti di pubblica illuminazione. Nel caso di arrivo a pari punti sarà il promotore ad aggiudicarsi la commessa.

Nel caso in cui l'amministrazione aderisse al servizio Consip, l'unica proposta di progetto arriverebbe dalla *E.S.Co* aggiudicataria del lotto regionale nel quale il comune si trova. A questo punto la valutazione arriva direttamente dall'ufficio tecnico del comune che può accettare o rifiutare la proposta, cominciando o meno la concessione.

Le amministrazioni comunali, nella maggior parte dei casi, non si configurano come stakeholder ideali per quanto concerne l'adozione di politiche ambientali e strategie

⁸ Una Energy Service Company (*E.S.Co*) è un'azienda specializzata nella fornitura di servizi energetici, in grado di offrire soluzioni per l'efficienza energetica e la gestione dei consumi energetici. Le ESCO (delle quali è contenuta una definizione nel D.lgs. 115/08) sono impegnate a fornire servizi energetici in modo efficiente, sostenibile ed economicamente vantaggioso per i loro clienti

⁹ Consip è la centrale di acquisto nazionale - interamente partecipata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze (MEF) - che offre, attraverso gare e mercati digitali, soluzioni di e-procurement per gli acquisti delle amministrazioni pubbliche. Fonte: <https://www.consip.it/chisiamo/azienda/profilo#:~:text=Consip%20%C3%A8%20la%20centrale%20di,gli%20acquisti%20delle%20amministrazioni%20pubbliche.>

improntate all'economia circolare. Tale limite è riconducibile, in larga misura, alla discrepanza tra l'orizzonte temporale richiesto da una pianificazione sostenibile e le tempistiche decisionali ed economiche che caratterizzano l'azione politico-amministrativa a livello locale. La carica di un sindaco e della relativa giunta ha, infatti, una durata massima limitata a due mandati consecutivi, un arco temporale che risulta frequentemente inferiore alla durata tipica delle concessioni in materia di servizi pubblici, come quello dell'illuminazione. Questo squilibrio temporale induce spesso le amministrazioni a privilegiare interventi volti alla risoluzione immediata di criticità manifeste, piuttosto che intraprendere percorsi di progettazione orientati al lungo periodo e alla sostenibilità ambientale.

A tale criticità si aggiunge il vincolo economico, che agisce in sinergia con quello temporale. Le esigenze legate al rispetto dei bilanci comunali portano frequentemente a prediligere soluzioni economicamente vantaggiose nell'immediato, ma non necessariamente sostenibili o durature nel tempo. Questo approccio rischia di compromettere l'efficacia di scelte che, per essere realmente efficienti e sostenibili, richiederebbero un investimento strategico su scala pluriennale.

La tendenza delle amministrazioni è quella di prediligere modelli economici lineari in cui viene risolto subito un problema, si migliora uno specifico servizio e si punta al risparmio energetico (e quindi economico) senza programmare un futuro in cui, molto probabilmente, non saranno più presenti a causa della naturale alternanza amministrativa prevista per legge.

2.2.2 E.S.CO

Il ruolo più articolato è sicuramente quello delle aziende che prendono in concessione gli impianti di illuminazione pubblica perché devono suddividere ulteriormente il loro compito tra diversi altri stakeholder. La piramide che si va a formare può essere così definita:

- I dirigenti della società
- I progettisti
- I fornitori (energia, servizi, materiali)
- I manutentori

Le aziende incaricate della gestione dei servizi di illuminazione pubblica si trovano frequentemente a dover mediare tra tre differenti livelli di indirizzo, spesso tra loro non perfettamente allineati. Da un lato, vi sono le specifiche richieste formalizzate nel contratto di concessione stipulato con l'amministrazione comunale; dall'altro, le direttive nazionali contenute nei bandi Consip o nei Criteri Ambientali Minimi (CAM) definiti dal Ministero dell'Ambiente; infine, le politiche aziendali interne, che possono riflettere strategie di sostenibilità, obiettivi di innovazione tecnologica o scelte economiche autonome. Questi tre ambiti regolatori tendono frequentemente a entrare in conflitto tra loro, rendendo nella pratica estremamente complesso, se non impossibile, il pieno soddisfacimento simultaneo di tutte le istanze. Di conseguenza, le aziende sono spesso costrette ad adottare soluzioni di compromesso, volte a garantire la continuità del progetto pur nel rispetto di una cornice normativa e contrattuale articolata e, talvolta, contraddittoria.

Di seguito i fattori che influiscono nelle scelte progettuali per la concessione degli impianti di pubblica illuminazione:

- **Fattore economico:** il capitale che deve essere investito da parte della E.S.Co viene definito in fase di progettazione e approvato dalle amministrazioni prima di firmare la concessione, successivamente verrà "rimborsato" tramite canoni annuali. Lo scopo della maggior parte dei comuni è quello di ottenere il servizio nel minor tempo possibile e al minor costo possibile, in modo da destinare ad altro parte del budget. Per le amministrazioni l'importante è il risparmio energetico e il corretto funzionamento degli impianti per soddisfare i cittadini. Allo stesso modo anche il bando Consip si basa sul principio di miglior offerta per servizio e anche in questo caso si cerca di raggiungere un obiettivo a breve termine (efficientamento degli impianti, gestione e manutenzione) cercando di spendere il meno possibile. Per quanto riguarda il concessionario, le aziende, il concetto di minor spesa è sicuramente interessante, ma non sempre un minor investimento iniziale significa poi risparmiare per tutta la durata della concessione. Ad esempio, la scelta delle forniture solamente in base al costo iniziale non sempre risulta quella vincente, ci si rende conto che i costi risultano molto più alti e non si ottengono nemmeno risultati a livello ambientale adeguati. Le aziende

cercano di risolvere questa situazione adoperando il *TCO* (*Total Cost of Ownership*)¹⁰, ma le tempistiche e le necessità non sempre permettono di effettuare la scelta corretta.

- **Fattore ambientale:** collegandoci a quanto detto in precedenza, le scelte vengono spesso fatte per risolvere problemi o sviluppare progetti nel breve periodo, questo non concilia con una visione maggiormente circolare dell'illuminazione pubblica, che per i suoi principi si sviluppa nel lungo periodo e cerca addirittura di allungare il più possibile il ciclo vita delle cose. Inoltre, i materiali e i prodotti coinvolti in questo sistema hanno spesso durate più lunghe rispetto ai tempi delle concessioni, pertanto spesso si tende a nascondere un problema (es. smaltimento rifiuti) perché successivo alla fine di un mandato (amministrazioni) o di un bilancio (aziende). Le E.S.Co che adottano l'economia circolare come politica aziendale devono andare incontro a difficoltà di interazione con le amministrazioni che riguardano le tempistiche di progetto e d'intervento, di volontà e di maggior sforzo economico iniziale come detto in precedenza. Per risolvere questa situazione, che a parte alcuni casi virtuosi si verifica regolarmente, servirebbe una normativa forte da parte delle istituzioni per regolamentare e condizionare le scelte verso un modello più sostenibile.
- **Fattore gestionale:** nelle specifiche tecniche dei contratti di concessione vengono imposti dei tempi di intervento prestabiliti, in base alla criticità della situazione, per quanto riguarda guasti, danni e malfunzionamenti. La gestione degli interventi viene suddivisa tra l'ufficio tecnico del concessionario, l'ufficio tecnico del comune e la ditta appaltatrice dei lavori di manutenzione. Anche in questo caso le diverse priorità dei vari interlocutori porta a scelte non sostenibili, quali ad esempio sostituzione di componenti che potrebbero essere riparate per risparmiare tempo e garantire il ripristino del servizio appena possibile. In questa parte della gestione degli impianti di illuminazione pubblica è importante sottolineare l'importanza degli uffici tecnici che devono essere a conoscenza di tutti i punti luce in gestione in maniera molto precisa per poter individuare con facilità eventuali guasti e interventi da realizzare.

¹⁰ Il Total Cost Ownership (TCO) indica la somma complessiva di tutti i costi legati al possedimento e al funzionamento di un prodotto o sistema per tutto il suo ciclo di vita. Oltre al prezzo di acquisto iniziale andranno considerati altri fattori, quali: installazione, consumo energetico, manutenzione ordinaria, manutenzione straordinaria e smaltimento.

3 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

3.1 CRITERI AMBIENTALI MINIMI (CAM)

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) sono i requisiti ambientali definiti per le varie fasi del processo di acquisto, volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore sotto il profilo ambientale, lungo il ciclo di vita.

Il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica adotta con decreto i CAM nell'ambito di quanto definito dal Piano per la sostenibilità ambientale dei consumi del settore della pubblica amministrazione. La loro applicazione su tutto il territorio italiano permette da un lato un controllo totale su tutto ciò che riguarda le opere pubbliche, dall'altro indirizza il mercato degli operatori privati ad adeguarsi a queste regole alle nuove tecnologie ambientali e ai prodotti ambientalmente migliori.

I CAM vengono definiti dal *Comitato di Gestione del GPP (Green Public Procurement)*, attraverso la consulenza di gruppi di lavoro tecnici, di enti di ricerca, delle università, delle centrali di committenza e delle associazioni di categoria degli operatori economici del settore di riferimento.

L'efficacia dei CAM è garantita dall'*art. 18 della L. 221/2015* e, successivamente, all'*art. 34 recante "Criteri di sostenibilità energetica e ambientale"* del *D.Lgs. 50/2016 "Codice degli appalti"* (*modificato dal D.Lgs 56/2017*), che hanno reso l'applicazione dei criteri obbligatoria da parte di tutte le stazioni appaltanti. Recentemente, nel 2023, questo dettato normativo è stato confermato con l'*art. 57 comma 2 del decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36*, che specifica l'applicazione delle "specifiche tecniche" e delle "clausole contrattuali" contenute nei criteri ambientali minimi per l'intero valore dell'importo della gara.¹¹

¹¹ GPP, "Che cosa sono i CAM", fonte: <https://gpp.mase.gov.it/Cosa-sono-i-CAM>

3.1.1 OBIETTIVI E CAMPI DI APPLICAZIONE DEI CAM

Durante la definizione dei CAM, il PAN GPP (Piano d'Azione Nazionale GPP), vengono messi sul campo gli obiettivi minimi da raggiungere rispetto a tre diversi ambiti: l'amministrazione pubblica, le imprese e l'ambiente.¹²

- L'amministrazione pubblica attraverso i CAM guadagnerà: un miglioramento dell'immagine in quanto segue le politiche ambientali necessarie ad uno sviluppo davvero sostenibile del pianeta, una maggiore competenza tecnico-ambientale per gli acquirenti pubblici, la miglior gestione delle risorse economiche tramite modelli circolari volti alla riduzione degli sprechi e le integrazioni delle politiche ambientali di diversi ambiti di rilievo nazionale soggetti ad opere pubbliche.
- Le imprese adeguandosi ai CAM potranno migliorare la loro offerta di prodotti ed essere più competitivi nel mercato nazionale e non, saranno stimolate all'innovazione tecnologia per restare al passo con le norme vigenti e verrà tutelata la loro competitività in un circuito regolato dai Ministeri.
- Gli obiettivi principali dei CAM verso l'ambiente sono: la riduzione dell'impatto ambientale per colpa di prodotti non adeguati e non attenti al rispetto ecologico e, di conseguenza, la diffusione di modelli di acquisto e consumo circolari.

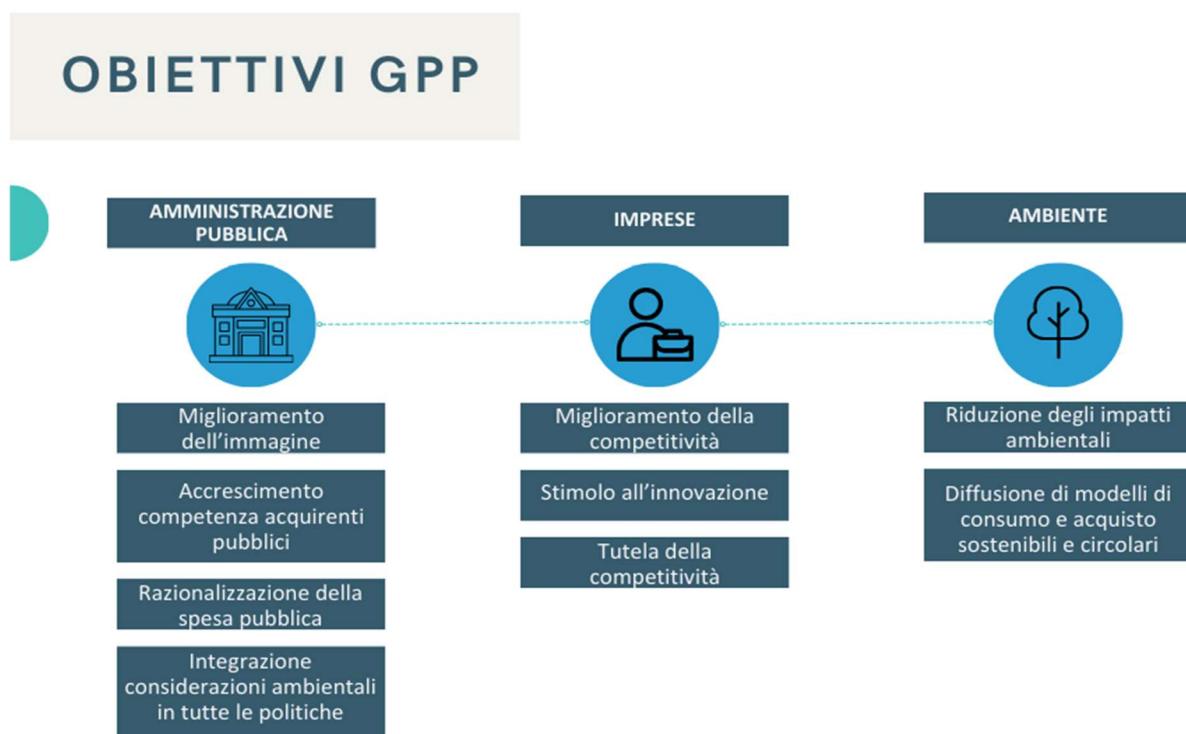


Figura 8 Obiettivi GPP: amministrazione pubblica, imprese, ambiente. Fonte: Arnaudo Andrea

¹² Maria Niccoli, "I Criteri Ambientali Minimi (CAM) 2020 negli Appalti Pubblici: cosa sono e a cosa servono", fonte: <https://www.ingenio-web.it/articoli/i-criteri-ambientali-minimi-cam-negli-appalti-pubblici-cosa-sono-e-a-cosa-servono/>

Al fine di comprendere meglio la natura generale dei CAM. Di seguito l'elenco dei criteri in vigore per i servizi\prodotti:

- Arredi per interni
- Arredo urbano
- Ausili per l'incontinenza
- Calzature da lavoro e accessori in pelle
- Carta
- Cartucce
- Edilizia
- Eventi culturali
- Illuminazione pubblica (fornitura e progettazione)
- Illuminazione pubblica (servizio)
- Lavaggio industriale e noleggio di tessili e materasseria
- Pulizie e sanificazione
- Rifiuti urbani e spazzamento stradale
- Ristorazione collettiva
- Ristoro e distributori automatici
- Servizi energetici per gli edifici
- Stampanti
- Tessili
- Veicoli
- Verde pubblico

Ogni categoria è caratterizzata da un suo decreto ministeriale che ne sancisce la data di inizio e tutte le indicazioni necessarie. Ogni qualvolta una sezione viene aggiornata sarà valida la nuova data di pubblicazione con le nuove linee guida. L'ultima revisione dei CAM è significativa perché tratta l'attuazione della Strategia nazionale per l'economia circolare per l'anno 2023. All'interno del *decreto direttoriale 31 marzo 2023 n.15* viene specificato quali categorie di CAM verranno revisionati e aggiornati secondo i nuovi criteri ambientali.

I criteri ambientali minimi dedicati all'illuminazione pubblica vengono divisi in due documenti diversi: uno riguarda le specifiche per l'acquisizione di apparecchi e sorgenti luminose per illuminazione pubblica e la progettazione di impianti per illuminazione pubblica, l'altro fornisce le linee guida ambientali per il servizio di illuminazione pubblica. Nonostante i due diversi ambiti dell'illuminazione pubblica i documenti vengono redatti su un modello simile contenente: la premessa normativa e metodologica di redazione del documento, l'oggetto dell'appalto, i criteri di selezione dei candidati, le specifiche tecniche, i criteri base obbligatori, i criteri premianti e le clausole contrattuali.

I due documenti spaziano nel vasto ambito dell'illuminazione pubblica toccando diversi argomenti, data la ricerca di questa tesi nei prossimi paragrafi verranno analizzati entrambi sulla base delle indicazioni di economia circolare che propongono.

3.1.2 CAM PER L'ACQUISIZIONE DI APPARECCHI E SORGENTI LUMINOSE PER ILLUMINAZIONE PUBBLICA E LA PROGETTAZIONE DI IMPIANTI PER ILLUMINAZIONE PUBBLICA

Il documento è stato pubblicato per la prima volta in Gazzetta Ufficiale n.18 il 23 gennaio 2014 come aggiornamento dei CAM adottati con *DM del 23 dicembre 2013*, e successivamente è stato aggiornato il 18 ottobre 2017. Il testo definisce i criteri ambientali minimi che, ai sensi del *D.lgs. 50/2016¹³*, le Amministrazioni pubbliche devono seguire durante le procedure di acquisto di:

- Sorgenti di illuminazione per illuminazione pubblica,
- Apparecchi d'illuminazione per illuminazione pubblica,
- Servizi di progettazione di impianti per illuminazione pubblica.

Vengono esclusi dalle indicazioni le seguenti voci:

- Pali, strutture di sostegno ed ogni altro tipo di supporto degli apparecchi di illuminazione,
- Illuminazione di: gallerie, parcheggi privati ad uso privato, aree private a uso commerciale o industriale, campi sportivi, monumenti, edifici, alberi, ecc. (illuminazione artistica).

All'interno della sezione 3.3 *LINEE GUIDA PER L'ACQUISTO | AFFIDAMENTO* vengono analizzati i criteri di scelta delle forniture per soddisfare i fabbisogni di comfort luminoso e sicurezza per i cittadini. L'amministrazione deve valutare, nello specifico, quali sono le migliori tecnologie che, a parità di prestazioni energetiche, garantiscono minori costi di gestione e manutenzione. A questo scopo vengono citate le analisi TCO (Total Cost Ownership)¹⁴ e la LLC (Life Cycle Costing)¹⁵ da utilizzare sia nel caso di realizzazione di un nuovo impianto sia per la progettazione di sostituzione di apparecchi esistenti. Viene espressamente richiesto di allegare una analisi TCO (o LCC) per l'impianto soggetto a progettazione per un periodo di riferimento di almeno 20 anni. La scelta delle forniture deve garantire il massimo risparmio energetico, indicato come il costo ambientale più alto durante il ciclo vita di una lampada, il comfort luminoso e i necessari livelli di sicurezza, ma in ottica ambientale viene richiesto

¹³ *D.lgs. 50/2016 del 18 aprile 2016 recante "Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici"* (G.U. n. 91 del 19 aprile 2016);

¹⁴ Il *Total Cost Ownership (TCO)* indica la somma complessiva di tutti i costi legati al possedimento e al funzionamento di un prodotto o sistema per tutto il suo ciclo di vita. Oltre al prezzo di acquisto iniziale andranno considerati altri fattori, quali: installazione, consumo energetico, manutenzione ordinaria, manutenzione straordinaria e smaltimento.

¹⁵ La *Life Cycle Cost (LCA)* è una metodologia che permette di analizzare l'impatto ambientale di un prodotto, di un'attività o di un processo durante tutto il ciclo vita. L'analisi LCA permette di individuare le fasi del ciclo vita più impattanti ed intervenire nel progetto per migliorarle.

anche una maggiore durabilità dei vari componenti e una riduzione degli interventi di manutenzione.

Ulteriore paragrafo da sottolineare è il *4.1.4.7 Bilancio materico*, nel quale viene indicato un punteggio premiante per la redazione di un bilancio materico per un uso efficiente delle risorse impiegate nella realizzazione e\o esecuzione dei prodotti oggetti del bando. La richiesta è quella di fornire la quantificazione delle risorse in input e output per tutto il ciclo vita del prodotto indicando le tipologie di materiali impiegati (acciaio, plastica, alluminio, vetro...). Inoltre, viene richiesto un allegato descrittivo di come funziona la fase di installazione e manutenzione rispetto alle risorse utilizzate.

3.1.3 CAM PER SERVIZIO DI ILLUMINAZIONE PUBBLICA

Il documento è stato pubblicato in Gazzetta Ufficiale n.98 il 28 aprile 2018 e definisce i criteri ambientali minimi che, ai sensi del *D.lgs. 50/2016*, le amministrazioni pubbliche devono seguire per le procedure di affidamento del servizio di illuminazione pubblica.

Al fine di analizzare meglio il documento, il Servizio di illuminazione Pubblica comprende:

- La gestione degli impianti di illuminazione pubblica che, a sua volta, è costituita da:
 - la conduzione degli impianti di illuminazione;
 - la manutenzione ordinaria e straordinaria conservativa degli impianti di illuminazione;
 - la verifica periodica, con cadenza prestabilita a seconda del livello prescelto degli impianti di illuminazione;
- ed inoltre può comprendere:
 - la fornitura di energia elettrica per l'alimentazione degli impianti di illuminazione pubblica ed eventualmente per l'alimentazione degli impianti di segnaletica luminosa;
 - un censimento, se non esistente, almeno di livello 2 degli impianti di illuminazione pubblica a cura del fornitore;
 - la definizione di un progetto definitivo ovvero esecutivo degli interventi di riqualificazione dell'impianto di illuminazione pubblica e la eventuale realizzazione dei lavori previsti da un progetto esecutivo degli interventi di riqualificazione dell'impianto di illuminazione pubblica, laddove ricorrono i casi previsti dall'*art. 59, comma 1 e 1 bis* del codice dei contratti pubblici;
 - altre attività inerenti alla conduzione o la manutenzione degli impianti di illuminazione pubblica aggiuntive rispetto a quanto già indicato;
 - la gestione degli impianti di segnaletica luminosa.

Per quanto riguarda il tema della circolarità, nel capitolo 4.5 *Clausole contrattuali (criteri di base)*, al punto 4.5.4, troviamo l'obbligo della redazione del bilancio materico. Questo documento deve dimostrare l'uso efficiente delle risorse impiegate per la manutenzione e la realizzazione di impianti del servizio in oggetto del bando. Il bilancio materico deve contenere:

- la quantificazione delle risorse materiche impiegate in input e output nell'impianto e, soprattutto una particolare attenzione al fine vita di tutti i componenti del servizio IP (apparecchi, pali, cavi, basamenti, pozzi, plinti...).
- La quantificazione delle risorse materiche impiegate in input e output durante la fase di manutenzione ordinaria e, soprattutto una particolare attenzione al fine vita di tutti i componenti del servizio IP (apparecchi, pali, cavi, basamenti, pozzi, plinti...).

Viene specificato che la quantificazione materica per entrambi le fasi sopra citate deve riportare la tipologia di materiale impiegato (alluminio, acciaio, ferro, vetro...) per tutti gli elementi di cui si conosce la materia prima, mentre per gli altri (cablaggi, schede elettroniche, cavi) bisogna almeno indicarne il peso, la quantità e le tipologie per singoli elementi.

Il contratto prevede una penale nel caso in cui l'offerente non presenti annualmente un bilancio materico così come viene descritto.

Nel capitolo 4.6 *Clausole contrattuali (criteri premianti)* al punto 4.6.1 viene descritto come ricevere un punteggio premiante di **5 punti su 100** se l'offerente si impegna a presentare annualmente un bilancio materico. Rispetto a quanto presente nel capitolo 4.5 citato in precedenza, vengono aggiunte:

- La quantificazione della durata media dei componenti dell'impianto;
- La quantificazione del numero di veicoli, del tipo di carburante utilizzato e dei km percorsi per le fasi di installazione e manutenzione degli impianti;
- La fornitura di schede tecniche dei prodotti che specificino e attestino le informazioni necessarie alla redazione del bilancio materico.

3.2 LA DICHIARAZIONE AMBIENTALE DI PRODOTTO (EPD) PER I SISTEMI DI ILLUMINAZIONE PUBBLICA SECONDO LA PCR EPDITALY020

3.2.1 DESCRIZIONE GENERALE

Il documento “*EPDItaly 020-PCR Part B Illuminazione pubblica*”¹⁶ viene sviluppato all’interno del Programma EPDItaly ed è stato pubblicato il 03/10/2024 e avrà validità fino al 03/10/2029. Il Programma EDPItaly ha come obiettivo quello di promuovere strumenti che permettono alle organizzazioni, operanti in Italia e all'estero per qualsiasi settore di mercato, di valorizzare l'impegno nella riduzione dell'impatto ambientale associato ai propri prodotti o servizi.

Tale obiettivo viene perseguito attraverso l’adozione delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD Environmental Product Declarations), le quali rappresentano documenti standardizzati e verificabili contenenti informazioni oggettive e quantificate sulla prestazione ambientale di un prodotto. Le EPD si basano su uno studio di Analisi del Ciclo di Vita (LCA – Life Cycle Assessment), condotto in conformità alle norme ISO 14040¹⁷, ISO 14044¹⁸ e ISO 14025¹⁹.

Elemento centrale per la coerenza e comparabilità tra dichiarazioni ambientali è l’adozione delle Product Category Rules (PCR), ovvero regole specifiche per ciascuna categoria merceologica. Le PCR definiscono le modalità operative e metodologiche da seguire nello svolgimento dell’analisi LCA e nella redazione dell’EPD, assicurando un approccio uniforme e trasparente tra prodotti comparabili. Queste vengono elaborate da soggetti proponenti, sottoposte a un processo di consultazione pubblica, approvate per l’utilizzo e successivamente riviste con cadenza quinquennale, o prima qualora intervengano variazioni normative o esigenze di mercato.

Il documento costituisce una PCR di sotto-categoria e viene applicata allo specifico settore degli “Apparati e sistemi elettrici ed elettronici” con riferimento alla sotto-categoria dei **dispositivi per illuminazione** pubblica. Tale famiglia di prodotti comprende tutti i sistemi progettati per la gestione e regolazione dell’illuminazione degli spazi pubblici, con l’obiettivo di garantire un adeguato flusso luminoso e una corretta distribuzione della luce negli ambienti esterni. Viene espressamente specificato l’esclusione da questa PCR di tutti gli apparecchi di illuminazione per ambienti interni.

¹⁶ ENEL S.p.A., Life Cycle Engineering, “*EPDItaly 020-PCR per illuminazione pubblica*”, 2024. Documento scaricabile online: https://www.epditaly.it/pcr_pcra-per-prodotti-e-sistemi-elettronici-ed-elettrici-epditaly007-stand-alone-rev-3-0/pcr-part-b-illuminazione-pubblica-epditaly-020-da-usare-con-pcr-epditaly-007/

¹⁷ UNI EN ISO 14040:2021 *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento*

¹⁸ UNI EN ISO 14044:2021 *Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida*

¹⁹ UNI EN 14025:2024 *Cisterne per il trasporto di merci pericolose - Cisterne metalliche a pressione - Progettazione e costruzione*

Ai fini della presente PCR, la funzione principale dei dispositivi di illuminazione pubblica è quella di fornire un flusso luminoso artificiale adeguato, coerente con le esigenze operative del contesto di installazione. Gli studi di Life Cycle Assessment (LCA) sviluppati in conformità a questa PCR devono adottare come unità funzionale un singolo apparecchio di illuminazione in funzione per un periodo di riferimento pari a 40.000 ore di esercizio, per garantire la confrontabilità tra prodotti appartenenti alla stessa categoria.

Un apparecchio di illuminazione è definito come un sistema composto da:

- Struttura fisica, particolarmente rilevante nei sistemi di illuminazione pubblica (es. palo o sostegno);
- Sistema di alimentazione elettrica, sia connesso alla rete sia autonomo (es. alimentato da batteria);
- Uno o più moduli luminosi (lampade), integrati o meno nel corpo del dispositivo;
- Sistema di controllo e gestione della luce, eventualmente integrato nell'unità di alimentazione (es. timer, sensori crepuscolari, dispositivi di regolazione del flusso).

Ai fini della caratterizzazione dell'unità funzionale e della successiva valutazione degli impatti ambientali, l'EPD deve riportare in modo dettagliato le seguenti informazioni:

- Potenza nominale della sorgente luminosa;
- Tecnologia di generazione della luce utilizzata (ad esempio: filamento elettrico, lampade a scarica, LED);
- Sistema di controllo e gestione del funzionamento (es. dispositivi di temporizzazione o regolazione);
- Tipologia e massa degli elementi strutturali associati al prodotto, come ad esempio pali in calcestruzzo o acciaio.

Ai fini della redazione di una Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD) conforme alla sottocategoria PCR EPDItaly020, è obbligatorio indicare in modo chiaro le fasi del ciclo di vita considerate nell'analisi LCA, mediante una tabella riepilogativa presente nel documento EPD. Eventuali moduli non dichiarati devono essere contrassegnati con l'abbreviazione MND (Module Not Declared).

Per i prodotti definiti come prodotti da costruzione (secondo quanto stabilito nel paragrafo 1.3 della PCR), l'analisi deve includere i seguenti moduli LCA, in accordo alla norma EN 15804:2012+A2:2019²⁰:

FASE DEL CICLO DI VITA	MODULO	SPIEGAZIONE
FASE DI PRODUZIONE	A1	<i>Estrazione materie prime</i>
	A2	<i>Trasporto materie prime</i>
	A3	<i>Produzione</i>
FASE DI COSTRUZIONE	A4	<i>Trasporto dalla fabbrica al cantiere</i>
	A5	<i>Processo di costruzione e installazione</i>
FASE D'USO	B1	<i>Utilizzo</i>
	B2	<i>Manutenzione</i>
	B3	<i>Riparazioni</i>
	B4	<i>Sostituzioni</i>
	B5	<i>Ristrutturazioni</i>
	B6	<i>Uso energetico operativo</i>
	B7	<i>Uso operativo dell'acqua</i>
FASE DI FINE VITA	C1	<i>Demolizione</i>
	C2	<i>Trasporto al cantiere di trattamento rifiuti</i>
	C3	<i>Trattamento dei rifiuti finali</i>
	C4	<i>Trattamento dei rifiuti finali</i>
BENEFICI OLTRE I CONFINI DEL SISTEMA	D	<i>Riuso, recupero, riciclaggio</i>

Tabella 1 Fasi del ciclo vita di un prodotto secondo la UNI EN15804

Tutti i moduli sopracitati sono **obbligatori** per la redazione della dichiarazione.

²⁰ UNI EN 15804 *Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categorie di prodotto*.

La UNI EN 15804:2019 è la norma europea di riferimento per la redazione delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) nel settore delle costruzioni. Definisce regole comuni per l'analisi del ciclo di vita (LCA), gli indicatori ambientali da dichiarare e le modalità di confronto tra prodotti.

3.2.2 EPD REALIZZATE NEL SETTORE DELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA

Lo scopo della redazione della EPD è quello di monitorare gli impatti ambientali delle diverse fasi del ciclo vita del prodotto secondo una LCA, metodo standardizzato e approvato dalle normative europee. Grazie a questo strumento è possibile certificare un prodotto ed è possibile analizzare nello specifico tutte le fasi per poter evidenziare eventuali punti specifici di miglioramento. Di seguito l'elenco degli EPD pubblicati secondo questa PCR per apparecchi di illuminazione pubblica:

MODELLO	AZIENDA PRODUTTRICE
CATULLO, MORAVIA, MODÌ, VIESTE E OLIMPIA	Niteko S.r.l.
FALKO 1, FALKO 3	AEC Illuminazione S.r.l.
FIRENZE EVO	AEC Illuminazione S.r.l.
NOOS	AEC Illuminazione S.r.l.
MX PRO 1, MX PRO 2	AEC Illuminazione S.r.l.
ALO 1, ALO 2, ALO 3	AEC Illuminazione S.r.l.
ECO RAYS TP, ECO RAYS TS, ECO RAYS S, ECO RAYS BR	AEC Illuminazione S.r.l.
Q-DROME	AEC Illuminazione S.r.l.
ARYA TP, ARYA TS, ARYA S	AEC Illuminazione S.r.l.
ITALO 1, ITALO 2, ITALO 3	AEC Illuminazione S.r.l.
I-TRON MICRO, I-TRON ZERO, I-TRON 1, I-TRON 2	AEC Illuminazione S.r.l.
APPARECCHI DI ILLUMINAZIONE STRADALE DENIA 3460 LED	Disano Illuminazione S.p.A.
CORPO LAMPADA KOINÈ	Cariboni Group S.p.A.
EIDOS M (POTENZE ANALIZZATE 19 W, 49,9 W, 82,1 W)	GDS Lighting S.r.l.
KAIROS SMALL E KAIROS MEDIUM	Cariboni Group S.p.A.
MAXIMOL	GDS Lighting S.r.l.
MINIRODIO MODELLI 1991-1987-1998 (POTENZA 61W)	Disano Illuminazione S.p.A.
MINIGIOVI	Disano Illuminazione S.p.A.

Tabella 2 EPD che utilizzano la PCR EPDI Italy 020. Fonte: *EPDI Italy*

4 CASI STUDIO E LINEE GUIDA DI RIFERIMENTO

4.1 CASI STUDIO IN ITALIA

4.1.1 PREMESSA: PRINCIPI DI CIRCOLARITÀ APPLICATI AL CONTESTO ITALIANO

I casi studio che seguono rappresentano, per quanto emerso dall'analisi delle fonti disponibili, gli unici esempi documentati di applicazione dei principi di progettazione circolare nel settore dell'illuminazione pubblica in Italia. Si tratta di due interventi di riqualificazione urbana realizzati per i Comuni di San Pier d'Isonzo e Gabicce Mare ad opera rispettivamente di *City Green Light* e *Hera Luce*.

L'analisi fatta deriva dal materiale pubblicato dalle due aziende attraverso comunicati stampa pubblici e presentazioni a convegni, **tuttavia non è stato possibile reperire ulteriore materiale perché vincolato da segreto professionale e non è stato condiviso per la realizzazione di questa tesi.**

4.1.2 PROGETTO PER L'ILLUMINAZIONE PUBBLICA DEL COMUNE DI SAN PIER D'ISONZO

Il nuovo impianto di illuminazione pubblica, terminato ad aprile del 2024, del comune di San Pier d'Isonzo (GO) è completamente circolare²¹. Lo dichiara il comunicato stampa della *City Green Light*, E.S.Co aggiudicataria del progetto, della gestione degli impianti e della fornitura di energia per i prossimi 9 anni. L'intervento viene realizzato nell'ambito del Servizio Luce 4 Consip e ha coinvolto tutte le componenti della pubblica illuminazione, si possono così suddividere:

- Componenti elettrici (apparecchi di illuminazione, sistemi di telecontrollo, cavi di connessione e quadri elettrici).
- Componenti infrastrutturali (cavi di alimentazione, canalizzazioni, pozzetti, sostegni e cabine di trasformazione).

La chiave innovativa del progetto è stata l'adozione del bilancio materico, per quantificare la quantità di risorse utilizzate e restituite durante l'intero ciclo di vita del servizio. In collaborazione con *Neutralia*, City Green Light ha sviluppato un disciplinare tecnico interno conforme agli standard internazionali, volto a monitorare sistematicamente il contenuto di materiali riciclati nei prodotti utilizzati. Il rispetto di questa procedura è stato certificato da

²¹ F. Magnanini, F. Nani, "City Green Light pioniera della luce circolare. Il progetto pilota è San Pier d'Isonzo", fonte: <https://citygreenlight.com/sanpierisonzo/>

DNV Business Assurance Italy, conferendo al progetto valore come *best practice* nell'ambito dell'economia circolare.

Nello specifico, viene dichiarato che verranno risparmiate 33,4 tonnellate di CO₂, verrà utilizzata solamente energia proveniente da fonti rinnovabili e con l'adozione del bilancio materico²² il 70% dei materiali utilizzati per il progetto è riciclato (si stimano oltre 14 tonnellate di materiale). Il valore sale al 90% se si valutano solo i 407 corpi illuminanti sostituiti.

Il progetto dimostra che la riqualificazione di asset pubblici rappresenta un'opportunità per promuovere la sostenibilità ambientale, l'efficienza energetica e la riduzione di emissione di CO₂. Le dichiarazioni delle autorità locali e dei promotori del progetto sottolineano la volontà di rendere questo approccio un modello replicabile su scala territoriale più ampia, capace di generare benefici tangibili per le comunità e per l'ambiente.

Lo scopo del progetto, dichiara City Green Light, è quello di spronare i produttori dei componenti a realizzare prodotti con alte percentuali di materiale riciclato in ingresso, in particolare di provare ad utilizzare in maniera sempre più ampia materiali di riciclo post consumo (rifiuti, materiale rottamato, di ritorno nel processo produttivo) per soddisfare le linee guida dell'economia circolare.

²² La city Green Light ha pubblicato sul loro sito la possibilità di compilare un form per ricevere una copia del disciplinare tecnico utilizzato per la redazione del bilancio materico dichiarato, tuttavia non è stato condiviso e pertanto le informazioni relative a questo caso studio rimangono quelle pubblicate nel comunicato stampa.

4.1.3 PROGETTO PER L'ILLUMINAZIONE PUBBLICA DEL COMUNE DI GABICCE MARE

Il progetto di Gabicce Mare è stato realizzato da Hera Luce in collaborazione con l'architetto Marco Cappellini e realizzato nel 2018. Lo scopo del progetto è quello di quantificare la circolarità dei materiali in un nuovo impianto di illuminazione pubblica attraverso una valutazione input-output delle risorse impiegate in tutte le fasi del ciclo vita. Sono stati analizzati sia i materiali dei componenti degli impianti (plinti, pali, cavi, apparecchi) che quelli utilizzati per le attività di realizzazione degli impianti e della loro manutenzione (vernice, carburante dei mezzi di trasporto, detergenti). Per ciascuno di questi materiali è stata misurata la quantità in entrate e in uscita al fine di realizzare un bilancio materico ed uno economico.

Il quantitativo totale di materie utilizzate per la realizzazione è di 23 tonnellate, mentre per la manutenzione sono necessari solamente 302 kg. Viene dichiarato che oltre il 99% dei materiali impiegati potrà essere riciclato al termine del ciclo vita dei prodotti²³

Il progetto soddisfa ampiamente i criteri ambientali minimi CAM per l'acquisto di apparecchi per l'illuminazione pubblica. La scelta di materiali circolari è stata fondamentale per il raggiungimento dell'obiettivo di adempiere a nuove esigenze ambientali e di mercato, per questo motivo è stata coinvolta la MATREC, società di consulenza e ricerca, specializzata in sostenibilità e circolarità di materiali.

Durante la conferenza *“Verso un modello di economia circolare”* a Bologna del 27 ottobre 2017, sono stati presentati i risultati di questo caso studio dall'architetto progettista²⁴. Di seguito vengono riportati i principali aspetti del progetto.

²³ Hera Luce, “Gabicce Mare, un impianto IP riciclabile al 99%”, Fonte: <https://www.heraluce.it/insieme/gabicce-un-impianto-ip-riciclabile>

²⁴ Marco Capellini, “Misurare la circolarità e gli impatti ambientali di un impianto di illuminazione”, in conferenza *“Verso un modello di economia circolare. Un nuovo inizio per l'illuminazione pubblica”*, Bologna, 27 ottobre 2017

La prima tabella mostra l'elenco dei componenti analizzati dell'impianto come quantità di risorse impiegate e reimmesse nel sistema:

SPECIFICHE IMPIANTO	SPECIFICHE MANUTENZIONE
corpi illuminanti	pulizia del vetro
imballaggi corpi illuminanti	verniciatura pali
pali	sostituzione corpi illuminanti
protezioni pali	imballaggi corpi illuminanti
basamenti	carburante
pozzetti ispezione	
chiusini	
giunti snodi	
corrugati	
cavi cablaggio pali	
cavi di collegamento pali	

Successivamente vengono descritti i materiali che costituiscono i componenti sopracitati in **bilancio materico**. A sinistra la tabella che mostra le risorse utilizzate per la realizzazione dell'impianto e a destra quelle per la manutenzione:

%	MATERIALE IMPIANTO	%	MATERIALE MANUTENZIONE
2.1	AL	24	AL
9.3	AC	1	AC
0.01	RAME	0.1	RAME
2.4	GHISA	0.003	CAVI
0.1	ZINCO	1.1	VETRO
0.5	CAVI	4.5	CARTONE
83.7	CALCESTRUZZO	1.1	PMMA
0.1	VETRO	0.02	SILICONE
0.4	CARTONE	0.1	EPS
0.1	PMMA	0.005	PE
0	SILICONE	4.5	COTONE
0.01	EPS	17	DETERGENTE
0	PE	46	VERNICE
0.03	PVC		
1.3	HDPE		
0.02	POLIELEFINE		
26.273 kg		320 kg	

Dopo aver analizzato la quantità di materia utilizzata viene presentato il bilancio economico che tiene conto della **quantità di materie utilizzate (input)** e il **valore economico delle materie a fine vita (output)**, ne risulta che:

MATERIALE	INPUT (% quantità di materiale)	OUTPUT (% di valore economico dismissione)
AL	2.4 %	173 %
AC	9.2 %	62 %
RAME	0.01 %	4 %
GHISA	2.4 %	26 %
ZINCO	0.1 %	0.4 %
CAVI	0.5 %	16 %
CALCESTRUZZO	83 %	-203 %
VETRO	0.1 %	0.2 %
CARTONE	0.4 %	4 %
PMMA	0.1 %	0.2 %
SILICONE	0.002 %	-0.01 %
EPS	0.01 %	-0.03 %
PE	0 %	0 %
PVC	0.03 %	0.1 %
HDPE	1.3 %	16 %
POLIELEFINE	0 %	0.2 %
COTONE	0.1 %	-0.3 %
DETERGENTE	0.2 %	-1 %
VERNICE	0.6 %	2 %

Il bilancio, rispetto alla circolarità economica, presentato mostra che:

- Il valore delle risorse a fine vita, rispetto alla dismissione dei materiali, mostra che il guadagno maggiore si fa con l'alluminio (137%) e con l'acciaio (62%). Il calcestruzzo impiegato per i plinti porta invece una perdita notevole (-203%).
- Se venisse esclusa la perdita dovuta all'impiego di calcestruzzo si avrebbe un incremento economico del 300%

In conclusione, il progettista dichiara che la circolarità materica dell'impianto è del 99%, quella economica è buona, ma può essere migliorata. Per ottenere un buon risultato è sicuramente necessario lavorare sulla durabilità dei materiali, la fase di manutenzione diventa fondamentale.

4.2 CASI STUDIO IN OLANDA

4.2.1 DUE PROGETTI PILOTA PER APPALTI CIRCOLARI OLANDESI

Il programma nazionale del governo olandese ha come obiettivo il raggiungimento di un'economia pienamente circolare entro il 2050, con una riduzione del 50% nell'utilizzo di materie prime primarie (minerali, fonti fossili e metalli) già entro il 2030.²⁵

Questo traguardo vuole essere raggiunto anche nel settore dell'illuminazione pubblica, descritta dall'acronimo OVL (Openbare Verlichting Nederland), che sta lavorando negli ultimi anni per la transizione verso l'economia circolare e sta cercando gli strumenti migliori per favorire questo passaggio.

Tra i principali strumenti proposti per supportare la selezione di prodotti in un'ottica di circolarità vi sono l'analisi del ciclo di vita (LCA, Life Cycle Assessment) e l'indicatore dei costi ambientali (MKI, Milieu Kosten Indicator)²⁶. In Olanda, tali metodologie sono già ampiamente adottate in diversi settori industriali, tra cui quello dell'asfalto, del calcestruzzo, dell'industria tessile, della plastica, dei materiali granulari, dell'elettronica e dell'orticoltura. A partire circa dal 2017, si è avviato un percorso volto a trasferire e applicare queste competenze anche agli appalti relativi all'illuminazione pubblica.

La metodologia LCA, redatta in conformità alla norma europea EN 15804²⁷, è uno strumento riconosciuto e applicato a livello internazionale per la valutazione degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto. L'MKI, invece, è uno strumento sviluppato e utilizzato a livello nazionale nei Paesi Bassi. Nonostante il suo impiego sia attualmente limitato al contesto olandese, l'MKI costituisce un valido approccio complementare all'LCA per l'analisi dell'impatto ambientale e, pertanto, può essere richiesto anche nell'ambito di gare d'appalto a livello europeo.

²⁵ Circle Economy Foundation, "Financial Policy Interventions for a Circular Economy", febbraio 2024, Fonte: <https://www.circle-economy.com/news/report-financial-policy-interventions-for-a-circular-economy#.Wo7d6ajiaUk>

²⁶ Il valore MKI viene determinato sulla base dei cosiddetti costi ombra. Si tratta dei costi che si dovrebbero sostenere per riparare il danno ambientale. Più alto è il punteggio MKI, maggiore è l'impatto ambientale del materiale. Questo indicatore permette di confrontare facilmente diversi materiali e metodi di costruzione. Fonte: <https://www.ibis.nl/kennisbank/alles-over-milieu-kosten-indicator-mki>

²⁷ La norma definisce regole quadro (PCR) per l'elaborazione delle dichiarazioni ambientali di tipo III (EPD) applicabili a prodotti e servizi per le costruzioni. Le PCR specificano gli indicatori da dichiarare, le informazioni da fornire e le modalità di raccolta e comunicazione dei dati. Stabiliscono inoltre quali fasi del ciclo di vita e quali processi devono essere inclusi nella EPD. Fondamento dell'EPD è l'analisi del ciclo di vita (LCA), per la quale la norma indica le regole per il calcolo dell'inventario, la valutazione degli impatti ambientali e i requisiti di qualità dei dati. Le PCR comprendono anche indicazioni per la comunicazione di informazioni ambientali e sanitarie non derivanti dall'LCA e fissano le condizioni per il confronto tra prodotti da costruzione. Le stesse regole si applicano anche ai servizi per le costruzioni. Fonte: UNI Ente Italiano di Normazione

Nel periodo 2020-2022, i comuni di Amsterdam e Tre Drechtsteden (Dordrecht, Sliderecht, Alblasserdam) hanno utilizzato i metodi sopracitati come criterio di aggiudicazione per l'acquisto di apparecchi di illuminazione. Si tratta di due approcci molto diversi, Amsterdam ha proposto una gara d'appalto privata con l'utilizzo dell'analisi MKI come unico criterio aggiudicante, mentre a Tre Drechtsteden (Dordrecht, Sliderecht, Alblasserdam) si trattava di un bando europeo pubblico con il metodo LCA come uno dei criteri soggetti a punteggio per l'aggiudicazione della gara.²⁸

AMSTERDAM (2020)	TRE DRECHTSTEDEN (2021-2022)
Tipologia di gara:	contratto privato multiplo
Criterio aggiudicazione:	analisi MKI
Unità di valutazione:	euro
Fasi valutate:	tutte le fasi di vita (da A a D)
Estensione gara:	220 apparecchi
Tipologia di gara:	gara europea
Criterio aggiudicazione:	analisi LCA
Unità di valutazione:	CO2 equivalente
Fasi valutate:	fase da A1 a A4
Estensione gara:	3.870 apparecchi

Figura 9 Tabella di confronto progetti pilota. Fonte: Arnaudo Andrea

Di seguito i risultati dei due progetti pilota.

²⁸ Beatrijs Oerlemans, Daaf de Kok en Ieke Bak, "Handleiding Armaturen, LCA & MKI", settembre 2023

4.2.2 GARA PUBBLICA PER LA CITTÀ DI AMSTERDAM

La gara d'appalto privata presentata dalla città di Amsterdam nel 2020 riguardava 220 apparecchi di illuminazione pubblica. Erano richiesti due tipologie di complessi illuminanti, uno per l'illuminazione della pista ciclabile\pedonale e l'altro per le carreggiate veicolari. Nel bando vennero specificati i requisiti base, ovvero: qualità del prodotto, resistenza agli urti, impermeabilità e corretto illuminamento. Inoltre, dovevano essere garantiti 20 anni di vita e misero un tetto massimo sul prezzo unitario degli apparecchi, l'unico fattore di cui non venne tenuto conto è il design dei prodotti presentati.

Il punteggio di gara è stato interamente decretato tramite analisi MKI, ovvero ha vinto il punteggio più basso. Il metodo MKI è stato richiesto per tutte le fasi di vita²⁹: fase di produzione (A1, A2, A3), fase di costruzione (A4, A5), fase d'uso (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7), fase di demolizione e di lavorazione (C1, C2, C3, C4) e fase di raccolta differenziata (D).

La raccolta dei dati necessari per descrivere l'intero ciclo di vita del prodotto si è rivelata particolarmente complessa, in quanto richiede una stretta collaborazione tra il fornitore e la stazione appaltante. È infatti essenziale la condivisione di tutte le informazioni utili a garantire un'analisi accurata. Tra i dati richiesti, rientrano ad esempio: il tipo di energia utilizzata dalla città, le caratteristiche dei veicoli impiegati per l'installazione e la manutenzione degli apparecchi, la frequenza e le modalità di pulizia, nonché la distanza dal centro di trattamento dei rifiuti più vicino. Questi elementi, se non correttamente condivisi e documentati, possono compromettere la qualità dell'analisi del ciclo di vita (LCA) e, di conseguenza, la validità della dichiarazione ambientale del prodotto.

Il bando ha registrato un vincitore su quattro partecipanti, ma soprattutto ha permesso ai vari interlocutori di prendere familiarità con il metodo MKI e di applicarlo nel settore dell'illuminazione pubblica. Dichiara Gerke ten Have, responsabile della gara di Amsterdam, alla rivista specializzata in opere pubbliche Straatbeeld nel marzo 2021: *"In realtà hanno vinto tutti e quattro. Non vogliamo definirlo un vincitore perché è stato incredibilmente istruttivo affrontare questo processo insieme. Abbiamo acquisito nuove intuizioni e questo era il nostro obiettivo."*³⁰

²⁹ Vedi tabella 1, pag. 23.

³⁰ Beatrijs Oerlemans, Daaf de Kok en Ieke Bak, "Handleiding Armaturen, LCA & MKI", settembre 2023, pag. 27

4.2.3 GARA PUBBLICA PER TRE CITTÀ DELLE DRECHSTEDEN

Il bando europeo (anno 2020-2021) che ha coinvolto tre città del Drechtsteden (Dordrecht, Sliderecht, Alblasserdam) consiste nella fornitura di 3.807 apparecchi, suddivisi in quattro destinazioni d'uso: strade residenziali, zone residenziali, strade di accesso al quartiere e piste ciclabili. La gara aveva un punteggio massimo di 1000 suddivisi come segue: 250 per il livello di qualità della luce (calcoli illuminotecnici), 300 per il prezzo di fornitura, 300 per il consumo energetico e la sostenibilità e 150 per il miglior punteggio di LCA. A differenza del bando di Amsterdam il metodo utilizzato è la LCA, ma non è l'unico criterio di aggiudicazione, bensì incide il 15% del punteggio totale.

La LCA richiesta riguarda solo le fasi da A1 a A4 del ciclo di vita del prodotto. La scelta è stata influenzata da alcuni fattori discriminanti:

- I fornitori di apparecchi hanno la possibilità concreta di influenzare e gestire queste fasi in prima persona.
- La posizione di installazione degli apparecchi non era nota al momento del bando, pertanto le fasi B (FASE D'USO) non erano note.
- Data la prima esperienza nell'utilizzare una LCA in una gara d'appalto si è deciso di mantenerla chiara e facilmente gestibile.

Il consumo energetico, per quanto riguarda apparecchi di illuminazione pubblica, ha l'impatto maggiore nella fase d'uso (fase B), nello specifico nella B6 (Uso energetico operativo). Data l'incidenza sulla sostenibilità il criterio è stato incluso nel punteggio finale come "capacità assorbita" e non nella LCA.

Tabella 3 Fasi ciclo di vita considerate nella gara

FASE DEL CICLO DI VITA	CODICE	SPIEGAZIONE	ANALISI
FASE DI PRODUZIONE	A1	<i>Estrazione materie prime</i>	LCA
	A2	<i>Trasporto materie prime</i>	LCA
	A3	<i>Produzione</i>	LCA
FASE DI COSTRUZIONE	A4	<i>Trasporto dalla fabbrica al cantiere</i>	LCA
FASE D'USO	B6	<i>Uso energetico operativo</i>	Capacità assorbita

L'inserimento dell'analisi LCA nelle gare d'appalto ha portato un nuovo approccio nel sistema, ma che potrebbe essere ulteriormente implementato. Johan Jonker, del comune di Dordrecht, dichiara alla rivista specializzata in opere pubbliche Straatbeeld nel maggio 2022: *"Sono stato molto attento perché non ne avevamo ancora esperienza. La gara è andata bene, con le*

conoscenze attuali avrei messo più punti sulla LCA. Ma anche adesso questo criterio ha fatto la differenza". La prossima sfida sarà quella di inserire anche la fase C e D del ciclo vita del prodotto, demolizione e riciclaggio, nel metodo di determinazione della LCA per gare di appalti pubblici.

4.2.4 STUDIO ANALITICO DEI PROGETTI PILOTA

A seguito di due bandi condotti tra il 2020 e il 2022 nei comuni di Amsterdam e della regione dei tre Drechtsteden, nei quali sono stati applicati i metodi LCA (Life Cycle Assessment) e MKI (Milieu Kosten Indicator) per valutare l'impatto ambientale dei sistemi di illuminazione pubblica, la OVL Nederland (Organisatie voor Verlichting) ha promosso e portato avanti lo studio analitico di quattro diversi scenari di calcolo per valutare l'incidenza di determinate variazioni sul calcolo dei punteggi dei metodi LCA e MKI per le fasi del ciclo vita del prodotto.

Gli esiti di questi studi, descritti nel rapporto pubblicato a settembre 2023 di Beatrijs Oerlemans, Daaf de Kok en Ieke Bak, dal titolo "*Handleiding Armaturen, LCA & MKI*"³¹

La componente fissa della valutazione è l'apparecchio base, con le seguenti caratteristiche:

- Peso = 10kg (incluso il materiale di imballaggio)
- Potenza nominale dei LED = 15W
- Durata di vita del prodotto di 25 anni, con la possibilità di sostituire i driver solo una volta.
- La fase di utilizzo B6 (vedi tabella paragrafo precedente) utilizza un mix energetico verde acquistato nazionalmente in Olanda.
- Il fine vita del prodotto si basa sul tasso fisso del NMD (Nationale MilieuDATABASE), un database creato con dati LCA con schede prodotto certificate per la valutazione ambientale.

Inoltre, vengono definite con determinate caratteristiche le fasi di vita dell'apparecchio base, necessarie al calcolo dell'impatto ambientale:

- FASE DI PRODUZIONE (A1-A3): i fornitori di apparecchi hanno fornito le tabelle che descrivono la quantità di materiali utilizzati e la distanza in km percorso per il trasporto su camion fino al luogo di assemblaggio.

³¹ Beatrijs Oerlemans, Daaf de Kok en Ieke Bak, "*Handleiding Armaturen, LCA & MKI*", settembre 2023, pp.31-37

Materiale	Quantità	Unità	Distanza di trasporto su camion (km)
Cavo e filo	600	G	200
Cavi	850	G	200
Imballaggio in cartone	2000	G	2000
Cassa: alluminio	3500	G	2000
Connettori	80	G	150
Tappo di copertura - vetro	1000	G	150
Autista	150	G	500
Etichette	15	G	150
Moduli LED	64	G	150
Lente	8	G	150
Driver della piastra di montaggio o alluminio	500	G	150
Elettronica su piastra di montaggio	600	G	400
Sacchetto di plastica	75	G	150
Scheda a circuito stampato	50	G	150
Riflettore	220	G	2000
Viti	100	G	150
Sigillatura	120	G	150

- TRASPORTO AL CANTIERE (A4): la distanza dal luogo di assemblaggio al luogo di installazione viene considerata di 150km.
- COSTRUZIONE (A5): l'installazione degli apparecchi avviene in quota tramite piattaforma con cestello per lavoro aereo, il valore fisso per il calcolo degli scenari è di 50 apparecchi al giorno con consumo fisso di 100 litri di gasolio e un corrispettivo di 2kg di rifiuti per lavorazione (materiale di imballaggio di cartone).
- FASE DI UTILIZZO (B1-B7): la fase di utilizzo, ad esclusione della componente energetica B6, non comporta impatti ambientali rilevanti e variazioni sul calcolo. Per la MANUTENZIONE (B2) viene considerato che, per il corretto funzionamento degli apparecchi è necessario svolgere l'attività di pulizia ogni 7,5 anni. Ciò comporta l'utilizzo di una piattaforma aerea (consumo di 0.3 litri di gasolio per apparecchio), acqua (0.25 litri per apparecchio) e sapone (0.01kg per apparecchio). Nella fase delle SOSTITUZIONI (B4) si considera il cambio del driver una volta ogni 25 anni. Le fasi B5 e B7 non sono state prese in considerazione. La potenza dell'apparecchio, fondamentale per lo scenario 3, di 15W porta ad un consumo annuo di 63kWh (vedi tabella sotto).

	numero	numero	unità
Risorse	15	10	Watt
Ore di accensione al giorno	11.51	11.51	ore
Ore di accensione all'anno	4.201	4.201	ore
Consumo annuo	Consumo ogni 25 anni 1.575	1.050	kWh

- FASE DI DEMOLIZIONE E LAVORAZIONE (C1-C4): per la dismissione degli apparecchi è necessaria la piattaforma aerea e viene considerato un consumo pari alla fase di installazione (A5 COSTRUZIONE). Per il trasporto al processore (C2) si considera un valore predefinito di 50km. Per le fasi di TRATTAMENTO DEI RIFIUTI (C3), TRATTAMENTO FINALE DEI RIFIUTI (C4) e per i BENEFICI E COSTI AL DI FUORI DEI CONFINI DEL SISTEMA (D) gli effetti ambientali sono stati calcolati con valori forfettari indicati nel database NMD al capitolo 1.1 di maggio 2022. Nel periodo dello studio non esisteva un valore preciso per lo smaltimento di rifiuti elettronici, pertanto sono state utilizzate le tabelle fornite dai produttori di apparecchi partecipanti, di seguito le principali percentuali utilizzate:

Materiale / Modulo	Scenario NMD (maggio 2022)	C3:AVI (combustione)	C4: Deposito	D: Riutilizzo e riciclaggio
Alluminio	5	3%	0%	97%
Policarbonato	57	85%	10%	5%
Resto della plastica	45	90%	10%	0%
Altri metalli	50	5%	5%	90%
Biochieri	28	0%	30%	70%
Elettronica	N / A	50%	40%	10%

I quattro scenari, che verranno descritti di seguito, si possono riassumere:

1. All'apparecchio base vengono effettuate modifiche nella sua componentistica che ne riducono il peso in kg. L'influenza della riduzione di peso porta a delle variazioni nei moduli A1 e D (si rimanda alla “*Tabella 1 Fasi ciclo di vita di un prodotto*”): estrazione di materie prime e recupero a fine vita. Inoltre vengono influenzati in maniera minore i moduli A2, A3, A4, C2 e C3.
2. All'apparecchio base vengono modificati alcuni componenti base, modificando l'origine della materia prima. I moduli che subiscono maggiori variazioni sono A1 e D: estrazione di materie prime e recupero a fine vita.
3. All'apparecchio base viene regolata la potenza nominale erogata dai moduli LED, da 15W a 10W. Subisce variazioni il modulo B6: consumo energetico durante la vita.
4. Vengono variate le fonti di energia utilizzate per l'apparecchio base, subisce variazioni il modulo B6: consumo energetico durante la vita.

4.2.4.1 SCENARIO 1 INFLUENZA DELLA QUANTITÀ DI MATERIALI

Per lo studio proposto nello scenario 1, la quantità di materiale di alcuni componenti è stata ridotta, di conseguenza il loro peso diminuisce. Nello specifico:

- Il peso del driver della piastra di montaggio in alluminio è stato ridotto del 30%, da 0.5 kg a 0.35kg.
- Il peso della calotta copri vetro è stato ridotto del 30%, da 1 kg a 0.7 kg.
- Il peso del corpo in alluminio è stato ridotto del 60%, da 3.5 kg a 1.4 kg.
- La restante parte dei componenti è rimasta invariata.

L'apparecchio base passa da 10 kg a 8 kg. Come si evince dal grafico 1, nel metodo di analisi MKI, **diminuisce l'impatto delle materie prime nel modulo A1** in quanto vengono utilizzati meno materiali. **Il modulo che subisce variazioni significative è il D**, nel quale però abbiamo un peggioramento delle situazioni in quanto la riduzione di materiali utilizzati porta inevitabilmente ad un minor quantitativo di riciclo. Questa analisi evidenzia un aspetto contraddittorio del metodo MKI, in quanto diminuendo i materiali utilizzati perdiamo dei "punti" dal punto di vista dell'impatto ambientale perché "si ricicla meno materiale". Tuttavia, va considerata la differenza in termini di costi, in euro, dell'incidenza dello scenario 1. Infatti, la differenza nel modulo D a favore dell'apparecchio base più pesante è di 1,21€, inferiore alla differenza nel modulo A1 a favore dell'apparecchio più leggero di 2,59€.

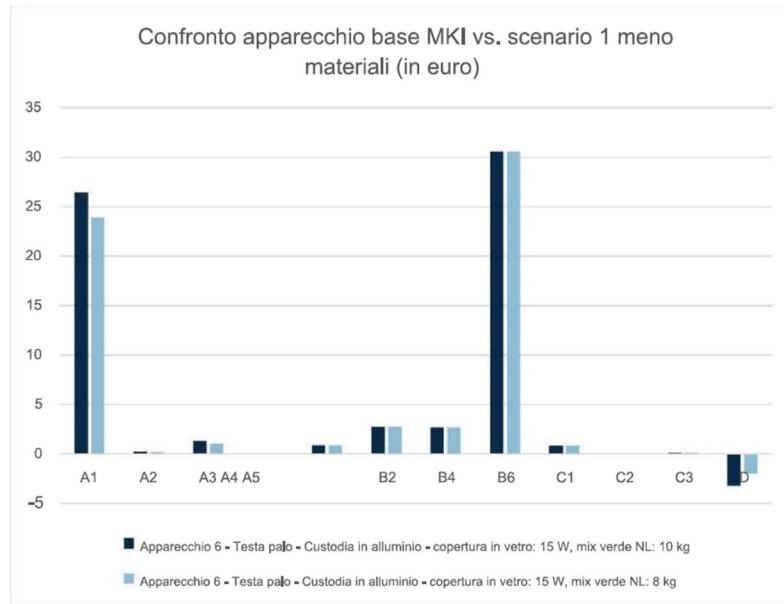


Grafico 1 Confronto apparecchio base MKI (blu) e scenario 1 (azzurro). Sull'asse delle X i moduli del ciclo vita del prodotto e sulle Y il costo in €.

4.2.4.2 SCENARIO 2 INFLUENZA DEL RIUTILIZZO DELLE PARTI

Per lo studio proposto nello scenario 2, cambia l'origine di alcuni componenti base dell'apparecchio. Si presuppone che i componenti base siano fatti con materie prime di origine

primaria. Vengono quindi utilizzati un involucro in alluminio e i componenti della calotta di copertura in vetro provenienti da un apparecchio che ha già raggiunto la fine del suo ciclo vita. Sono materiali già utilizzati che hanno un ciclo vita molto più lungo di quello dell'apparecchio, pertanto al posto di essere riciclati vengono riutilizzati senza essere modificati. Il processo di riuso di questi componenti è privo di oneri ambientali nel nuovo prodotto, tuttavia va considerato nel nuovo ciclo di vita il costo per il trasporto al luogo di assemblaggio.

I maggiori benefici si hanno nel modulo A1 perché vengono utilizzati materiali privi di oneri ambientali, andando ad abbassare il costo delle materie prime. Il modulo D subisce variazioni a favore dell'apparecchio base, come per lo scenario 1 visto precedentemente. Questo perché i benefici delle componenti riutilizzate sono stati già considerati nel modulo D del ciclo vita del precedente apparecchio (quello da cui vengono presi i componenti), pertanto si otterranno meno punti nel calcolo MKI perché quel materiale è già stato conteggiato. Dal punto di vista ambientale, in realtà, si hanno maggiori benefici rispetto a quelli evidenziati dal grafico perché comunque sono stati riutilizzati materiali che, alla fine del loro ciclo vita, si potranno nuovamente riciclare.

In termini economici, si ha un guadagno di 6.09€ per l'apparecchio modificato dallo scenario 2 nel modulo A1 e una perdita rispetto all'apparecchio base di 2.74€ nel modulo D. Il guadagno, in favore dello scenario 2, è di 3.35€.

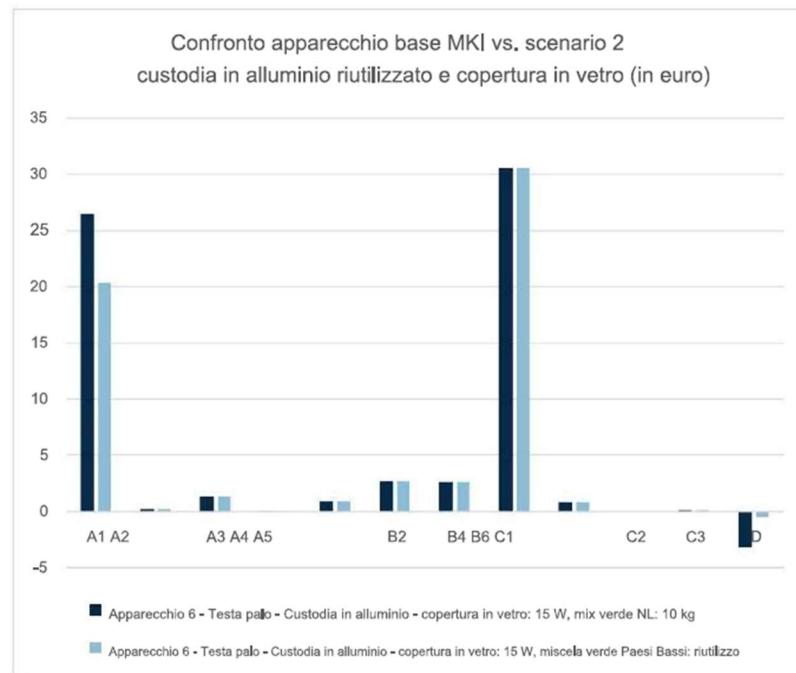


Grafico 2 Confronto apparecchio base MKI (blu) e scenario 2 (azzurro). Sull'asse delle X i moduli del ciclo vita del prodotto e sulle Y il costo in €.

4.2.4.3 SCENARIO 3 VARIAZIONE DI POTENZA

Per lo studio proposto nello scenario 3, è stata regolata la potenza emessa dall'apparecchio da 15W a 10W. **La riduzione del 33% della potenza porta ad una riduzione della stessa quantità del valore in euro nel modulo B6 di consumo energetico.** Per entrambi gli apparecchi è stato utilizzato un mix di energie verdi prodotte in olanda.

L'aspetto più interessante di questo studio è che l'impatto del consumo energetico sul calcolo del MKI totale per l'apparecchio base è del 49%, mentre per l'apparecchio modificato dallo scenario 3 è solo del 39%. Ne consegue che minore è la potenza di utilizzo, maggiore sarà la responsabilità del produttore dell'apparecchio nell'abbassare il costo del ciclo vita dell'apparecchio stesso. I progettisti illuminotecnici tramite la regolazione delle ore di funzionamento, profili di dimmerazione e variazione del flusso luminoso possono abbassare la potenza di esercizio e migliorare il punteggio economico\ambientale del prodotto senza modificarlo direttamente.

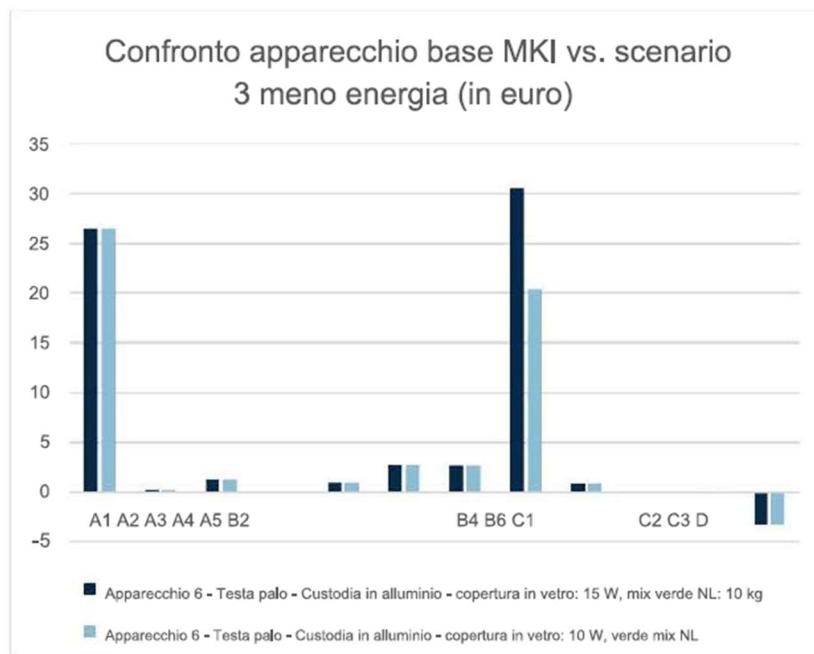


Grafico 3 Confronto apparecchio base MKI (blu) e scenario 2 (azzurro). Sull'asse delle X i moduli del ciclo vita del prodotto e sulle Y il costo in €.

4.2.4.4 SCENARIO 4 INFLUENZA DEL TIPO DI ENERGIA VERDE

Per lo studio proposto nello scenario 4 sono state utilizzate tre diverse fonti di energia verde per alimentare gli apparecchi. L'apparecchio base utilizza un mix di energia verde olandese (composto da: 26.5% legno, 26.5% biogas da letame e rifiuti organici, 45% da energia eolica, 1.4% da energia idroelettrica e per lo 0.5% dal fotovoltaico), lo scenario 4a utilizza una fonte derivante il biogas olandese e il 4b una fonte da energia eolica offshore in Olanda. **Il modulo sul quale influisce la fonte di energia è solamente il B6.**

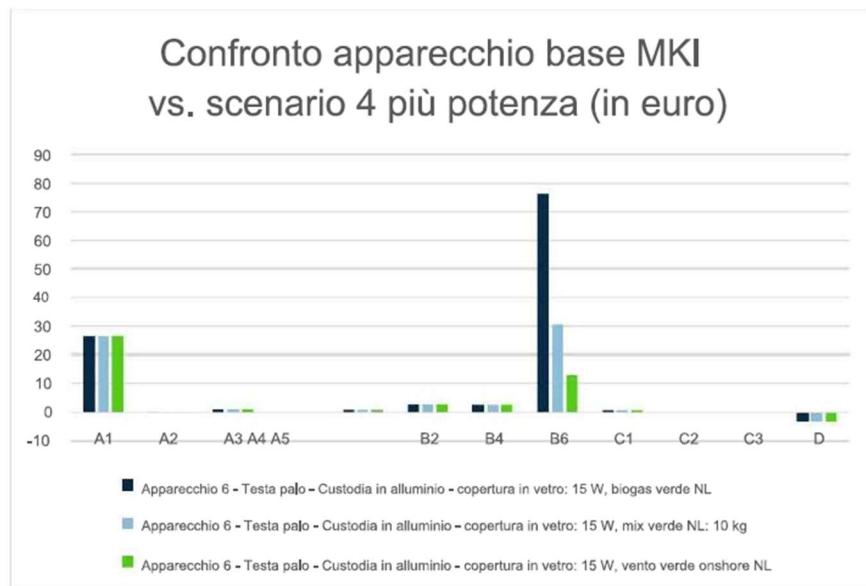


Grafico 4 Confronto apparecchio base MKI (blu) e scenario 2 (azzurro). Sull'asse delle X i moduli del ciclo vita del prodotto e sulle Y il costo in €.

Per quanto riguarda lo scenario 4a, utilizzando il biogas, si ottiene un aumento dei costi del 150% rispetto al mix verde dell'apparecchio base, mentre nello scenario 4b, con la fonte proveniente dall'eolico, si ottiene un costo minore del 57%. **Ne consegue che la scelta da parte dell'utilizzatore della fonte di energia elettrica è fondamentale all'interno della valutazione con metodo MKI.** Di seguito la tabella che mostra la variazione di incidenza del modulo

B6 alla variazione di energia:

Apparecchio	Tipo di fonte energetica	Modulo MKI B6 (euro)	MKI totale (A1-D)	Influenza B6 su MKI totale (A1-D) (%)	Influenza A1 sul totale MKI (A1-D) (%)
Base	Verde, mescola NL	30,56	62,68	49%	42%
Scenario 4a	Biogas, Paesi Bassi	76,53	108,66	70%	24%
Scenario 4b	Eolico onshore, Paesi Bassi	13,11	45,23	29%	58%

Nel migliore degli scenari, il 4b, la fonte di energia incide solo più il 29% del totale, mentre in quello peggiore, lo scenario alimentato da biogas, l'incidenza sale fino al 70%. Se si riesce quindi ad acquistare da fonti energetiche a basso impatto, l'influenza maggiore sul MKI totale si sposterà dal modulo B6 al modulo A1. Come per il precedente scenario, senza modificare

gli apparecchi si riesce a diminuire l'impatto ambientale e a spostare la responsabilità sui produttori degli apparecchi.

4.2.4.5 CONCLUSIONI E RISULTATI DELLO STUDIO

Lo studio sui quattro scenari è stato concepito per evidenziare gli effetti derivanti da scelte diverse in vari ambiti. L'obiettivo non è quello di dimostrare quale sia il migliore o quello da applicare in modo costante, ma piuttosto di mostrare le conseguenze delle diverse opzioni. In sintesi, di seguito vengono riportati alcune informazioni ricavate dai calcoli degli scenari:

- I moduli A1 (estrazione delle materie prime), B6 (consumo energetico) e D (Riuso, recupero, riciclaggio) hanno il maggior impatto nel ciclo vita di un apparecchio di illuminazione.
- Il riutilizzo delle componenti presentato nello scenario 2 (alloggiamento in alluminio e calotta di vetro) ha un effetto favorevole nello sviluppo dei calcoli con MKI o LCA, ma non così impattante come ci si aspetterebbe. Questo perché nel modulo D si possono calcolare meno benefici, perché già calcolati nel ciclo vita precedenti di quei componenti. Il metodo di calcolo in questo caso non rappresenta bene i benefici ottenuti.
- La scelta della fonte di energia è fondamentale. Lo scenario 4 mostra come l'utilizzo della corretta fonte di energia possa ridurre drasticamente l'impatto del modulo B6. Inoltre, lo studio mostra che non è sufficiente parlare di energia verde, ma bisogna specificare esattamente di cosa si tratta, infatti tutte e tre le fonti utilizzate per lo scenario si possono considerare "verdi", ma si ottengono risultati molto diversi fra loro.
- Dalle analisi fatte, viene dimostrato che il modulo B6 del consumo energetico sia molto impattante nel ciclo vita e soggetto a forti variazioni in base alle condizioni di utilizzo. Viene quindi proposto di considerare il modulo B6 a parte rispetto a tutti gli altri nel calcolo tramite LCA. Questa condizione è stata applicata nel bando dei tre Drechtsteden. Il vantaggio è quello di avere un'analisi non disturbata dall'incidenza del modulo B6 e di concentrarsi maggiormente sugli aspetti materici degli apparecchi.

4.3 LINEE GUIDA SULLA CIRCOLARITÀ PER L'ILLUMINAZIONE PUBBLICA OLANDESE

Il documento viene pubblicato nel 2023 dalla fondazione OVLNL con il contributo finanziario dell'Area Metropolitana di Amsterdam (MRA)³².

La Fondazione Olandese per l'Illuminazione Pubblica (OVLNL), istituita nel dicembre 2015, ha l'obiettivo di rappresentare il settore dell'illuminazione pubblica nei Paesi Bassi e di promuoverne lo sviluppo attraverso iniziative di ricerca, consulenza e cooperazione con soggetti pubblici e privati. Le attività della fondazione comprendono la promozione di studi e ricerche, la definizione di standard di riferimento, la pubblicazione di criteri tecnici e operativi, nonché la diffusione di informazioni a supporto della transizione verso modelli più sostenibili e innovativi nel campo dell'illuminazione urbana. Fanno parte dell'organizzazione quattro settori: ricerca, luce e ambiente, società, eventi e comunicazione. Partecipano persone fisiche, giuridiche e enti, con la supervisione di comitati specifici per i vari settori.³³

La guida è suddivisa in tre parti: la parte A fornisce le informazioni chiave sulla circolarità, sul perché è necessario approfondire l'argomento, sul come e cosa si può fare, sul quando bisogna agire e verso chi è rivolta la guida. La parte B è specifica sull'illuminazione pubblica e analizza le diverse fasi del settore con idee e soluzioni per la circolarità. Infine, nella parte C vengono descritti e forniti alcuni esempi di strumenti utili per il controllo della circolarità.

Di seguito i contenuti della guida.

La parte A, informazioni chiave sulla circolarità, non verrà analizzata nel dettaglio in quanto i contenuti principali sono già stati descritti precedentemente in questa tesi. I principali punti toccati riguardano:

- L'uso eccessivo di materie prime
- Obiettivi olandese ed Europei con le agende 2030 e 2050
- Le strategie della circolarità: "le sei R"
- Le fasi del ciclo vita di prodotti e progetti
- Le figure e stakeholder inclusi nella transizione

La parte B della guida descrive soluzioni circolari per l'illuminazione pubblica olandese. Per quanto riguarda i prodotti vengono considerati: pali, corpi illuminanti, sorgenti illuminanti, cavi e tubi, armadi elettrici. I servizi che influiscono sulla circolarità del settore sono: progettazione, installazione, gestione, manutenzione ordinaria e straordinaria per guasti e malfunzionamenti. Viene subito sottolineata l'importanza della partecipazione dei vari stakeholders, quali ad esempio: progettisti, fornitori, installatori, consulenti, appaltatori

³² Beatrijs Oerlemans, Fondazione OVLNL, “*Leidraad Circulariteit*”, 2023, disponibile su: <https://ovlnl.nl/>

³³ Fonte: <https://ovlnl.nl/over-ovlnl>

urbanisti. Tutti questi protagonisti devono sottostare a normative e regole specifiche per il loro campo, ma senza dimenticarsi di partecipare all'obiettivo comune della circolarità.

La guida è strutturata per seguire il ciclo vita dell'interno progetto: la fase di progettazione, la fase di acquisizione dei prodotti e la loro installazione, la gestione e la manutenzione degli impianti e infine la loro dismissione. Per ogni passaggio vengono descritte le strategie che si possono applicare e vengono forniti degli esempi virtuosi. Tutte le fasi vengono descritte utilizzando secondo il *paradigma delle R*, descritto nel paragrafo “2.2 PARADIGMA DELLE R” di questa tesi.

4.3.1 FASE DI PROGETTAZIONE E INIZIATIVA

L'attuale visione della circolarità consiste nell'immaginare una soluzione diversa per il riciclo e\o riuso dei materiali, ma i processi più impattanti per la circolarità risiedono nella fase di progettazione, dove si può influire sul **Ridurre (R2)** e **Ripensare (R1)**. Le scelte effettuate qui definiranno la quantità di materiali utilizzati dopo.

SCALA R	DESCRIZIONE	SOGGETTI COINVOLTI
R1	<i>Ripensare</i>	<i>Amministrazione\committenza</i>
R2	<i>Ridurre</i>	<i>Progettisti\designer</i>

Il primo fattore che influisce sulla progettazione circolare è rappresentato dalle scelte della **committenza**. Le decisioni iniziali devono essere prese con attenzione, orientate verso benefici futuri, anche se ciò comporta una spesa iniziale più elevata. È fondamentale che la pubblica amministrazione abbia una chiara comprensione del tipo di progetto richiesto, sia esso un progetto ex-novo o un intervento su impianti esistenti. I **progettisti** devono rispettare i requisiti illuminotecnici obbligatori, ma esistono varie modalità per raggiungere tali standard, e le soluzioni adottate possono avere un impatto significativo anche sull'ambiente. Sebbene non sia ancora possibile realizzare un progetto di illuminazione completamente circolare, il contributo dei progettisti è cruciale per ottenere risultati migliori. Infine, i **designer** dei prodotti utilizzati partecipano attivamente alla fase di progettazione, con particolare attenzione alla scelta dei materiali, alla facilità di riparazione e alla durata dei prodotti.

Scheda guida per l'inclusione della circolarità nella progettazione illuminotecnica:

ARGOMENTO	DESCRIZIONE
OBIETTIVO	Incorporare la circolarità in un progetto di illuminazione.
CHI	Committenza e progettisti.
PERCHÈ	Risparmio materico ed energetico durante il ciclo di vita del progetto.
COME	<p>Si possono adottare diverse soluzioni, ad esempio:</p> <ul style="list-style-type: none">• Definire quali sono gli spazi dove è necessaria l'illuminazione e dove no, non posizionare più luce del necessario.• Collegare funzioni di illuminazione con altre architettoniche e urbanistiche.• Cercare di sfruttare la facciata dei palazzi per avere meno sostegni.• Risparmiare materiale utilizzando lo stesso sostegno per apparecchi diversi con fasci luminosi differenti.
PUNTI INTERESSANTI	Il committente deve fare una richiesta circolare specifica e il lighting designer deve essere coinvolto fin da subito.

Il caso studio portato all'interno della guida è il progetto della piazza **18 September a Eindhoven** di Massimiliano e Doriana Fuksas per la parte architettonica e urbanistica e di **Signify** per la progettazione illuminotecnica esterna. L'opera, realizzata nel 2010, utilizza l'illuminazione sotterranea del parcheggio, posizionato al centro della piazza, per illuminare l'area ciclo-pedonale superiore attraverso vetrate e piastrelle semitrasparenti in vetro cemento. L'illuminazione viene completata da proiettori posti sui tetti degli edifici perimetrali e utilizzati quando aumenta la necessità di luce (durante i momenti più affollati della piazza). La circolarità di questo masterplan dipende proprio dal fatto che i progettisti hanno sfruttato la necessità di avere un parcheggio sempre illuminato durante la notte per illuminare indirettamente lo spazio pubblico, senza dover aggiungere ulteriori elementi in superficie. L'esempio mostra come la progettazione possa influire sul ciclo vita dell'intero progetto in quanto le scelte portano ad una riduzione, **R2**, di materiali utilizzati che dovranno poi essere gestiti e smaltiti a fine vita.



Figura 10 Piazza 18 settembre, Eindhoven, fonte immagine: Beatrijs Oerlemans, Fondazione OVLNL, “Leidraad Circulariteit”, 2023, pag. 17

4.3.2 FASE DI ACQUISTO E REALIZZAZIONE

Le scelte fatte durante la fase di acquisto dei prodotti influiscono la realizzazione, l'utilizzo e il riciclo. Il primo input può arrivare direttamente dai governi includendo negli appalti pubblici dei requisiti circolari per l'acquisto di prodotti per l'illuminazione pubblica. Questo comporta uno stimolo a migliorare per i produttori e una scelta mirata per i progettisti che si affacciano agli appalti.

I fattori che influiscono sull'acquisto di materiali sono:

- Cosa si sta acquistando: servizi o prodotti.
- Come si acquista: contratto privato o bando pubblico
- Da chi si acquista: fornitore o appaltatore dei lavori
- Cosa si richiede: specifiche funzionali o tecniche

I fattori da tenere in considerazione durante la fase di realizzazione dell'opera sono:

- Come vengono gestiti i materiali da imballaggio

- Come vengono trattati i vari rifiuti
- Quali modalità di trasporto vengono utilizzate e quali sono le distanze percorse
- I veicoli utilizzando carburati fossili o energia elettrica

SCALA R	DESCRIZIONE	SOGGETTI COINVOLTI
R2	<i>Ridurre</i>	<i>Progettisti\designer</i>
R3	<i>Riutilizzo</i>	<i>illuminotecnico</i>
R4	<i>Rigenerazione, riparazione</i>	<i>Produttori</i>

Scheda guida per l'inclusione della circolarità negli acquisti e nelle gare d'appalto dei prodotti:

ARGOMENTO	DESCRIZIONE
OBIETTIVO	Incorporare la circolarità nella fase di acquisto e installazione dei prodotti
CHI	Governi, progettisti, installatori e produttori
PERCHÈ	La scelta in fase di acquisto influisce su tutto il ciclo vita del prodotto Si possono adottare diverse soluzioni, ad esempio: <ul style="list-style-type: none"> • Utilizzo di metodi di calcolo come LCA e MKI. • Prodotti riparabili, intercambiabili. Utilizzo di connettori universali (tipo Zhaga), driver e componenti LED facilmente sostituibili e armatura facilmente apribile con strumenti di uso comune (cacciaviti standard).
COME	<ul style="list-style-type: none"> • Passaporto dei materiali per capire la composizione e le caratteristiche di un prodotto, facilitandone il riuso, il riciclo e l'integrazione in un'economia circolare. • Valutazione attenta della fine del ciclo di vita e responsabilità sul prodotto (resi, garanzie)
PUNTI INTERESSANTI	La valutazione nella scelta tra i fornitori è fondamentale per migliorare la circolarità in fase di acquisto. La chiarezza nelle informazioni sarà fondamentale per la vendita di prodotti da parte dei produttori.

4.3.3 FASE DI GESTIONE, MANUTENZIONE, DURATA

Durante la fase di utilizzo il consumo di energia ha un impatto importante, bisogna scegliere il miglior pacchetto energetico possibile. La gestione e la manutenzione incidono poi sulla durata dei prodotti e proprio in questo modo si può incidere sulla circolarità del progetto

illuminotecnico. Bisogna quindi rallentare il ciclo vita dei materiali, estendendone la durata e sostituendoli solo se strettamente necessario.

SCALA R	DESCRIZIONE	SOGGETTI COINVOLTI
R3	<i>Riutilizzo</i>	<i>illuminotecnico</i>
R4	<i>Rigenerazione, riparazione</i>	<i>Produttori</i>

Scheda guida per l'inclusione della circolarità nella fase di utilizzo:

PRODOTTO	SOLUZIONI
CORPI ILLUMINANTI	<p>Le possibili operazioni per estendere la durata sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Riparazione: scegliere solo apparecchi che possono essere riparati, stipulare accordi per la riparazione o per i componenti da sostituire e valutare i report forniti dai produttori sui guasti. • RETROFIT LED: sostituire solamente la sorgente con un LED a basso consumo. In questo caso si utilizzeranno le stesse armature già presenti. • RIPRISTINO: valutare la possibilità di ricondizionare gli apparecchi tramite laboratori specializzati • RIUTILIZZO: valutare la possibilità di riutilizzare gli apparecchi altrove.
PALI	<p>Le opzioni per estendere la vita sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ispezioni: eseguire ispezioni visive e strumentali frequenti per determinare lo stato di conservazione a organizzare attività di manutenzione. • Rimessa a nuovo: ripristino dei pali usurati.
CAVI	<p>Le operazioni per estendere la vita dei cavi sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Riparazioni mirate: esami visivi per valutare la qualità dei cavi e sostituire\riparare solo se necessario.

Il caso studio portato nella guida per questa fase è il progetto dei comuni di Assen, Montad e Nedal di riparazione e ristrutturazione dei pali per illuminazione pubblica del 2019. Sono stati rimossi 75 pali a fine vita, vetusti da sostituire, e sono stati ripristinati e restaurati in fabbrica. Il processo si compie attraverso una prima ispezione visiva che ne individua i principali danni, successivamente vengono ripristinati e testati in maniera completa per poter essere nuovamente utilizzati. Il ripristino garantisce inoltre la modularità dei pali per le successive manutenzioni.

Successivamente è stata predisposta una banca online dei pali ripristinati (disponibile al sito: <https://mastenbank.nl/>) dove è possibile acquistare i pali ripristinati.

Il sistema si dimostra fortemente circolare in quanto allunga la durata della vita dei pali e li immette come nuovi nel mercato pronti da utilizzare senza aver consumato ulteriori materiali.



Figura 11 Fonte immagine: Beatrijs Oerlemans, Fondazione OVLNL, "Leidraad Circulariteit", 2023, pag. 23

4.3.4 FASE DI DEMOLIZIONE E RICICLAGGIO

Il prodotto è a fine vita e bisogna sostituirlo, è importante mantenere all'interno della filiera la maggior quantità possibile di materie prime di alta qualità. Occorre riciclare i materiali, senza perderne qualità (downcycling), per poterli utilizzare in altri prodotti funzionali.

SCALA R	DESCRIZIONE	SOGGETTI COINVOLTI
R5	<i>Riciclo</i>	<i>Vari</i>
R6	<i>Recupero</i>	<i>Vari</i>

La maggior parte del materiale da riciclare deriva da:

- PALI: i sostegni vengono prevalentemente realizzati in acciaio o in alluminio, risorse preziose e spesso riciclate nel modo corretto. La maggior parte delle lavorazioni di riciclo consistono nel fondere il materiale e lavorarlo a nuovo. Il metodo è efficace, ma consuma molta energia.
- CORPI ILLUMINANTI: gli apparecchi sono costituiti da tanti materiali differenti, inoltre si tratta di un dispositivo elettrico, per cui lo smaltimento deve essere effettuato da un trasformatore riconosciuto CENELEC. In Olanda non è permesso a chi gestisce gli impianti di smontare le apparecchiature elettriche e di rimuovere le componentistiche di valore.

Scheda guida per l'inclusione della circolarità negli acquisti e nelle gare d'appalto dei prodotti:

ARGOMENTO	DESCRIZIONE
OBIETTIVO	Raccogliere gli apparecchi e garantire che raccolgano un centro ecologico certificato
CHI	Governi e installatori
PERCHÈ	Contribuisce alla circolarità e rispetta obblighi legali
COME	Il certificato deve essere rilasciato una volta che vengono portati i prodotti al centro ecologico.
PUNTI INTERESSANTI	La fondazione OPEN si assume la responsabilità legale del produttore per i rifiuti elettronici. Tramite una campagna stimola la raccolta e il riciclaggio dei rifiuti elettronici, fornisce un servizio di raccolta ed elaborazione dei dati gratuita e un compenso per il materiale che viene scartato.

Nell'ultima parte della guida vengono presentati alcuni strumenti utili ad una progettazione circolare per il settore della pubblica illuminazione in Olanda. Vengono utilizzati:

1. **STRUMENTI PER L'ACQUISTO:** vengono forniti alcuni siti che supportano il progettista ad acquistare prodotti circolari.
2. **LCA e MKI:** si sottolinea l'importanza dei due metodi applicati agli appalti pubblici.
3. **NORMATIVE EUROPEE:** vengono presentate le normative emesse dall'Unione Europea volte a garantire determinati standard di circolarità (es. NEN45554).
4. **PASSAPORTO MATERIALI:** la redazione di un passaporto dei materiali permette di conoscere la composizione in quantità dei singoli prodotti e permette di effettuare scelte più circolari in base alla specifica conoscenza dei materiali.
5. **ILLUMINAZIONE INTELLIGENTE:** adottare scelte di illuminazione intelligente può contribuire alla sostenibilità e alla circolarità. Vengono poi spiegate nel dettaglio alcune scelte tecnologiche per adottare sistemi "intelligenti".

5 PROPOSTA DI UNA GUIDA PER LA CIRCOLARITÀ DELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA RISPETTO ALLE FASI DEL CICLO VITA DEGLI IMPIANTI

5.1 INTRODUZIONE E DESCRIZIONE STRUTTURA

La guida che segue ha come obiettivo quello di suggerire possibili strategie per implementare la circolarità nel settore dell'illuminazione pubblica. In Italia, l'applicazione dei principi di economia circolare in questo settore risulta ancora limitata e frammentaria. Come mostrano i casi studio italiani analizzati, si tratta di un tema poco approfondito, spesso circoscritto alle sole fasi progettuali, trascurando invece aspetti fondamentali come la gestione e la manutenzione degli impianti.

Lo sviluppo tecnologico negli ultimi anni ha portato al risparmio energetico, adottando su larga scala le sorgenti a LED, da adesso in poi bisogna prestare la giusta attenzione anche ai materiali e al loro impatto ambientale durante tutto il ciclo vita di ogni componente.

La guida è strutturata per fasi del ciclo vita degli impianti, suddivise in tre macro categorie:

- 1. Fase di progettazione**
- 2. Fase di utilizzo e manutenzione**
- 3. Fase di dismissione\riciclo**

STRUTTURA PER FASI



Figura 12 Icone fasi del ciclo vita degli impianti che verranno utilizzate all'interno della guida. Fonte: Andrea Arnaudo

Dopo una descrizione della fase analizzata, vengono presentate le **LINEE GUIDA**, proposte progettuali e suggerimenti operativi finalizzati ad aumentare il grado di circolarità in quella specifica fase del ciclo di vita degli impianti. Per ciascuna linea guida vengono specificati:

- FASE: identificazione di una delle quattro fasi del ciclo di vita analizzate.
- OBIETTIVO: breve descrizione della finalità della linea guida.
- STRATEGIA: descrizione delle modalità operative per raggiungere l'obiettivo.
- RIFERIMENTO SCALA R: indicazione degli obiettivi secondo il *paradigma delle R*.
- SOGGETTI COINVOLTI: elenco degli attori interessati e responsabili nell'applicazione della linea guida.

Per ogni linea guida è associata una **SCHEDA ESEMPIO**, finalizzata a illustrare concretamente i principi e le indicazioni contenute nella linea guida stessa. Gli esempi presentati includono: progetti realizzati, proposte progettuali teoriche, soluzioni tecnologiche alternative e guide operative per il miglioramento di specifici processi. Tutti questi esempi sono accomunati dall'obiettivo di perseguire i principi dell'economia circolare, quali ridurre, ripensare, riutilizzare, riparare e riciclare.



Figura 13 Schema struttura guida. Fonte Arnaudo Andrea

5.2 FASE DI PROGETTAZIONE

La fase di progettazione rappresenta un momento cruciale per determinare l'impatto ambientale e la sostenibilità di un sistema. È in questa fase che si possono prendere le decisioni più rilevanti per indirizzare il ciclo di vita dei prodotti utilizzati verso un modello circolare. Una progettazione accurata degli impianti consente di ridurre sin dall'inizio l'utilizzo di materiali, con una conseguente riduzione degli impatti ambientali.

Il processo progettuale coinvolge una molteplicità di attori e richiede una stretta collaborazione tra pubblico e privato. L'iniziativa, di norma, è avviata da un ente pubblico, l'amministrazione comunale, che decide di esternalizzare la gestione dell'illuminazione pubblica affidandola a un operatore privato. La selezione di quest'ultimo avviene attraverso una gara d'appalto, in seguito alla quale l'ente aggiudicatario assume la responsabilità della progettazione, realizzazione e gestione degli impianti per un periodo definito, generalmente pluriennale.

Durante questa fase, un ruolo chiave è svolto dai progettisti. Essi si occupano di sviluppare soluzioni tecniche che comprendono:

- La selezione degli apparecchi illuminanti, effettuata sulla base di calcoli illuminotecnici che garantiscano efficienza e conformità alle normative.
- L'analisi energetica, mirata a valutare il consumo complessivo e a individuare opportunità di risparmio.
- Gli interventi necessari su infrastrutture come sostegni e linee elettriche, per ottimizzarne le prestazioni e ridurre l'impatto ambientale.
- Le scelte tecnologiche legate alla telegestione degli impianti, che consentono un controllo più preciso e una maggiore efficienza operativa.
- La pianificazione operativa degli interventi di manutenzione, essenziale per garantire la durabilità del sistema e ridurre i costi di gestione a lungo termine.
- Le scelte ambientali adottate durante il periodo di gestione, con particolare attenzione al riciclo e al riuso dei materiali.



Questa fase di progettazione rappresenta, quindi, non solo un momento strategico per massimizzare l'efficienza tecnica ed economica, ma anche un'opportunità per integrare i principi dell'economia circolare nella gestione delle risorse e nell'adozione di tecnologie innovative.

Di seguito due proposte per aumentare la circolarità nella fase di progettazione con un esempio legato alla riqualificazione di un impianto esistente e uno che riguarda lo scenario di una realizzazione ex-novo.



LINEA GUIDA 1: RIQUALIFICAZIONE IMPIANTO ESISTENTE

FASE	PROGETTAZIONE
OBIETTIVO	RIDURRE IL QUANTITATIVO DI MATERIALI UTILIZZATI
STRATEGIA	SOSTituIRE I CORPI ILLUMINANTI ESISTENTI CON SOLUZIONI ALTERNATIVE PER UTILIZZARE MENO MATERIALI
RIFERIMENTO SCALA R	RIPENSARE (R1), RIDURRE (R2)
SOGGETTI COINVOLTI	PROGETTISTI

DESCRIZIONE: la **LINEA GUIDA 1** propone la riprogettazione di un impianto di illuminazione pubblica esistente ai fini di diminuire la quantità di materiali utilizzati e di ridurre i tempi di lavorazione per la manutenzione degli elementi.

La prima operazione da fare è la raccolta dati, occorre avere ben chiaro le quantità sulle quali si sta progettando e le caratteristiche di tutti i componenti degli impianti, fondamentali sono:

- Numero di sostegni coinvolti (per sostegno si intende il palo oppure lo sbraccio a parete)
- Materiale e stato dei sostegni
- Caratteristiche dei sostegni (diametro, altezza, presenza di sbracci)
- Numero di apparecchi illuminanti
- Geometria stradale dell'area da illuminare (centro storico, parcheggio, autostrada)

Una volta raccolti i dati devono essere analizzati per valutare quali sono le criticità su cui intervenire e quali elementi possono essere sostituiti con l'obiettivo di ridurre il quantitativo di materiali utilizzati per l'impianto soggetto alla riqualificazione.

Per raggiungere questo obiettivo non è necessario intervenire solo sui sostegni o sulle strutture di supporto: è possibile anche ripensare la tipologia di corpo illuminante utilizzato. Ad esempio, adottare apparecchi con una maggiore efficienza ottica permette di illuminare aree più ampie con meno punti luce, contribuendo così a diminuire la quantità complessiva di materiali impiegati e a semplificare l'impianto.

A supporto della **linea guida 1** viene presentata di seguito una **scheda esempio** in cui si ipotizza la sostituzione di una soluzione classica di mensola con lanterna con una alternativa che utilizza dei proiettori staffati alle pareti.

LINEA GUIDA 1 – SCHEDA ESEMPIO

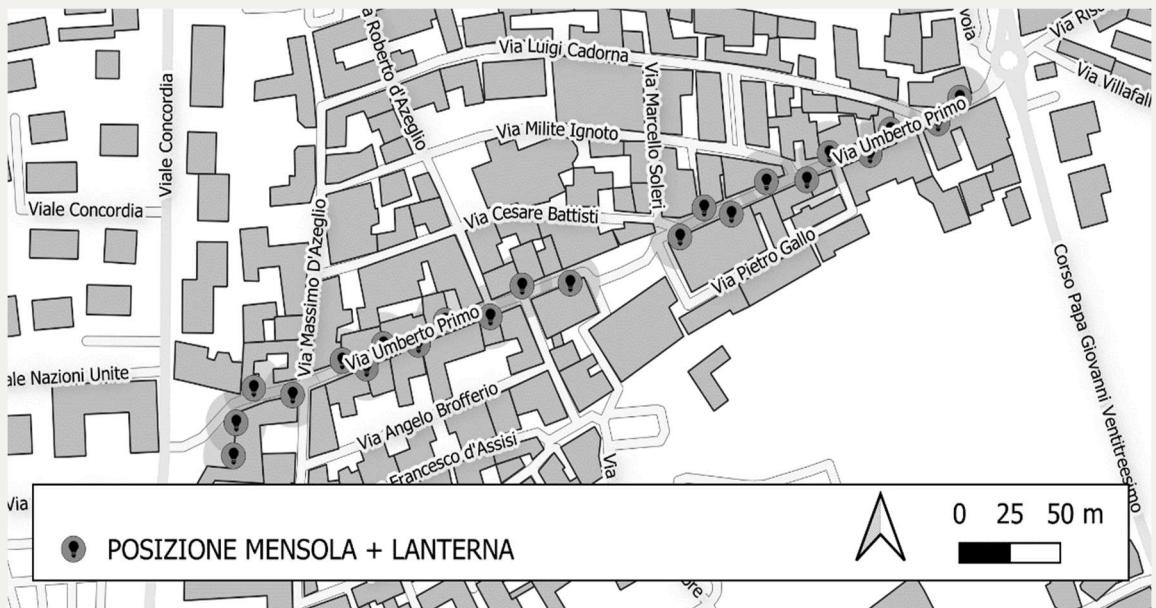


Figura 14 Inquadramento territoriale. Fonte: Arnaudo Andrea

L'esempio proposto in questa scheda descrive la possibile alternativa per la riqualificazione dell'illuminazione pubblica lungo Via Umberto I a Busca, con l'obiettivo di ridurre il consumo di materiali e di ottimizzare i tempi impiegati per la manutenzione.

Nel contesto della scheda esempio per la linea guida, si ipotizza la sostituzione di un sistema tradizionale costituito da mensola e lanterna con proiettori LED staffati a parete. L'obiettivo è valutare, con questa simulazione, i potenziali benefici della soluzione proposta in termini di riduzione dei materiali impiegati e diminuzione dei costi di manutenzione, con particolare attenzione al tempo necessario per gli interventi. L'aspetto illuminotecnico non viene preso in considerazione perché si stima l'utilizzo di apparecchi con un consumo elettrico uguale.

Situazione attuale e criticità. Attualmente, l'illuminazione della via è affidata a 22 lanterne sostenute da mensole. Questo sistema presenta alcune criticità:

- Le mensole in alluminio sono ingombranti, pesanti e costose da realizzare e installare.
- Costi di manutenzione elevati: le strutture in alluminio necessitano di trattamenti contro la corrosione, verniciature e verifiche strutturale regolari nel corso del tempo. Dato che si trovano in quota è sempre necessario spostare un mezzo con cestello per permettere all'operatore di raggiungerle.

Soluzione Progettuale. L'ipotesi progettuale prevede la rimozione delle 22 mensole in alluminio e la sostituzione con proiettori LED, installati su staffe in acciaio direttamente ancorate alle facciate degli edifici.

Vantaggi del nuovo sistema:

- Riduzione dell'uso di materiali: eliminando le mensole in alluminio, si riducono peso e costi di produzione.
- Facilità di installazione: le staffe sono più leggere e richiedono meno manodopera per il montaggio.
- Manutenzione ridotta: le staffe in acciaio sono resistenti agli agenti atmosferici e necessitano di minori interventi nel tempo.

Per l'analisi dell'esempio si sono stimate le caratteristiche dello stato di fatto assimilando quanto presente con modelli e prodotti equivalenti e la soluzione progettuale con un prodotto disponibile sul mercato. Di seguito le tabelle:

MENSOLA ESISTENTE – STATO DI FATTO	
MODELLO	<i>TAGLIAFICO LIGHTING LYONNAISE</i>
DIMENSIONI	<i>570 mm x 1080 mm</i>
COMPOSIZIONE MATERICA	<i>ALLUMINIO</i>
VERNICIATURA	<i>RESINE POLIESTERE</i>
PESO	<i>13,5 kg</i>

LANTERNA ESISTENTE – STATO DI FATTO	
MODELLO	<i>Schréder stylage</i>
DIMENSIONI	<i>373 mm x 705 mm x 373 mm</i>
VERNICIATURA	<i>RESINE POLIESTERE</i>
PESO	<i>8,0 kg</i>

STAFFA E PROIETTORE* - PROGETTO	
MODELLO	<i>Optima EDISON</i>
DIMENSIONI	<i>480 x 333 x 100 mm</i>
COMPOSIZIONE MATERICA	<i>ALLUMINIO</i>
VERNICIATURA	<i>-</i>
PESO	<i>7,0 kg</i>

*Il sistema scelto permette di installare l'apparecchio tramite la staffa integrata direttamente alla parete, senza l'aggiunta di ulteriori componenti.

Di seguito vengono stimati i tempi per la manutenzione ordinaria dello stato attuale, mensola e lanterna, e della proposta progettuale, staffa e proiettore.

I dati vengono stimati su esperienza operativa nel settore dell'illuminazione pubblica e su parametri comuni per la manutenzione di strutture in alluminio con corpi illuminanti.

MANUTENZIONE ANNUALE	MENSOLA IN ALLUMINIO E LANTERNA	STAFFA E PROIETTORE
Tempo per verifica strutturale	15 min.	15 min.
Tempo per pulizia vetro e corpo	20 min.	10 min.
Tempo per sostituzione sorgente	30 min.	15 min.
Tempo verniciatura (ogni 5 anni*)	18 min. (90 min. ogni 5 anni)	Non necessaria
Tempo totale per intervento	1 ora 48 min.	40 min.

*viene considerato l'impatto annuale del processo di verniciatura che deve essere eseguito ogni 5 anni (tempo totale diviso 5).

Tabella di comparazione:

PARAMETRO	MENSOLA E LANTERNA	STAFFA E PROIETTORE	RISPARMIO
Peso unitario	21,5 kg	7,0 kg	14,5 kg
Peso totale per 22 elementi	473,0 kg	154 kg	319,0 kg
Manutenzione annuale	1 ora e 48 min.	40 min.	1 ora e 8 min.
Manutenzioni annuale per 22 elementi	39 ore e 36 min.	14 ore e 40 min.	24 ore e 56 min.

In conclusione, l'ipotesi progettuale di riqualificazione dell'illuminazione di Via Umberto I a Busca comporterebbe, rispetto alla configurazione attuale, una riduzione dell'impiego di materiali pari a circa 319 kg e un minor consumo di risorse per la manutenzione, che verrebbe ridotta di quasi 25 ore annuali.

La scelta di sostituire 22 mensole in alluminio e relative lanterne con staffe in acciaio e proiettori consente di soddisfare due dei paradigmi dell'economia circolare noti come "R": RIPENSARE (R1) e RIDURRE (R2). Si tratta, tuttavia, di un intervento realizzabile solo nel caso in cui le mensole e/o le lanterne esistenti si trovino in condizioni tali da richiedere la sostituzione, ovvero abbiano raggiunto la fine del proprio ciclo di vita. In alternativa, si potrebbe valutare il riutilizzo delle componenti dismesse in contesti decorativi, come ad esempio cortili di edifici comunali, oppure conservarle come parti di ricambio.

Tuttavia, l'esempio è stato inserito a scopo di dimostrare che è possibile in fase di progettazione, in questo caso su un impianto esistente, ridurre significativamente la quantità di materiali utilizzati e di ciò che ne consegue per la gestione della loro manutenzione nel tempo.

LINEA GUIDA 2: PROGETTAZIONE NUOVO IMPIANTO CON FONDAZIONI A VITE

FASE	PROGETTAZIONE
OBIETTIVO	REALIZZAZIONE NUOVI IMPIANTI SENZA UTILIZZARE IL CALCESTRUZZO
STRATEGIA	UTILIZZARE LE FONDAZIONI A VITE IN ACCIAIO AL POSTO DEI PLINTI IN CALCESTRUZZO
RIFERIMENTO SCALA R	RIDURRE (R2)
SOGGETTI COINVOLTI	PROGETTISTI, FORNITORI DI COMPONENTI

DESCRIZIONE: la **LINEA GUIDA 2** propone l'utilizzo di fondazioni a viti in acciaio al posto dei classici plinti in calcestruzzo, con l'obiettivo di ridurre l'utilizzo di questo materiale che è difficile da riutilizzare senza downcycling.

La progettazione dei nuovi impianti di illuminazione, a livello nazionale, riguarda prevalentemente tratti stradali attualmente privi di illuminazione, nuove lottizzazioni residenziali, piazze o parcheggi. Sebbene questi interventi rappresentino una quota limitata rispetto al totale dei punti luce esistenti, offrono l'opportunità di adottare soluzioni circolari, rese possibili dai progressi tecnologici e dall'esperienza maturata rispetto a impianti realizzati mediamente 10-15 anni fa. Un aspetto centrale nella progettazione di un nuovo impianto è la selezione dei prodotti. Ogni componente, a seconda della tipologia e dei materiali impiegati per la sua realizzazione, influenza non solo sulle prestazioni tecniche complessive, ma anche sull'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita. Di seguito l'elenco delle componentistiche principali che possono essere presenti, descritti per tipologia e materie prime utilizzate:

- Fondazioni (plinto): calcestruzzo, acciaio (nel caso di piastre e tirafondi)
- Bulloneria: acciaio
- Palo di sostegno: acciaio zincato, alluminio, ghisa.
- Mensole e sbracci: acciaio zincato, alluminio, ghisa.
- Cavi elettrici: rame (conduttore) e PVC (isolante)
- Morsettiera e componenti elettrici di connessione: plastica e rame (contatti elettrici)
- Apparecchio illuminante: alluminio (struttura), plastica/metacrilato/policarbonato (diffusore/lente), vetro temperato, componenti elettronici.
- Accessori vari (protezioni, staffaggi, dissipatori): alluminio, acciaio, plastica.

La tabella che segue mostra i principali materiali utilizzati e la loro possibilità di essere riciclati. Nello specifico verrà indicato la percentuale di riciclaggio e la possibilità di riutilizzo senza downcycling.

“Il downcycling è il fenomeno di riduzione della qualità dei materiali riprocessati dai rifiuti rispetto alla loro qualità originale, si possono distinguere tre forme principali: termodinamico, funzionale ed economico”. La definizione viene pubblicata dal *Journal of Industrial Ecology* nel maggio 2022³⁴

Di seguito l'elenco dei materiali utilizzati e la possibilità di riciclo del materiale stesso:

Materiale	Riciclabilità	Riutilizzo senza down cycling	Note
Acciaio zincato	100%	Sì, se integro	Può essere riutilizzato per nuovi pali o altre strutture. Se danneggiato, si ricicla facilmente mantenendo le proprietà.
Alluminio	100%	Sì	Riciclabile più volte senza perdita di qualità. Può essere rifiuto e riutilizzato in apparecchi illuminanti o strutture.
Plastica (PVC, policarbonato...)	Parziale (30–60%)	Difficile	Dipende dal tipo. Alcune plastiche tecniche si possono riutilizzare in componenti simili, ma spesso si degradano.
Rame	100%	Sì	Uno dei materiali più riciclati senza perdita di qualità. Viene rifiuto e usato in nuovi cavi o componenti elettrici.
Vetro temperato	Difficile	Limitato	Il vetro temperato non si rifonde facilmente. Può essere riutilizzato se integro (es. come copertura).
Gomma/Silicone	Bassa	No	Difficile da riciclare senza degrado. Spesso si brucia o si recupera solo energia.
Ottone / Leghe conduttrive	100%	Sì	Valore alto, si rifonde e si riutilizza senza problemi.

³⁴ Helbig Christoph, Huether Jonas, Joachimsthaler Charlotte, Lehmann Christian, Raatz Simone, Thorenz Andrea, Faulstich Martin, Tuma, Axel. “A terminology for downcycling”, 2022, Journal of Industrial Ecology. 26. 10.1111/jiec.13289.

Calcestruzzo	Parziale	No diretto	Può essere frantumato come inerte ma non riutilizzabile come calcestruzzo strutturale. È downcycling.
--------------	-----------------	-------------------	---

Tra i materiali impiegati nel sistema, il calcestruzzo utilizzato per i plinti di fondazione risulta particolarmente critico, sia per l'impossibilità di riutilizzo senza downcycling, sia per la quantità significativa impiegata. Il caso studio di Gabicce Mare, analizzato nel capitolo precedente, evidenzia come il calcestruzzo rappresenti circa l'83% del peso complessivo dei materiali utilizzati.

A supporto della **linea guida 2** viene presentata di seguito una **scheda esempio** in cui verranno descritti i vantaggi derivanti dalla sostituzione dei plinti in calcestruzzo con fondazioni a vite in acciaio.

LINEA GUIDA 2 – SCHEMA ESEMPIO

La scheda esempio seguente propone la sostituzione dei tradizionali plinti in calcestruzzo con fondazioni a vite in acciaio, evidenziandone i principali vantaggi.

La soluzione tecnologica è fornita Start Up italiana Atlantech Lux ed è applicabile a nuove realizzazioni. Di seguito sono riportate le caratteristiche tecniche del sistema adottato, così come dichiarate dal produttore³⁵:

- Sostenibilità ambientale:** eliminando l'utilizzo del calcestruzzo si riducono di molto le emissioni di CO₂ e i kg di materie prime utilizzate. Inoltre, l'acciaio è riciclabile senza downcycling al 100%. Secondo i dati forniti dal produttore, la soluzione consente una riduzione delle emissioni di CO₂ compresa tra il 30% e il 40%, considerando l'intero ciclo di vita del prodotto, inclusi produzione, trasporto e dismissione. Tali risultati sono supportati da un'analisi Life Cycle Inventory (LCI), realizzata dall'Atlantech Lux, relativa all'installazione di 200 pali di altezza compresa tra 7 e 8 metri: l'impiego di plinti in calcestruzzo comporta un'emissione di circa 23 tonnellate di CO₂, contro le 16 tonnellate associate all'uso di fondazioni a vite. L'analisi non tiene conto dei tempi e delle operazioni necessarie per la posa in opera
- Installazione rapida:** il tempo di installazione di un sostegno con fondazione è di 15 minuti, una riduzione del 75% rispetto ai metodi tradizionali. I tempi di

³⁵ Fonte: <https://www.atlantech.it/>

installazione minori permettono di risparmiare in termini di impatto ambientale perché si riduce drasticamente l'uso di mezzi di lavoro inquinanti. I passaggi da seguire per l'installazione di una fondazione a vita sono: realizzazione del foro o dello scavo per l'alloggiamento della box, infissione del dispositivo a vite all'interno del foro, posa e fissaggio del telaio con chiusino sulla box, posa del palo di illuminazione e collegamenti elettrici ed infine chiusura della box con pozzetto in ghisa su misura.

- 3. Versatilità:** data la semplicità di installazione e il poco spazio di scavo la fondazione a vita è adatta a diverse tipologie di pali e terreni, è adatto a spazi ristretti o aree di vincolo, come parchi, aree verdi e viali.

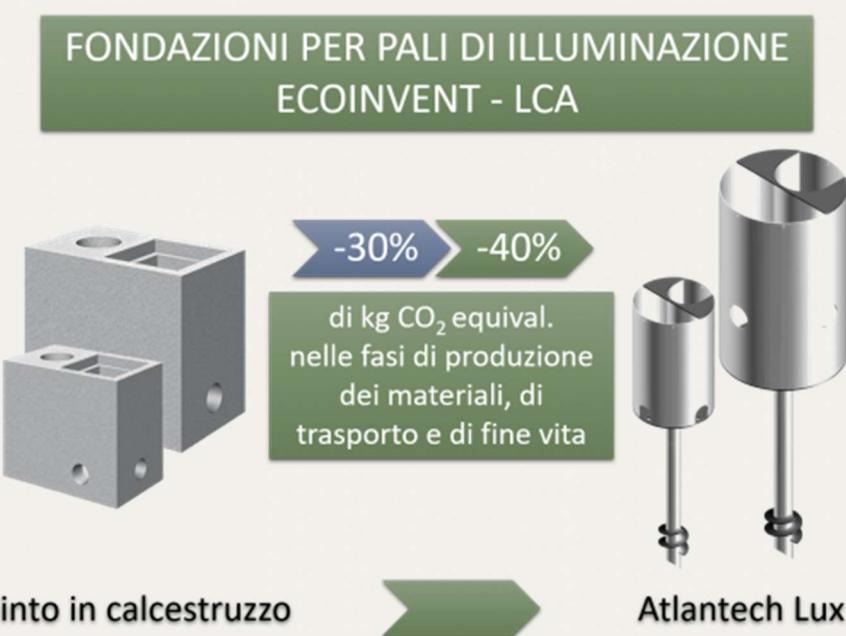


Figura 15 Schema tipologie fondazioni. Fonte *Atlantech*

In conclusione, la scelta di sostituire il plinto in calcestruzzo con una fondazione a vite in acciaio consente una riduzione delle emissioni di CO₂ equivalenti compresa tra il 30% e il 40%. Si riduce l'impatto di CO₂ sia in fase di produzione del prodotto sia in fase di installazione data la maggiore velocità di posa in opera. Inoltre, la possibilità di rimuovere e reinstallare facilmente la fondazione rende il sistema un esempio concreto di progettazione sostenibile e reversibile. Il prodotto può essere impiegato per l'intero ciclo di vita senza perdita di prestazioni e, al termine del suo utilizzo, completamente riciclato senza subire downcycling.

5.3 FASE DI UTILIZZO E MANUTENZIONE

La fase di utilizzo rappresenta un momento determinante per valutare la sostenibilità e l'impatto ambientale di un impianto di illuminazione pubblica nel corso della sua vita operativa. In questa fase si possono valutare le prestazioni reali dei sistemi installati e possono essere adottate pratiche e strategie volte a prolungare la vita utile dei componenti e a ridurre il consumo di risorse. Un utilizzo attento e consapevole consente di ottimizzare l'efficienza energetica e di minimizzare l'impatto ambientale, integrando i principi dell'economia circolare nella gestione quotidiana dell'infrastruttura.

Il prolungamento del ciclo di vita dei prodotti costituisce un principio cardine dell'economia circolare. Nel contesto dell'illuminazione pubblica, i gestori degli impianti possono svolgere un ruolo determinante in questo processo, anche grazie ai lunghi periodi di gestione e manutenzione che caratterizzano tali sistemi. Estendere l'utilizzo dei prodotti comporta una significativa riduzione dei rifiuti e, di conseguenza, una minore domanda di materie prime necessarie per la produzione di nuovi apparecchi. Un esempio in tal senso riguarda i pali di sostegno, per i quali è possibile adottare soluzioni correttive sia durante il ciclo di vita, sia al termine dello stesso, al fine di prolungarne l'utilizzo ed evitare sostituzioni premature.

La fase di manutenzione ordinaria e di intervento riveste a sua volta un ruolo essenziale nel garantire continuità operativa, efficienza e sostenibilità degli impianti. Una gestione adeguata consente di ottimizzare la durata delle infrastrutture e di ridurre al minimo l'impatto ambientale, mantenendo un approccio coerente con i principi dell'economia circolare. Un impianto correttamente manutenuto prolunga la propria vita utile, riduce il consumo di risorse e limita la necessità di interventi straordinari, con benefici diretti sia sul piano economico sia su quello ambientale.



Le principali attività che caratterizzano la fase di utilizzo e manutenzione comprendono:

- Gestione operativa dell'illuminazione, tramite sistemi di monitoraggio e telegestione che permettono di regolare accensione e spegnimento, riducendo sprechi energetici.
- Verifica periodica delle condizioni degli apparecchi e delle infrastrutture, per identificare tempestivamente eventuali anomalie.
- Manutenzione preventiva e correttiva, pianificata per ridurre guasti e minimizzare le emissioni di CO₂ associate agli spostamenti degli operatori.
- Riparazione dei componenti guasti, privilegiata rispetto alla sostituzione integrale per ridurre rifiuti elettronici e consumo di nuove materie prime.
- Implementazione di tecnologie di monitoraggio remoto, che consentono una gestione più predittiva ed efficiente degli interventi.
- Recupero e riciclo delle componenti dismesse, in un'ottica di riduzione dei materiali impiegati e di economia circolare.
- Gestione dell'energia, attraverso il controllo dei consumi e l'adozione di soluzioni a basso impatto ambientale.
- Programmazione di interventi straordinari, per rispondere rapidamente a emergenze o guasti imprevisti, riducendo i disagi per la collettività.
- Formazione e sensibilizzazione del personale e dei cittadini, finalizzate a promuovere comportamenti sostenibili e una maggiore consapevolezza nell'uso delle risorse.

Di seguito vengono presentate tre linee guida finalizzate al miglioramento della sostenibilità nella fase di utilizzo e manutenzione degli impianti di illuminazione pubblica. La prima riguarda l'importanza di una corretta mappatura degli impianti e l'adozione di sistemi di telecontrollo da remoto, strumenti che consentono di ottimizzare la gestione operativa e ridurre le emissioni di CO₂ legate agli interventi sul campo. La seconda linea guida analizza le principali cause di guasto delle lampade LED, proponendo soluzioni pratiche orientate alla riparazione piuttosto che alla sostituzione, in un'ottica di riduzione dei rifiuti elettronici e di risparmio di risorse. Infine, la terza linea guida propone un sistema correttivo per i pali di sostegno, finalizzato a prolungarne la vita utile e a limitare l'impatto ambientale connesso alla produzione e alla sostituzione di nuovi componenti.



LINEA GUIDA 3: GESTIONE DEGLI INTERVENTI. LA CORRETTA MAPPATURA PER RISPARMIO DI CO₂ E L'UTILIZZO DI COMANDI DA REMOTO.

FASE	UTILIZZO E MANUTENZIONE
OBIETTIVO	RIDURRE L'IMPATTO DI CO ₂ DURANTE LE MANUTENZIONI E GLI INTERVENTI SUI GUASTI
STRATEGIA	MIGLIORARE IL SISTEMA GESTIONALE ATTRAVERSO NUOVI APPROCCI TECNOLOGICI
RIFERIMENTO SCALA R	RIDURRE (R2)
SOGGETTI COINVOLTI	PROGETTISTI, MANUTENTORI

DESCRIZIONE: la **LINEA GUIDA 3** propone due possibili soluzioni per ridurre l'impatto di CO₂ generato dalle attività di manutenzione e dalla risoluzione dei guasti negli impianti di illuminazione pubblica

Durante la fase di gestione di un impianto di illuminazione pubblica bisogna far fronte ad una serie di interventi sul campo per la manutenzione e il corretto funzionamento dell'infrastruttura. Considerato l'elevato numero di punti luce, l'estensione territoriale e la durata della concessione, tali attività incidono in maniera significativa sulle emissioni complessive di CO₂.

La maggior parte dei guasti richiede l'uscita di un operatore, che deve raggiungere il sito mediante un veicolo a motore, con conseguente rilascio di emissioni variabili in funzione del tipo di mezzo, del carico e dell'alimentazione. Le segnalazioni vengono classificate per tipologia e gravità, e i tempi di intervento oscillano tra 24 ore e 7 giorni. In alcuni casi l'operatore parte direttamente dal territorio comunale interessato, mentre nei casi di affidamenti in subappalto occorre considerare ulteriori spostamenti.

Considerando l'alto numero di punti luce per ogni città, si tratta di dover raggiungere molti luoghi e percorrere molti km, consumando risorse e emettendo agenti inquinanti. Da qui la necessità di gestire in maniere efficiente questo aspetto legato alla manutenzione dei punti luce.

Per valutare l'incidenza delle uscite si mostra di seguito un conteggio di numero di guasti di un caso studio per il quale ho gestito il portale delle segnalazioni, si tratta del Comune di Negar (VR) per un totale di 3000 punti luce.

NUMERO DI INTERVENTI SU GUASTI	
NUMERO PUNTI LUCE TOTALI	3000
N° GUASTI DAL 01/01/2018 A 31/12/2024	1071
MEDIA ANNUALE	268
TEMPO PER GUASTO	32,7 ore

Inoltre, bisogna tenere conto delle uscite necessarie alla manutenzione ordinaria degli impianti, per cui vengono stimati i seguenti tempi:

Attività	Operazioni	Frequenza
Ispezione visiva	Controllo di lampade, pali, cablaggi e connessioni	Ogni 6 mesi
Pulizia corpi illuminanti	Rimozione di sporco e detriti dalle ottiche	Ogni 6-12 mesi
Verifica elettrica	Controllo di tensione, assorbimento e sicurezza	Ogni 12 mesi
Verifica quadri elettrici	Controllo di protezioni, interruttori e cablaggi	Ogni 12 mesi
Sostituzione lampade (LED)	Verifica efficienza e sostituzione se necessaria	Ogni 8-12 anni
Verifica pali e supporti	Controllo strutturale per corrosione e stabilità	Ogni 5-10 anni

In un perimetro di gestione come quello presentato, ai 268 interventi per guasti bisogna sommare quelle per la manutenzione ordinaria, si stimano circa 280 uscite all'anno. Nella migliore delle ipotesi, il tragitto da percorrere è di 20km (potrebbe essere molto maggiore in base al punto di partenza) con un'emissione di 234g di CO₂\km media³⁶, all'anno si consumerebbero circa 2,62 tonnellate di CO₂.

Alla luce di tali valori, risulta evidente la necessità di ottimizzare gli spostamenti, evitando percorrenze superflue. Nella mia esperienza professionale, la ricerca dei punti luce sul

³⁶ Si ipotizza l'utilizzo di un mezzo tipologico (Ford Transit) e le emissioni sono dichiarate dalla casa produttrice.

territorio si è spesso rivelata complessa e dispendiosa in termini di tempo, contribuendo ulteriormente ad aumentare l'impatto ambientale.

A supporto della **linea guida 3** vengono presentate di seguito due **schede esempio** che propongono due possibili soluzioni finalizzate a rendere più efficiente la gestione e la manutenzione degli impianti:

- **l'impiego di software GIS (Geographic Information System) integrati con sistemi GPS;**
- **il monitoraggio remoto degli impianti tramite sensori IoT.**

LINEA GUIDA 3 – SCHEDA ESEMPIO 1

Questa prima scheda della linea guida 3, per la fase di utilizzo e manutenzione, illustra le operazioni necessarie per implementare un sistema basato su **GIS (Geographic Information System)** e **GPS**, finalizzato alla gestione degli interventi di manutenzione degli impianti di pubblica illuminazione. L'adozione di tale sistema rappresenta una soluzione strategica per migliorare l'efficienza operativa, ridurre i costi e contenere l'impatto ambientale.

Tra i software GIS maggiormente impiegati in ambito pubblico vi è QGIS, una piattaforma open-source flessibile che consente di mappare, analizzare e gestire le infrastrutture territoriali in modo efficiente. Nelle sezioni successive saranno descritte le principali operazioni necessarie per l'implementazione pratica del sistema.

Come funziona: Si crea una base cartografica con la localizzazione esatta di tutti i pali della luce, quadri elettrici, centraline e altri elementi dell'infrastruttura. A ogni punto sulla mappa vengono associati dati specifici, come:

- ID dell'impianto
- Tipologia di lampada (LED, sodio, mercurio, ecc.)
- Data dell'ultima manutenzione
- Stato attuale (funzionante, guasto, in manutenzione, ecc.)
- Quadro di comando
- Caratteristiche geometriche del punto luce (Altezza, materiale, pozzetto, collarino, ecc.)

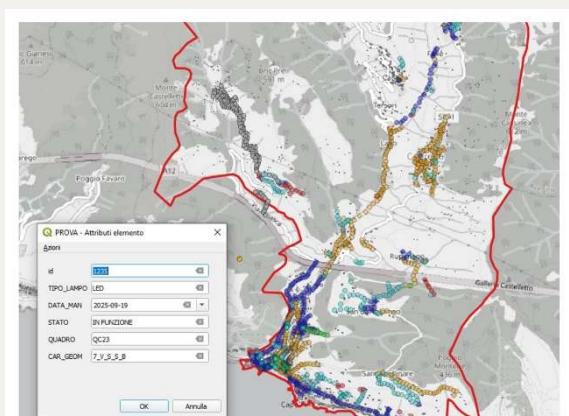


Figura 16 Schermata GIS rappresentante un impianto georeferenziato con tabella degli attributi. Fonte: Andrea Arnaudo

Successivamente, gli operatori ricevono direttamente su un tablet o smartphone le coordinate GPS degli impianti da raggiungere. QGIS, integrato con strumenti di Routing (come OpenRouteService o GRASS GIS), calcola il percorso più efficiente tra i vari punti di intervento, minimizzando il tempo di percorrenza e i consumi di carburante.

I dati possono essere esportati in formato GPX per essere utilizzati su navigatori GPS o app di mappatura come Google Maps. Inoltre, è possibile utilizzare plug-in "QGIS Network Analysis" per calcolare il percorso ottimale tra più punti di intervento e creare delle heatmap per individuare le zone con la maggiore concentrazione di guasti e pianificare interventi collettivi.

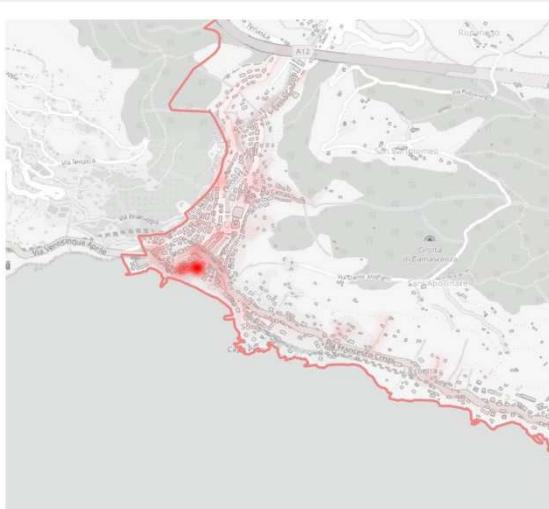


Figura 17 Schermata GIS rappresentante la heatmap del numero di punti luce per concentrazione. Fonte: Andrea Arnaudo

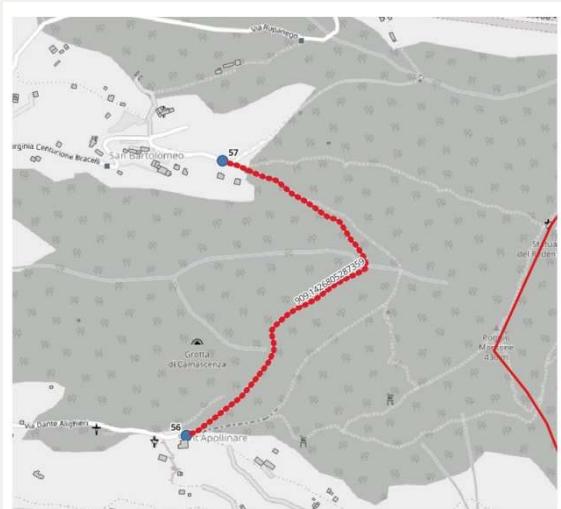


Figura 18 Schermato GIS rappresentante il percorso minimo tra due punti calcolato automaticamente dal software. Fonte: Andrea Arnaudo

Pianificazione intelligente degli interventi: Il sistema GIS permette di programmare in anticipo gli interventi sulla base di dati storici e previsioni. Si possono creare schedulazioni automatiche per la manutenzione ordinaria, riducendo la necessità di interventi straordinari. Gli operatori possono visualizzare in tempo reale gli aggiornamenti sugli impianti e segnalare direttamente eventuali anomalie. Uso del plug-in "QField" per permettere agli operatori sul campo di aggiornare le informazioni direttamente dallo smartphone. Generazione di report geospaziali per monitorare l'andamento delle manutenzioni e individuare punti critici.

I vantaggi derivanti da questo sistema sono:

- Riduzione dei costi operativi: meno chilometri percorsi, risparmio di carburante e meno usura dei mezzi.
- Minori tempi di intervento: maggiore produttività degli operatori.
- Diminuzione delle emissioni di CO₂: migliore pianificazione dei percorsi, meno viaggi a vuoto e minori emissioni.
- Possibilità di integrare veicoli elettrici con stazioni di ricarica strategicamente posizionate.
- Maggiore rapidità ed efficienza degli interventi: gli operatori ricevono istruzioni precise e possono aggiornare i dati in tempo reale. Automazione degli interventi programmati, riducendo il rischio di guasti improvvisi.
- Monitoraggio continuo e analisi dei dati: possibilità di visualizzare trend e statistiche per migliorare la gestione degli impianti. Identificazione delle aree critiche dove si verificano più guasti, per interventi mirati.

LINEA GUIDA 3 – SCHEDA ESEMPIO 2

In questa seconda scheda per la linea guida 3, per la fase di utilizzo e manutenzione, si valuta la possibilità di utilizzare sistemi di telecontrollo per ridurre il numero di interventi sul campo in favore di ripristini da remoto.

I sistemi di telecontrollo punto-punto sono sempre più diffusi nell'ambito dell'illuminazione pubblica, in particolare nei progetti realizzati a partire dal 2023. Tuttavia, tali sistemi comportano costi elevati, poiché richiedono l'installazione di lampade LED nuove con moduli di comunicazione integrati oppure l'adattamento delle lampade LED esistenti mediante l'installazione di moduli aggiuntivi con antenna e driver DALI.

In un'ottica di economia circolare, la proposta descritta in questa scheda interviene direttamente sui quadri elettrici di comando, che gestiscono gruppi di punti luce. Questa scelta consente di ottenere prestazioni analoghe ai sistemi punto-punto riducendo l'impiego di nuovi materiali e i costi di installazione, rappresentando quindi una soluzione più sostenibile e meno impattante.

Il sistema di telecontrollo a quadro *Gestart* rappresenta una soluzione avanzata per la gestione, il monitoraggio e l'ottimizzazione degli impianti elettrici pubblici, in particolare per l'illuminazione urbana. Grazie a un'infrastruttura modulare e scalabile, integra funzionalità intelligenti che vanno ben oltre il semplice controllo da remoto, trasformando i quadri elettrici in hub digitali interconnessi e completamente supervisionabili tramite la piattaforma *GestartWeb*. Lo scopo di tutti i prodotti dell'azienda è quello di minimizzare i disservizi (di conseguenza le uscite per i guasti) e di avere il completo controllo sul monitoraggio del funzionamento e dei consumi³⁷.

³⁷Fonte: <https://www.gestart.info/>

Le caratteristiche principali del sistema sono:

1. **Controllo remoto in tempo reale di interruttori, differenziali e motori di riarmo.**
Lo “scatto del differenziale” è un guasto molto comune, soprattutto per gli impianti con linee di oltre 20 anni di vita. Il picco di tensione necessario ad accendere i dispositivi LED fa superare la soglia dei differenziali, che scattano e l’impianto non si accende, senza un telecontrollo è necessaria l’uscita di un operatore solamente per azionare un interruttore.
2. **Analisi dei consumi elettrici con storizziazione dati.** Il sistema permette di visualizzare e monitorare dal centro di controllo i dati istantanei e storici di consumo e dei parametri elettrici e di impostare alert per consumi inferiori o superiori a quelli a regime dell’impianto.
3. **Gestione flessibile dell'accensione.** 9 modalità di accensione\spegnimento, le più interessanti sono sicuramente le modalità PRIORITARIA e COMBINATA che costituiscono una funzionalità unica sul mercato e che permettono di combinare in contemporanea la sonda crepuscolare digitale e l’orologio astronomico in modo da ottimizzare risparmio energetico e sicurezza ambientale.
4. **Visualizzazione immediata degli allarmi e degli stati quadro.** L’operatore visualizza a colpo d’occhio gli stati dei vari elementi del quadro. Per esempio, tutti gli interruttori monitorati (ON-OFF del generale e delle protezioni di linea) sono raffigurati tramite icone che riportano lo stesso stato dell’interruttore che l’operatore vedrebbe stando di fronte al quadro. Ad ogni evento, forzato dall’operatore o relativo a malfunzionamento, la piattaforma visualizza in tempo reale lo stato dell’impianto e dei relativi interruttori.
5. **Registro eventi dettagliato (con info meteo e geolocalizzazione)** il sistema gestisce tutti gli eventi a cui è soggetto il quadro elettrico. Sia esso un evento forzato da un operatore manualmente o da remoto oppure un evento casuale nel registro eventi viene memorizzato l’istante in cui avviene affiancato da un’icona grafica riferita alle condizioni meteorologiche del momento (pioggia, neve, sereno, nuvoloso, temporale, ecc) ed alla posizione geografica del quadro elettrico.

Di seguito nella figura verrà mostrata una schermata della piattaforma *GestartWeb* in cui sono evidenziate le 5 caratteristiche principali descritte in precedenza applicate ad un quadro elettrico:

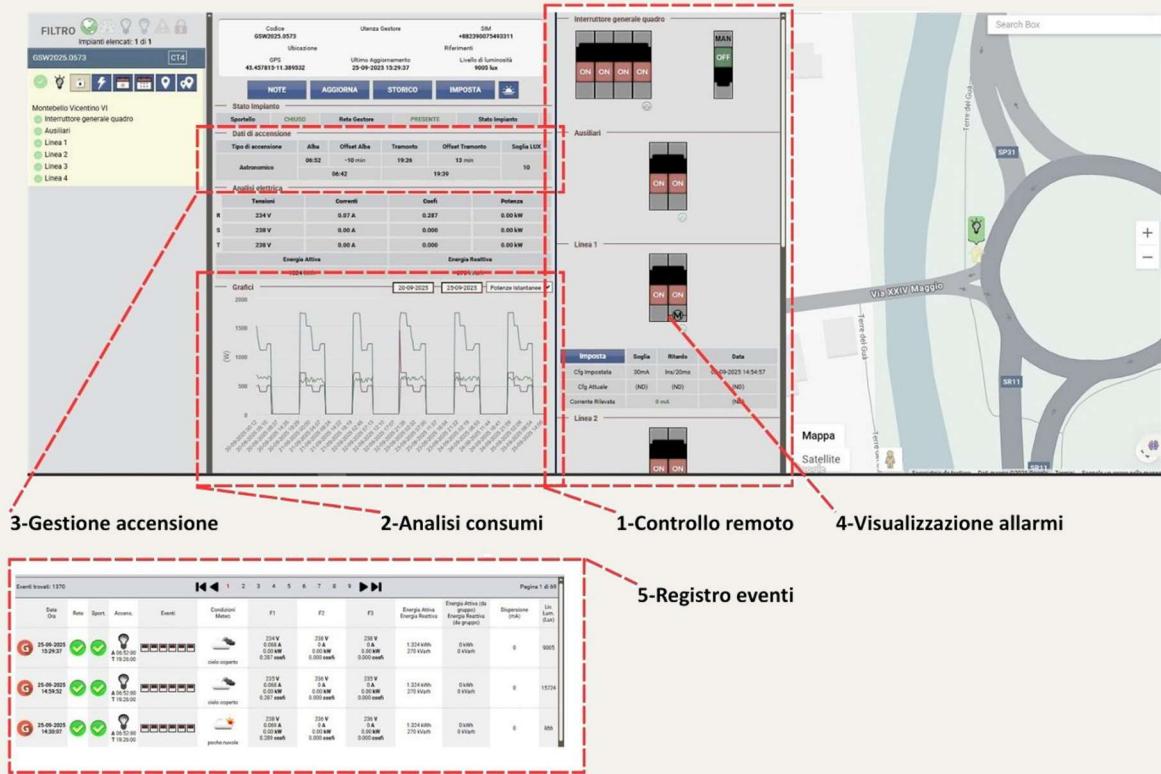


Figura 18 Piattaforma *GestartWeb*. Pagina generale di un quadro elettrico telecontrollato da remoto. Fonte: concessione di Unienergie Consorzio stabile S.c.a r.l come concessionario della gestione del quadro elettrico visualizzato per conto del comune di Montebello Vicentino.

L'adozione del telecontrollo Gestart abilita una gestione intelligente e sostenibile degli impianti elettrici pubblici, i benefici di maggiore interesse sono:

1. Prolungamento vita utile degli impianti:

- Il monitoraggio continuo consente una manutenzione predittiva, riducendo guasti e usura prematura.
- Le soglie dei differenziali possono essere ritirate da remoto per compensare dispersioni su linee obsolete, evitando sostituzioni inutili.

2. Riduzione dei consumi energetici:

- Accensioni ottimizzate (es. combinazione crepuscolare + astronomico) permettono di adattare l'illuminazione alle reali esigenze ambientali, con riduzione dei tempi di accensione e sprechi.

3. Minimizzazione dei rifiuti elettronici:

- Integrazione modulare consente di riutilizzare quadri esistenti con l'aggiunta di componenti Gestart, evitando smaltimenti prematuri.
- Funzionalità evolutive senza necessità di sostituire l'hardware di campo.

4. Riduzione impatti ambientali e CO₂:

- L'ottimizzazione dei consumi porta ad una riduzione di energia elettrica consumata e contribuisce alle emissioni di CO₂, poiché la produzione di elettricità, anche da fonti rinnovabili, ha un'impronta di carbonio associata.
- Riduzione degli spostamenti per manutenzione grazie al controllo remoto. Come dimostrato in precedenza, grazie al telecontrollo è possibile ridurre gli spostamenti per guasti, analizzarli in anticipo e ridurre i tempi di intervento ed effettuare tentativi di ripristino direttamente da remoto.

LINEA GUIDA 4: RIPARAZIONE LAMPADE GUASTE

FASE	UTILIZZO E MANUTENZIONE
OBIETTIVO	RIDURRE IL NUMERO DI LAMPADE NUOVE E LO SPRECO DI MATERIALI
STRATEGIA	RIPARARE IL MAGGIOR NUMERO DI LAMPADE GUASTE
RIFERIMENTO SCALA R	RIDURRE (R2), RIPARARE (R4), RINNOVARE (R5)
SOGGETTI COINVOLTI	MANUTENTORI

DESCRIZIONE: la **LINEA GUIDA 4** propone una breve guida per lo smontaggio e la riparazione dei principali componenti di una lampada LED, al fine di promuovere la riparazione al posto della sostituzione.

Le lampade LED di nuova generazione sono apprezzate per la loro efficienza energetica e per la lunga durata (in media la vita utile di funzionamento è di 100.000 ore³⁸), tuttavia possono facilmente presentare guasti e malfunzionamenti a causa di:

- **Sovratensioni elettriche:** fluttuazioni nella rete elettrica possono danneggiare i componenti interni delle lampade LED.
- **Stress termico:** un'eccessiva produzione di calore, spesso dovuta a una dissipazione inefficiente, può degradare i materiali dei LED, riducendo la loro emissione luminosa.
- **Componenti di bassa qualità:** uso di materiali scadenti o difetti di progettazione può portare a guasti prematuri del driver LED, causando sfarfallio o spegnimento completo della lampada.
- **Condizioni ambientali avverse:** elevata, temperature estreme o esposizione a sostanze chimiche possono compromettere l'integrità dei componenti elettronici.
- **Eventi atmosferici:** scariche elettriche da eventi temporaleschi e rovesci di grandine possono danneggiare gli apparecchi. La frequenza di questi eventi in alcune zone rende molto probabile la necessità di intervenire sugli apparecchi guasti.

³⁸ Prodotto utilizzato come campione: armatura stradale *Eidos* di GDS LIGHTING. Fonte: <https://www.gdslighting.com/prodotto/illuminazione-stradale-led-eidos/>

Nel caso studio presentato in precedenza, relativo a 3.000 punti luce, nel 2024 (report ufficiale)³⁹ sono state sostituite 74 armature danneggiate o guaste, corrispondenti al 2,47% del totale. Su un periodo di dieci anni, circa il 30% delle lampade complessive viene sostituito. Data la bassa incidenza dei costi del prodotto completo, la prassi corrente privilegia la sostituzione rispetto alla riparazione, trascurando le conseguenze ambientali. Le materie prime impiegate nella produzione dei nuovi apparecchi comportano un costo ecologico significativo, mentre i componenti dismessi spesso rimangono a lungo in magazzino perdendo valore.

A supporto della **linea guida 4** viene presentata di seguito una **scheda esempio** nella quale verranno descritti i principali componenti di una lampada e le istruzioni per la riparazione tramite la sostituzione dei vari componenti.

LINEA GUIDA 4 – SCHEDA ESEMPIO

Una lampada LED stradale è composta dai seguenti elementi principali:

- **Corpo della lampada:** Struttura protettiva resistente agli agenti atmosferici in alluminio pressofuso o acciaio inox. La geometria dell'involucro deve permettere la dissipazione interna del calore. Il grado di protezione deve essere IP65-67 per garantire l'impermeabilità.
- **Modulo LED:** Il cuore della lampada, contiene i diodi che emettono luce. Piastra in alluminio con moduli LED montati in serie o parallelo. Possono emettere fasci luminosi di diversa temperatura di colore (3000, 4000 e 6000K).
- **Driver LED:** Contenitore in plastica isolato con circuito elettronico, serve a regolare la tensione e la corrente per alimentare i LED.
- **Ottica:** elemento in Policloruro di vinile (PC) o vetro temperato, utilizzato per direzionare la luce emessa dai LED nella giusta direzione. Inoltre, ha funzione protettiva dei moduli da polvere e eventuali urti.
- **Connettori e sistema di alimentazione:** morsetti a vite e connettori rapiti in rame stagnato con isolamento plastico, necessari per il collegamento del driver alla linea rete elettrica.

³⁹ Vedi pagina 61-62

- **Sensori e controller (opzionali):** In alcuni modelli, circuiti elettronici con sensori di luce o movimento per regolare l'intensità luminosa in base alle necessità ambientali.

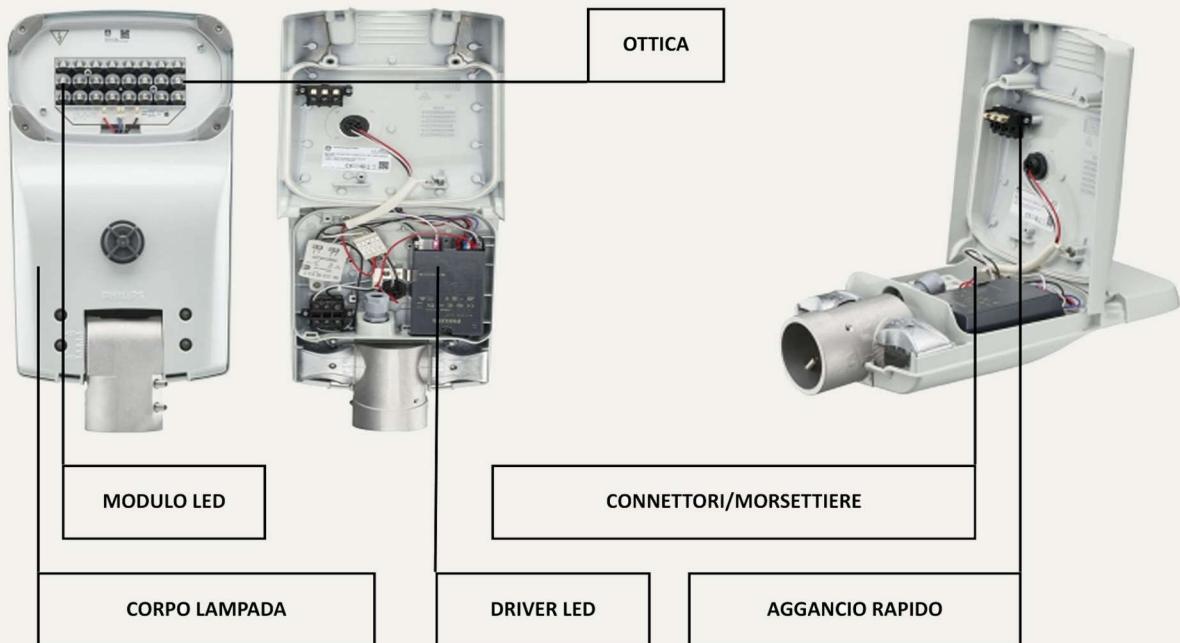


Figura 19 Philips LumiStreet gen2 (Fonte: <https://www.lighting.philips.it/>) e indicazioni delle varie componenti
(Rielaborazione: Andrea Arnaudo)

Di seguito una tabella riassuntiva con i problemi più comuni e la relativa soluzione:

PROBLEMA	POSSIBILE CAUSA	SOLUZIONE
La lampada non si accende	Guasto al driver LED	Sostituire il driver
Luce debole o tremolante	LED danneggiati o driver difettoso	Controllare e sostituire il modulo LED o il driver
La lampada si surriscalda	Dissipatore ostruito o inefficiente	Pulire o sostituire il dissipatore

Per la riparazione delle lampade è necessario avere i seguenti strumenti: multmetro digitale, cacciavite isolato, pinza spelafili, pasta termica, saldatore (se necessario per i collegamenti) e guanti e occhiali protettivi.

Di seguito l'ordine delle operazioni da effettuare per la sostituzione dei componenti descritti nella tabella sopra:

- **Sostituzione del Driver LED:**
 1. Spegnere l'alimentazione e scollegare la lampada dalla rete elettrica.
 2. Aprire il vano contenente il driver.
 3. Identificare il driver guasto (controllare tensione e corrente in uscita con un multmetro).
 4. Scollegare i cavi di alimentazione e i collegamenti ai LED.
 5. Installare il nuovo driver, rispettando la polarità e le specifiche elettriche.
 6. Richiudere il vano e testare il funzionamento.
- **Sostituzione del Modulo LED:**
 1. Staccare l'alimentazione e smontare la copertura protettiva della lampada.
 2. Identificare il modulo LED e verificare il collegamento al driver.
 3. Svitare il modulo LED dal dissipatore e scollegare i cavi.
 4. Installare il nuovo modulo, applicando pasta termica per migliorare la dissipazione del calore.
 5. Collegare i cavi, richiudere la lampada e testare l'accensione.
- **Pulizia e Manutenzione del Dissipatore**
 1. Rimuovere eventuali detriti o polvere accumulati con aria compressa o un pennello.
 2. Se il dissipatore è deteriorato, sostituirlo con uno di pari specifiche.
 3. Verificare l'aderenza tra il dissipatore e il modulo LED.

In conclusione, uno dei principali vantaggi è la riduzione dei rifiuti elettronici. Le lampade LED contengono materiali e componenti elettronici che, se smaltiti in modo improprio, possono generare inquinamento e avere effetti negativi sugli ecosistemi. Riparare una lampada, invece di sostituirla, permette di allungarne la vita utile e di ridurre la quantità di rifiuti da trattare o smaltire, diminuendo così l'accumulo nelle discariche e il rilascio di sostanze nocive nell'ambiente.

Un altro aspetto fondamentale riguarda il consumo di risorse naturali. La produzione di nuove lampade LED richiede materiali come alluminio, rame, plastica e terre rare, il cui processo di estrazione e lavorazione ha un impatto significativo sull'ambiente. Riparando le lampade già esistenti, si evita la necessità di estrarre nuove materie prime, contribuendo a preservare le risorse naturali e a limitare le emissioni di CO₂ legate ai processi industriali.

Anche il consumo energetico legato alla produzione e al trasporto di nuove lampade può essere ridotto attraverso la riparazione. Ogni fase del ciclo di vita di un prodotto, dalla produzione allo smaltimento, richiede energia, spesso proveniente da fonti fossili. Estendere la durata di utilizzo delle lampade LED significa ridurre la domanda di nuovi prodotti e, di conseguenza, abbattere il consumo energetico necessario per la loro produzione, trasporto e distribuzione.

LINEA GUIDA 5: PROLUNGAMENTO VITA UTILE PALI UTILIZZANDO ANODI SACRIFICIALI

FASE	UTILIZZO E MANUTENZIONE
OBIETTIVO	PROLUNGARE LA VITA UTILE DEI PALI DI SOSTEGNO
STRATEGIA	UTILIZZARE ANODI SACRIFICIALI PER RALLENTARE L'ARRUGGINIMENTO
RIFERIMENTO SCALA R	RIPARARE (R4), RINNOVARE (R5)
SOGGETTI COINVOLTI	PROGETTISTI, MANUTENTORI

DESCRIZIONE: la **LINEA GUIDA 5** propone una soluzione tecnica al fine di prolungare la vita utile dei pali di sostegno e ridurre il processo di corrosione.

La durata media dei pali destinati all'illuminazione pubblica, in condizioni tipiche urbane si attesta intorno ai 20-25 anni⁴⁰. Si tratta di un periodo relativamente lungo, ma non sufficiente a garantire un utilizzo esteso in un'ottica di economia circolare. Considerata la necessità di mantenere costantemente attivo il servizio, è possibile intervenire sia in fase progettuale sia durante il ciclo di vita del palo per prolungarne la resistenza e l'affidabilità, portando la durata complessiva fino a 35-40 anni.

L'invecchiamento dei pali avviene tramite arrugginimento, ovvero una forma di **corrosione** che avviene a causa dell'esposizione all'ambiente. È un fenomeno chimico-eletrochimico che compromette gradualmente l'integrità strutturale del palo. Il processo avviene attraverso:

- Esposizione agli agenti atmosferici: l'umidità, la pioggia, la neve e la salsedine (nelle zone costiere) forniscono acqua e ossigeno, i principali elementi per l'ossidazione.
- Formazione della ruggine (ossido di ferro): quando il rivestimento protettivo (come la zincatura) si danneggia o si consuma.
- Progressione della corrosione: una volta iniziato, il processo accelera. La ruggine occupa più volume rispetto al metallo originale, causando espansione e deformazione, che può indebolire o rompere il palo.

⁴⁰ Fonte: Infralumin, "Qual è la durata di vita prevista di un palo della luce?", disponibile online: <https://it.infralumin.com/blogs/what-is-the-life-expectancy-of-a-street-light-pole>

I punti critici del palo sono:

- Base del palo (zona interrata o a livello del suolo): zona più critica. Lì si accumulano acqua stagnante, sali disgelanti (nelle zone fredde), rifiuti organici e acidi del terreno, inoltre il ristagno d'acqua e l'umidità costante creano un ambiente perfetto per la corrosione.
- Giunzioni e saldature: possono presentare imperfezioni o difetti nel rivestimento, diventando punti d'innesto per la corrosione.
- Fori e aperture per cavi o accessori: zone dove l'acqua può infiltrarsi. Spesso la protezione anticorrosione è più debole in questi punti.
- Danni meccanici: graffi, urti o abrasioni (es. causati da mezzi di trasporto o da atti vandalici) rimuovono la protezione superficiale.
- Zona superiore del palo (sotto la testa o l'armatura): meno comune, ma in presenza di condensa o infiltrazioni, anche l'estremità superiore può essere soggetta a ruggine.

L'arrugginimento è un processo lento e che può passare inosservato, soprattutto alla base dei pali, pertanto occorre effettuare ispezioni regolari, applicare trattamenti anticorrosivi e interventi di manutenzione preventiva⁴¹.

Nella scheda esempio della linea guida 5 verrà mostrata una soluzione preventiva per allungare il ciclo vita del palo.

⁴¹ Hendrik Wijaya, Sahan Bandara, Pathmanathan Rajeev, Emad Gad, Johnny Shan, "Failure assessment of deteriorated steel light poles", Results in Engineering, Volume 23, 2024.

LINEA GUIDA 5 – SCHEDA ESEMPIO

In questa scheda di esempio si valuta una soluzione per aumentare la vita utile di un palo di sostegno.

La proposta è quella di utilizzare un anodo sacrificale. L'operazione consiste nell'inserire un pezzo di metallo (zinco, magnesio o alluminio) nel terreno e collegarlo elettricamente al metallo che vogliamo proteggere, in questo caso un palo di sostegno.

Le operazioni da eseguire sono:

- **Inserimento dell'anodo sacrificale:** un anodo viene interrato nelle vicinanze del palo ad una distanza tale da coprire interamente la base del palo con il campo elettrico di protezione.
- **Collegamento elettrico:** si collega il palo all'anodo con un filo conduttore (tendenzialmente di rame) isolato e con resistenza all'acqua. Il punto di contatto deve essere direttamente sul ferro e non devono essere presenti vernici o zincature.
- **Avvio della protezione catodica:** una volta collegati si crea una cella elettrochimica, l'anodo è più attivo e il palo diventa catodo e viene protetto. Gli elettroni vengono trasferiti dall'anodo al catodo, impedenendo che il palo perda i propri e subisca il processo di corrosione.
- **Manutenzione e sostituzione:** per mantenere la protezione attiva è necessario sostituire l'anodo quanto si esaurisce. Per facilitare la sostituzione si può valutare di inserirlo in un apposito spazio nel pozzetto di ispezione, spesso presente alla base dei pali per l'illuminazione.

Il vantaggio principale di questo esempio è quello di aumentare la durata della parte interrata dei pali, ovvero la più critica. Di seguito vengono quantificati i vantaggi di utilizzare una protezione catodica con anodo sacrificale.

CONDIZIONI	SENZA ANODO	CON ANODO
Terreno normale (umidità media)	20-25 anni	35-40 anni
Terreno molto umido o salino	8-12 anni	25-30 anni
Durata anodo (magnesio o zinco)	–	5-10 anni (sostituibile)
% incremento medio della durata	–	+80% fino a +200%

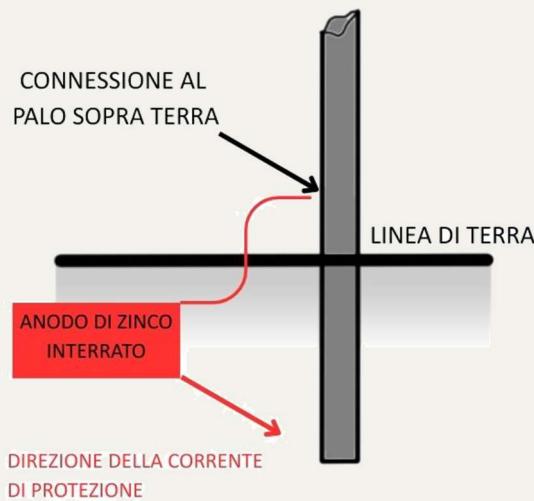


Figura 20 Schema di protezione catodica per pali in acciaio intirrati. Fonte: (42), rielaborazione grafica Andrea Arnaudo

In conclusione, l’impiego di un anodo sacrificale è una soluzione utile alla riduzione del processo corrosivo alla base dei pali di illuminazione pubblica. Di seguito l’elenco dei vantaggi⁴³:

- **Incremento dell'affidabilità strutturale:** come detto prima la corrosione alla base del palo è la più critica perché causa cedimenti improvvisi, diminuire la corrosione significa aumentare la sicurezza e la stabilità strutturale.
- **Facilità di integrazione su pali esistenti:** la protezione catodica è facilmente integrabile anche su pali già installati, senza la necessità di modifiche strutturali invasive. Il sistema può essere adattato a diversi materiali e configurazioni.
- **Stabilità in ambienti aggressivi:** in contesti particolarmente critici – come zone costiere, aree urbane con traffico intenso, suoli acidi o contaminati – i pali non protetti sono soggetti a degrado accelerato. L’anodo sacrificale offre una barriera elettrochimica attiva, capace di compensare queste condizioni avverse, prolungando l’efficienza funzionale del sistema.
- **Riduzione degli interventi:** dal punto di vista gestionale, i pali protetti richiedono minori interventi correttivi o sostitutivi, poiché l’anodo sacrificale svolge un’azione continua e autonoma. La manutenzione si concentra sulla sostituzione periodica dell’anodo, operazione semplice e pianificabile.
- **Benefici ambientali:** prolungare la vita utile dei pali contribuisce a una minore produzione di rifiuti metallici, riducendo l’impatto ambientale associato alla produzione, al trasporto e allo smaltimento dei componenti.

⁴² W.A. Byrd, "Guasti da corrosione di pali in acciaio rivestiti e incorporati direttamente sotto il livello del suolo con soluzioni", in IEEE Power and Energy Technology Systems Journal , vol. 6, n. 1, pp. 41-46, marzo 2019

⁴³ W.A. Byrd, "Guasti da corrosione di pali in acciaio rivestiti e incorporati direttamente sotto il livello del suolo con soluzioni", in IEEE Power and Energy Technology Systems Journal , vol. 6, n. 1, pp. 41-46, marzo 2019

5.4 FASE DI DISMISSIONE\RICICLO

Dopo aver lavorato sul prolungamento del ciclo vita dei prodotti, sulla loro manutenzione e sulla sostituzione dei componenti guasti, è necessario valutare correttamente la dismissione di tutti i materiali utilizzati nel modo corretto. In questa fase l'obiettivo principale è quello di riciclare i materiali riducendo il più possibile il downcycling. Si ricorda che il downcycling è un processo di riciclo in cui i materiali di scarto vengono trasformati in nuovi prodotti di qualità e valore inferiore rispetto al materiale originale.

La dismissione dei materiali nell'ambito dell'illuminazione pubblica avviene a fine vita dei componenti e quasi mai viene completamente smantellato un impianto, in quanto la sua funzione sarà necessaria anche in futuro. Ritornando allo smaltimento dei componenti non più funzionanti bisogna considerare tempi e cicli di vita molto differenti, i pali con le giuste attenzioni possono durare anche 30-35 anni, mentre gli apparecchi molto meno. Lo smaltimento avverrà con modalità e tempi differenti per i vari componenti.

Nella proposta seguente viene presentata una tabella guida che indica i materiali da dismettere in funzione della tipologia di componente e della sua vita media, offrendo uno strumento pratico per ottimizzare il riciclo e ridurre l'impatto ambientale complessivo degli impianti.



LINEA GUIDA 6: GUIDA AL RICICLO DEI COMPONENTI DEGLI IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE

FASE	DISMISSIONE\RICICLO
OBIETTIVO	GARANTIRE LA CORRETTA GESTIONE DEI MATERIALI DA DISMETTERE
STRATEGIA	REALIZZARE UNA GUIDA SUDDIVISA PER COMPONENTI E MATERIALI PER LA CORRETTA DISMISISONE
RIFERIMENTO SCALA R	RICICLARE (R8)
SOGGETTI COINVOLTI	PROGETTISTI

DESCRIZIONE: la **LINEA GUIDA 6** propone una guida per lo smaltimento dei componenti di illuminazione pubblica suddivisi per materiale e possibilità di riciclo.

La tabella viene strutturata in:

- **COMPONENTE:** elemento dell'impianto che viene dismesso
- **MATERIALE:** tipo di materiale presente nel componente
- **VITA UTILE MEDIA:** stima della vita utile media (non vengono considerate eventuali soluzioni per allungare la vita media)
- **MODALITÀ DI SMALTIMENTO / RICICLO:** viene indicato se il materiale è riciclabile.
- **RIFIUTO PERICOLOSO:** viene indicato se il materiale è ritenuto pericoloso.
- **CODICE CER:** Codice Europeo dei Rifiuti.

Con le informazioni fornite nella tabella, si vuole facilitare: la gestione sostenibile dei rifiuti, la programmazione delle sostituzioni dei componenti e il rispetto delle normative ambientali vigenti.

Componente	Materiale	Vita Utile Media	Modalità di Smaltimento / Riciclo	Codice CER
Palo\sostegno	Acciaio	25–30 anni	Riciclabile al 100%	17 04 05
	Alluminio	25–30 anni	Riciclabile; rifusione	17 04 02
	Ferro battuto	30-50 anni	Riciclabile come rottame	17 04 05
	Calcestruzzo	30–40 anni	Frantumazione; inerte	17 01 01
Corpo illuminante	Alluminio	15–20 anni	Riciclabile	16 02 16
	Plastica	10–15 anni	Riciclabile/termovalorizzabile	20 01 39
	Vetro temperato	10–20 anni	Riciclabile	16 01 20

Componente	Materiale	Vita Utile Media	Modalità di Smaltimento / Riciclo	Codice CER
Lampada scarica	Vapori di mercurio	8–12 anni	RAEE pericoloso; trattamento in impianti autorizzati	20 01 21
	Reattore (con PCB)	10–15 anni	RAEE pericoloso se contenente PCB	16 02 09
LED	Chip LED	12–20 anni	RAEE; recupero materiali	20 01 36
	Dissipatore in alluminio	12–20 anni	Riciclabile	17 04 02
	Lente/plastica	10–15 anni	Riciclabile/termovalorizzabile	20 01 39
Cavi elettrici	Rame	30–40 anni	Riciclabile	17 04 01
	Alluminio	30–40 anni	Riciclabile	17 04 02
	PVC (guaina)	30–40 anni	Riciclabile/termovalorizzabile	17 04 11
Morsetti e connettori	Acciaio zincato	25–30 anni	Riciclabile al 100%	17 04 05
	Rame	30–40 anni	Riciclabile	17 04 01
	Plastica	10–15 anni	Riciclabile/termovalorizzabile	20 01 39
Bulloneria	Acciaio zincato	25–30 anni	Riciclabile al 100%	17 04 05
	Alluminio	25–30 anni	Riciclabile; rifusione	17 04 02
Quadri elettrici	Rame	15–25 anni	Riciclabile	17 04 01
	Ferro/lamiera	15–25 anni	Riciclabile	17 04 05
	Plastica	15–25 anni	Riciclabile se selezionata	20 01 39
	Elettronica	10–20 anni	RAEE; invio a impianti specializzati	16 02 14
Sensori smart	Circuiti stampati	8–15 anni	RAEE; recupero metalli preziosi	16 02 14
	Plastica (guscio)	8–15 anni	Riciclabile/termovalorizzabile	20 01 39
Fondazioni	Calcestruzzo	>40 anni	Frantumazione, uso come inerte	17 01 01
	Acciaio armatura	>40 anni	Riciclabile come rottame	17 04 05
Tubazioni interrate	PVC o polietilene	>30 anni	Riciclabile se pulito	17 02 03
Imballaggi	Cartone ondulato	1 utilizzo	Riciclabile	15 01 01
	Film plastico (PE)	1 utilizzo	Riciclabile	15 01 02
	Pallet legno	5-10 anni	Riciclabile o smaltimento come rifiuto inerte	17 02 01
	Imballaggi plastica espansa	1 utilizzo	Riciclabile (in alcune aree) o termovalorizzabile	15 01 05

Dati i materiali presentati sopra, si analizzano valutando la possibilità di essere riciclati senza downcycling:

- **ACCIAIO:** questo materiale viene anche definito “materiale permanente” perché può essere riciclato in quantitativi prossimi al 100% senza perdere nessuna delle proprietà intrinseche quali resistenza, duttilità e formabilità.⁴⁴
- **ALLUMINIO:** l'alluminio è uno dei materiali più facili da riciclare senza downcycling, occorre fonderlo e successivamente avrà le stesse proprietà dell'originale.
- **FERRO BATTUTO:** data la composizione chimica equivalente rispetto all'acciaio anche il ferro può essere riciclato senza alternarne le proprietà chimico-fisiche.⁴⁵
- **CALCESTRUZZO:** il calcestruzzo nella maggior parte dei casi viene riciclato con downcycling perché frantumato ed utilizzato come base per strade o fondamenta. Il materiale riciclato ha un nuovo uso e perde parte delle sue caratteristiche meccaniche. Si cita il processo “reCO₂ver” brevettato da “SIKA” che cerca di riutilizzare il calcestruzzo in maniera circolare scomponendolo nei suoi componenti principali: polvere, sabbie e aggregati. Nonostante la scomposizione, il calcestruzzo riciclato può essere utilizzato solo per alcune applicazioni. Ad esempio, in alcuni Paesi non può essere utilizzato dove c'è richiesta di resistenza al gelo perché non ha le caratteristiche necessarie. In conclusione, il brevetto avvicina il riciclo del calcestruzzo ad un concetto circolare, ma si tratta sempre di un processo di downcycling.⁴⁶
- **VETRO TEMPERATO:** Il vetro temperato non può essere riciclato facilmente senza perdita di qualità. Quando si rompe, si frantuma in piccoli pezzi, rendendo complicata la separazione e la fusione per la produzione di nuovo vetro. Sebbene possa essere utilizzato per altri scopi, come la produzione di materiale da costruzione, si tratta di riciclo con downcycling.⁴⁷
- **VAPORI DI MERCURIO:** I vapori di mercurio sono altamente pericolosi e non sono riciclabili. Devono essere trattati in modo molto specifico in impianti di smaltimento specializzati per evitare danni ambientali.
- **REATTORE (CON PCB):** I reattori contenenti PCB (bifenili policlorurati) sono altamente tossici e non possono essere riciclati senza un processo di smaltimento speciale e sicuro. Non si tratta di un materiale che può essere riciclato senza un trattamento specifico.
- **CHIP LED:** il riciclo dei componenti dei LED è in forte fase di sviluppo, data la recente immissione nel mercato di questa tecnologia. L'obiettivo delle ricerche è quello poter riutilizzare il maggior quantitativo possibile di materiale dal riciclo dei moduli LED. Questi RAEE vengono smontati, frantumati e successivamente vengono separati i materiali in forma pura, è possibile recuperare vetro, metalli e plastica da poter riutilizzare. Si tratta di un processo complesso da realizzare e in fase di

⁴⁴ Fonte: Alessandro Alessio, Andrea Andreuzzi, Elena Bruni, Piergiorgio Carapella, Daniela Di Scenna, Simona Dotti, Caterina Mancusi, Barbara Marchetti, Antonia Recchia, Francesco Rossi, Marianna Salemi, Elena Trapè, “Economia circolare: strategie e prospettive per l’industria”, Confindustria, marzo 2025, pp.81-83

⁴⁵ Fonte: Alessandro Alessio, Andrea Andreuzzi, Elena Bruni, Piergiorgio Carapella, Daniela Di Scenna, Simona Dotti, Caterina Mancusi, Barbara Marchetti, Antonia Recchia, Francesco Rossi, Marianna Salemi, Elena Trapè, “Economia circolare: strategie e prospettive per l’industria”, Confindustria, marzo 2025, p.84

⁴⁶ Fonte: <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/can-concrete-be-recycled.html>

⁴⁷ Fonte: <https://www.recycletechnologies.com/is-tempered-glass-recyclable>)

sviluppo, che permette di recuperare materie pure senza downcycling, tuttavia è necessario sottolineare che i rifiuti RAEE restano ad alto impatto ambientale^{48 49}.

- **DISSIPATORE IN ALLUMINIO:** vedi alluminio.
- **PLASTICA OTTICA (PMMA):** le ottiche in PMMA si possono riciclare senza downcycling, grazie a nuove tecnologie che recuperano le materie prime di qualità pari a quelle vergini. I processi utilizzati utilizzano la depolimerizzazione chimica e, secondo uno studio dell'ETH di Zurigo, è possibile scindere il polimero anche se sono presenti additivi al suo interno (l'operazione è fattibile consuma parecchia energia ed è ancora in fase di sviluppo).^{50 51}
- **RAME:** Il rame è un materiale molto pregiato che può essere riciclato senza subire downcycling. È uno dei materiali riciclabili con il minor degrado di qualità. Inoltre, il rame riciclato richiede l'85% in meno di energia rispetto alla produzione primaria, un'importante riduzione delle emissioni di CO₂⁵².
- **PVC (GUAINA):** la percentuale di PVC nei cavi è circa del 70% e viene riciclato per essere riutilizzato in altri cavi. Il processo consente di separare il PVC dalla gomma e dal PE utilizzando le cariche elettriche. Con questa tecnica (tecnologia TRICARE) è possibile riutilizzare fino al 90% del PVC con l'85% delle proprietà intatte. Il PVC si ricicla, ma con un piccolo downcycling, circa il 15% ogni volta⁵³.
- **FERRO/LAMIERA:** vedi ferro battuto.
- **ELETTRONICA:** rifiuto RAEE, vedi CHIP LED.
- **CIRCUITI STAMPATI:** rifiuto RAEE, il processo è lo stesso dei CHIP LED, tuttavia è possibile recuperare i metalli preziosi (argento o rame) attraverso una separazione magnetica a secco⁵⁴.
- **ACCIAIO ARMATURA:** vedi acciaio.
- **PVC O POLIETILENE:** vedi PVC GUAINA.
- **CARTONE ONDULATO:** Il cartone ondulato può essere riciclato senza grande perdita di qualità, sebbene il numero di cicli di riciclo possa influenzare la sua resistenza. Una ricerca indipendente condotta dal dottor Rene Eckhart dimostra che il materiale può essere riciclato fino a 25 volte perdere proprietà meccaniche⁵⁵.
- **FILM PLASTICO (PE):** il film plastico in PE utilizzato per gli imballaggi si può riciclare senza downcycling, l'importante è che venga raccolto di alta qualità. Un ottimo esempio è il progetto *Re Wind*, che ha sviluppato un progetto "film to film", raccoglie film plastico da rigenerare e lo recupera al 100% riutilizzandolo con la stessa funziona, senza perdere proprietà meccaniche. Dimostra l'uso circolare di questo materiale⁵⁶.

⁴⁸ Fonte: <https://recyclinginside.com/e-waste-recycling/unlocking-the-full-potential-of-led-recycling>

⁴⁹ Thiago R. Martins, Eduardo H. Tanabe, Daniel A. Bertuol, "*Innovative method for the recycling of end-of-life LED bulbs by mechanical processing*", Resources, Conservation and Recycling, Volume 161, 2020.

⁵⁰ Fonte: <https://www.recyclingtoday.com/news/eth-zurich-research-plexiglas-pmma-recycling-solvent-technique>

⁵¹ Fonte: <https://www.roehm.com/en/sustainability/alliance-for-pmma-recycling>

⁵² Fonte: <https://internationalcopper.org/policy-focus/climate-environment/recycling>

⁵³ Fonte: <https://cordis.europa.eu/article/id/80830-cable-recycling-techniques>

⁵⁴ Fonte: <https://www.pcbasic.com/blog/circuit-board-recycling.html?utm>

⁵⁵ Fonte: https://www.repubblica.it/green-and-blue/2022/01/21/news/cartone_riciclo_25_volte-334555665/

⁵⁶ Fonte: <https://www.plastix.it/progetto-re-wind-una-filiera-di-riciclo-film-to-film-nel-b2b>

- **PALLET LEGNO:** I pallet in legno possono essere riutilizzati e riciclati senza perdere molta qualità, a meno che non siano danneggiati o trattati con sostanze chimiche. In generale, sono facili da riutilizzare. Esistono piattaforme che noleggiano i pallet, in modo da condividere il prodotto, oppure diverse soluzioni creative di riuso attivo del pallet anche se non più funzionale al suo utilizzo primario.
- **IMBALLAGGI PLASTICA ESPANSA:** il polimero utilizzato per questo tipo di imballaggi è l'EPS. Il polistirene espanso è un materiale che può essere riciclato tramite processi meccanici e chimici e riutilizzato per altri oggetti, tuttavia si tratterà sempre di downcycling perché l'EPS riciclato non può essere espando. L'EPS è un materiale leggero e voluminoso, il che lo rende difficile da trasportare e ingombrante da stoccare per il riciclaggio⁵⁷.

In conclusione, l'analisi dei materiali presenti nei componenti degli impianti mette in evidenza che l'adozione di un modello circolare richiede una profonda conoscenza della riciclabilità degli elementi presenti. I metalli, alluminio e rame su tutti, sono risorse preziose che possono essere riutilizzate continuamente in nuovi cicli di produzione. Al contrario, le materie plastiche e i materiali compositi spesso sono riciclabili solo attraverso processi costosi ed energivori o a processi di recupero soggetti a downcycling. L'importanza di conoscere le caratteristiche dei materiali permette di non sprecare risorse preziose e di ridurre quelle che rischiano di non essere inserite in modelli circolari durante la fase di progettazione dei prodotti.

Questa distinzione è fondamentale per progettare impianti di illuminazione più sostenibili, adottando fin dalla fase di progettazione\costruzione materiali che garantiscano un ciclo di vita esteso e ricicli efficienti. In quest'ottica, il riciclo senza downcycling non è solo una questione tecnica, ma un elemento chiave per l'adozione di un'economia circolare nel settore.

⁵⁷ Fonte: <https://www.worldcentric.net/expanded-polystyrene.html>

6 CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare i limiti e le potenzialità dell'applicazione dei principi di economia circolare ai componenti degli impianti di illuminazione pubblica nel contesto italiano.

La ricerca ha evidenziato un quadro complesso e ancora in fase di sviluppo, senza riferimenti chiari e obiettivi comuni. Le principali politiche e vincoli di sostenibilità riguardano ancora il risparmio energetico diretto, i consumi delle sorgenti luminose, mentre l'attenzione verso i materiali impiegati e il ciclo vita dei componenti risulta ancora marginale.

Dal punto di vista normativo, i Criteri Ambientali Minimi (CAM) rappresentano uno strumento utile per indirizzare le scelte progettuali verso soluzioni più sostenibili per l'ambiente. Tuttavia, è emerso che l'unico strumento collegato alla circolarità dei materiali, la redazione di un bilancio materico, incide solo per il 5% del punteggio premiante totale, limitandone l'impatto complessivo sulle scelte progettuali e di manutenzione nel tempo. La Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD) è un importante strumento per la valutazione della circolarità dei prodotti, consente di misurare in modo oggettivo gli impatti ambientali lungo tutto il ciclo vita dell'oggetto analizzato. L'utilizzo di certificazioni EPD per gli impianti di illuminazione pubblica rappresenta un passo importante verso soluzioni circolari.

Dal punto di vista applicativo, l'analisi dei casi studio italiani mette in mostra le difficoltà di un approccio circolare nella progettazione degli impianti di illuminazione pubblica. I due Comuni analizzati, San Pier d'Isonzo e Gabicce Mare, rappresentano esempi positivi nell'utilizzo di nuove metodologie, ma si tratta di progetti di piccola scala, con scarse fonti documentali disponibili e limitata reperibilità.

Il confronto con l'esperienza internazionale permette di valutare un quadro europeo diverso: nei Paesi Bassi l'economia circolare nell'illuminazione pubblica è fortemente promossa e sostenuta economicamente dalle Istituzioni. In questo contesto sono stati analizzati due casi studio che mettono in mostra l'utilizzo sistematico di strumenti di misura della circolarità, LCA e MKI, per la valutazione oggettiva nelle gare d'appalto, e un ampio repertorio di documenti pubblici di supporto. Inoltre, grazie alla collaborazione degli autori, è stato possibile analizzare in questa tesi una Guida operativa Nazionale che orienta tutti gli stakeholder del processo a scelte più consapevoli per ogni fase del ciclo vita di un progetto di illuminazione pubblica.

A seguito di quanto visto nei casi studio, è stata elaborata una versione di guida operativa da applicare al contesto italiano. Lo scopo è quello di proporre alternative tecniche ed operative per iniziare a ragionare su diverse possibili applicazioni di principi di economia circolare in questo settore, con particolare attenzione ai componenti e ai materiali che lo costituiscono. Attraverso il paradigma delle 9R, la guida illustra azioni specifiche per ogni fase del ciclo di vita

degli impianti (Progettazione, utilizzo e manutenzione, dismissione e recupero), dimostrando con le schede esempio come la circolarità possa tradursi in criteri tecnici misurabili e non solo in obiettivi teorici.

In conclusione, questo lavoro di tesi non si limita a descrivere lo stato dell'arte, ma propone un esempio applicativo dei concetti di economia circolare applicata all'illuminazione pubblica. La necessità è quella di progettare l'illuminazione in modo che sia non solo efficiente, ma anche circolare. Per fare questo, secondo la mia esperienza e la ricerca condotta in questa tesi, bisognerà concentrarsi su:

1. la corretta formazione tecnica e gestionale sia per le amministrazioni pubbliche che per i progettisti e gli addetti ai lavori;
2. un ampliamento nel CAM per dare maggior peso in punteggio al bilancio materico;
3. l'adozione diffusa di strumenti di misura certificati, LCA e EPD;
4. sperimentare modelli circolari e raccogliere i risultati positivi all'interno di pubblicazioni autorevoli che fungano da guida sul modello del caso studio in Olanda.

L'illuminazione pubblica rappresenta dunque un settore strategico per lo sviluppo dell'economia circolare urbana, grazie alla sua diffusione capillare e alla possibilità di integrare soluzioni tecnologiche innovative con effetti concreti e immediati.

BIBLIOGRAFIA

- Alessandro Alessio, Andrea Andreuzzi, Elena Bruni, Piergiorgio Carapella, Daniela Di Scenna, Simona Dotti, Caterina Mancusi, Barbara Marchetti, Antonia Recchia, Francesco Rossi, Marianna Salemi, Elena Trapè. (2025, marzo). *Economia circolare: strategie e prospettive per l'industria*. Confindustria. Pp.81-84
- Bandara Sahan, Gad Emad, Rajeev Pathmanathan, Shan Johnny, Wijaya Hendrik. (2024). *Failure assessment of deteriorated steel light poles*. Results in Engineering, Volume 23.
- Bertuol Daniel A., Martins Thiago R., Tanabe Eduardo H. (2020). *Innovative method for the recycling of end-of-life LED bulbs by mechanical processing*. Resources. Conservation and Recycling. Volume 161.
- Bompan Emanuele, Brambilla Nicoletta (2016). *Che cosa è l'economia circolare*. Milano: Edizioni Ambiente.
- Bonata Diego, Falchi Fabio, Favero Luca, Rosenfeld Emma, Sanchez Alejandro, a cura di Osservatorio CPI. (2022, giugno 18). *LED: una soluzione per l'illuminazione pubblica in Italia?*. Tratto da: https://osservatoriocpi.unicatt.it/ocpi-pubblicazioni-led-una-soluzione-per-l-illuminazione-pubblica-in-italia?utm_source=chatgpt.com#_ftn2
- Byrd W.A. (2019). *Guasti da corrosione di pali in acciaio rivestiti e incorporati direttamente sotto il livello del suolo con soluzioni*. In IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. Volume 6, n. 1. Pp. 41-46.
- Cappellini Marco. (2017, ottobre 27). *Misurare la circolarità e gli impatti ambientali di un impianto di illuminazione*. In conferenza “Verso un modello di economia circolare. Un nuovo inizio per l'illuminazione pubblica”.
- Circle Economy Foundation. (2024, febbraio). *Financial Policy Interventions for a Circular Economy*. Tratto da: <https://www.circle-economy.com/news/report-financial-policy-interventions-for-a-circular-economy#.Wo7d6ajiaUk>
- EDISON NEXT. (2024, gennaio 10). *Illuminazione pubblica: i benefici del LED*. Tratto da: <https://www.edisonnext.it/next-journal/illuminazione-pubblica-i-benefici-del-led/>
- ENEL S.p.A. Life Cycle Engineering. (2024). *EPDItaly 020-PCR per illuminazione pubblica*. Documento scaricabile online: https://www.epditaly.it/pcr/_pcr-per-prodotti-e-sistemi-elettronici-ed-elettrici-epditaly007-stand-alone-rev-3-0/pcr-part-b-illuminazione-pubblica-epditaly-020-da-usare-con-pcr-epditaly-007/
- GPP. *Che cosa sono i CAM*. Tratto da: <https://gpp.mase.gov.it/Cosa-sono-i-CAM>
- GXN Innovation, 3XN Architects, MT Højgaard, VIA Byggeri, Kingo Karlsen, Vugge til Vugge Danmark, henrik•innovation (2019). *Building a circular future*. Danimarca, KLS PurePrint.
- Hekkert Marko, Kirchherr Julian, Reike Denise (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. Elsevier. Pp. 223-224.
- Helbig Christoph, Huether Jonas, Joachimsthaler Charlotte, Lehmann Christian, Raatz Simone, Thorenz Andrea, Faulstich Martin, Tuma Axel. (2022), *A terminology for downcycling*. Journal of Industrial Ecology. 26. 10.1111/jiec.13289.

- Hera Luce. *Gabicce Mare, un impianto IP riciclabile al 99%*. Tratto da: <https://www.heraluce.it/insieme/gabicce-un-impianto-ip-riciclabile>
- Infralumin. (2025). *Qual è la durata di vita prevista di un pao della luce?*. Tratto da: <https://it.infralumin.com/blogs/what-is-the-life-expectancy-of-a-street-light-pole>
- Lacy Peter, Rutqvist Jacob. (2015). *Waste to Wealth*. Palgrave Macmillan.
- Magnanini F., Nani F. (2024). *City Green Light pioniera della luce circolare. Il progetto pilota è San Pier d'Isonzo*. Tratto da: <https://citygreenlight.com/sanpierdisonzo/>
- Niccoli Maria. (2020). *I Criteri Ambientali Minimi (CAM) 2020 negli Appalti Pubblici: cosa sono e a cosa servono*. Tratto da: <https://www.ingenio-web.it/articoli/i-criteri-ambientali-minimi-cam-negli-appalti-pubblici-cosa-sono-e-a-cosa-servono/>
- Oerlemans Beatrijs, Daaf de Kok en Ieke Bak, Fondazione OVLNL. (2023, settembre). *Handleiding Armaturen, LCA & MKI*. Documento scaricabile da: <https://ovlnl.nl/>
- Oerlemans Beatrijs, Fondazione OVLNL. (2023). *Leidraad Circulariteit*. Documento scaricabile da: <https://ovlnl.nl/>
- Roderik van Grieken. *Alles over: Milieu Kosten Indicator (MKI)*. Tratto da: <https://www.ibis.nl/kennisbank/alles-over-milieu-kosten-indicator-mki>

SITOGRAFIA

- <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/can-concrete-be-recycled.html>
- <https://www.recycletechnologies.com/is-tempered-glass-recyclable>)
- <https://recyclinginside.com/e-waste-recycling/unlocking-the-full-potential-of-led-recycling>
- <https://www.recyclingtoday.com/news/eth-zurich-research-plexiglas-pmma-recycling-solvent-technique>
- <https://www.roehm.com/en/sustainability/alliance-for-pmma-recycling>
- <https://internationalcopper.org/policy-focus/climate-environment/recycling>
- <https://cordis.europa.eu/article/id/80830-cable-recycling-techniques>
- <https://www.pcbasic.com/blog/circuit-board-recycling.html?utm>
- https://www.repubblica.it/green-and-blue/2022/01/21/news/cartone_riciclo_25_volte-334555665/
- <https://www.plastix.it/progetto-re-wind-una-filiera-di-riciclo-film-to-film-nel-b2b>
- <https://www.worldcentric.net/expanded-polystyrene.html>
- <http://www.consip.it>
- <https://ovlnl.nl/over-ovlnl>
- <https://www.atlantech.it/>
- <https://www.gestart.info/>
- <https://www.gdslighting.com/prodotto/illuminazione-stradale-led-eidos/>

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 SCHEMA DI CONFRONTO TRA MODELLO LINEARE E MODELLO CIRCOLARE. IMMAGINE DI <i>ATRIA INNOVATION</i> , FONTE: ATRIAINNOVATION.COM	6
FIGURA 2 SCHEMA DEL CICLO DI VITA DEI MATERIALI BIOLOGICI E TECNICI. FONTE: "BUILDING A CIRCULAR ECONOMY", PAG. 179.....	7
FIGURA 3 SCHEMA FILIERA DI PRODUZIONE CIRCOLARE. FONTE: "BUILDING A CIRCULAR ECONOMY", PAG. INTRODUCTION XXI	8
FIGURA 4 SCHEMA RECUPERO E RICICLO. FONTE: "BUILDING A CIRCULAR ECONOMY", PAG. INTRODUCTION XXII.....	9
FIGURA 5 SCHEMA ESTENSIONE DEL CICLO VITA DEL PRODOTTO. FONTE: "BUILDING A CIRCULAR ECONOMY", PAG. INTRODUCTION XXII	9
FIGURA 6 SCHEMA PIATTAFORME DI SHARING. FONTE: "BUILDING A CIRCULAR ECONOMY", PAG. INTRODUCTION XXIII	10
FIGURA 7 PRODOTTI COME SERVIZI A PAGAMENTO. FONTE: "BUILDING A CIRCULAR ECONOMY", PAG. INTRODUCTION XXIII.....	10
FIGURA 8 OBIETTIVI GPP: AMMINISTRAZIONE PUBBLICA, IMPRESE, AMBIENTE. FONTE: ARNAUDO ANDREA	17
FIGURA 9 TABELLA DI CONFRONTO PROGETTI PILOTA. FONTE: ARNAUDO ANDREA.....	32
FIGURA 10 PIAZZA 18 SETTEMBRE, EINDHOVEN, FONTE IMMAGINE: BEATRIJS OERLEMANS, FONDAZIONE OVLNL, "LEIDRAAD CIRCULARITEIT", 2023, PAG. 17	46
FIGURA 11 FONTE IMMAGINE: BEATRIJS OERLEMANS, FONDAZIONE OVLNL, "LEIDRAAD CIRCULARITEIT", 2023, PAG. 23	49
FIGURA 12 ICONE FASI DEL CICLO VITA DEGLI IMPIANTI CHE VERRANNO UTILIZZATE ALL'INTERNO DELLA GUIDA. FONTE: ANDREA ARNAUDO	52
FIGURA 13 SCHEMA STRUTTURA GUIDA. FONTE ARNAUDO ANDREA	53
FIGURA 14 INQUADRAMENTO TERRITORIALE. FONTE: ARNAUDO ANDREA.....	57
FIGURA 15 SCHEMA TIPOLOGIE FONDAZIONI. FONTE ATLANTECH	64
FIGURA 16 SCHERMATA GIS RAPPRESENTANTE UN IMPIANTO GEOREFERENZIATO CON TABELLA DEGLI ATTRIBUTI. FONTE: ANDREA ARNAUDO	69
FIGURA 18 SCHERMATA GIS RAPPRESENTANTE LA HEATMAP DEL NUMERO DI PUNTI LUCE PER CONCENTRAZIONE. FONTE: ANDREA ARNAUDO	70
FIGURA 19 PIATTAFORMA GESTARTWeb. PAGINA GENERALE DI UN QUADRO ELETTRICO TELECONTROLLATO DA REMOTO. FONTE: CONCESSIONE DI UNIENERGIE CONSORZIO STABILE S.C.A.R.L COME CONCESSIONARIO DELLA GESTIONE DEL QUADRO ELETTRICO VISUALIZZATO PER CONTO DEL COMUNE DI MONTEBELLO VICENTINO.....	74
FIGURA 20 PHILIPS LUMISTREET GEN2 (FONTE: HTTPS://WWW.LIGHTING.PHILIPS.IT/) E INDICAZIONI DELLE VARIE COMPONENTI (IELABORAZIONE: ANDREA ARNAUDO)	78
FIGURA 21 SCHEMA DI PROTEZIONE CATODICA PER PALI IN ACCIAIO INTERRATI. FONTE: (), IELABORAZIONE GRAFICA ANDREA ARNAUDO	84

Nel presente lavoro di tesi, l'utilizzo di strumenti di intelligenza artificiale è stato limitato al supporto editoriale (correzione di refusi e riformulazione di alcuni paragrafi), alla traduzione di documenti in lingua olandese e al supporto alla ricerca della documentazione online. Tutti i contenuti testuali e iconografici presentati sono stati rielaborati integralmente in prima persona e non derivano da produzioni autonome degli strumenti utilizzati.