



Ricerca di Sistema elettrico

## Recupero di materiali ad elevato valore aggiunto da AEE

D. Fontana, R. De Carolis, M. Pietrantonio,  
S. Pucciarmati, G.N. Torelli

RECUPERO DI MATERIALI AD ELEVATO VALORE AGGIUNTO DA AEE

Fontana Danilo, De Carolis Roberta, Pietrantonio Massimiliana, Pucciarmati Stefano,  
Torelli Giorgia Nadia (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

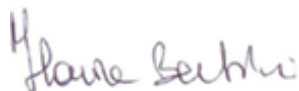
Piano Annuale di Realizzazione 2014

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

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Obiettivo: Valutazione della fattibilità del recupero di elementi pregiati da AEE di ultima generazione

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 VALUTAZIONE DELLA FATTIBILITÀ DEL RECUPERO DI ELEMENTI PREGIATI DA APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE DI ULTIMA GENERAZIONE .....	8
2.1 VALUTAZIONE DELLE POTENZIALITÀ DELLE FILIERE DI LED E OLED.....	8
2.1.1 I LED.....	8
2.1.2 Gli OLED.....	11
2.2 STATO DELL'ARTE SUI PROCESSI DI RECUPERO E INDIVIDUAZIONE DEI PROGETTI FINANZIATI A LIVELLO EUROPEO.....	13
2.3 CASO STUDIO: STUDIO PRELIMINARE PER IL RECUPERO DI MATERIALI DA LAMPADINE A LED.....	16
3 CONCLUSIONI.....	22
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	23
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	24

## Sommario

I dispositivi a LED/OLED sostituiranno nei prossimi decenni le tecnologie tradizionali di illuminazione: mentre quelli a LED (Light Emitting Diode) si stanno diffondendo rapidamente nei più svariati settori, la diffusione di quelli ad OLED (Organic Light Emitting Diode) risulta ancora piuttosto limitata (nonostante le grandi potenzialità di impiego) per la loro minore durata.

Sono numerosi gli apparecchi dove è, o potrebbe essere applicata la tecnologia a LED: spie, display di ultima generazione, illuminazione domestica, stradale etc.

Questo lavoro ha come scopo di realizzare uno studio preliminare di fattibilità inerente il recupero dei materiali da AEE (Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) di ultima generazione (lampade a LED e a OLED).

Secondo un'indagine condotta da McKinsey & Company intorno al 2025 tutte le apparecchiature relative all'illuminotecnica avranno adottato la tecnologia LED e inizieranno a giungere a fine vita le produzioni relative agli anni successivi al 2008. Attualmente non sono disponibili tecnologie mature per il recupero/riciclo di questi rifiuti "di frontiera".

Nel caso delle lampadine utilizzate prevalentemente ad uso domestico, ipotizzando un tempo di vita medio di quindici anni e la presenza di circa 20 dispositivi per nucleo familiare, si può ipotizzare che a partire dal 2025 in Italia possano giungere a fine vita annualmente circa 50 milioni di lampadine.

A questo flusso di rifiuti corrispondono quantità di materiali comprese tra 100-500 ton di LED, 500-2000 ton di metalli, 1000-1400 ton di plastica e circa 1000 ton di vetro.

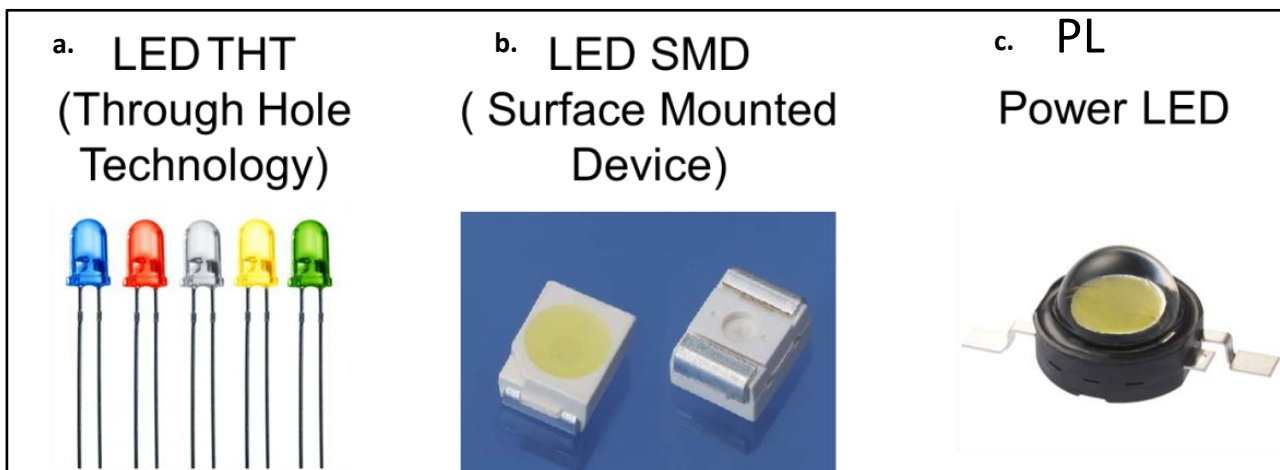
Per l'adeguata gestione di questi flussi è quindi auspicabile individuare per tempo strategie di trattamento e recupero dei materiali in essi contenuti. I materiali "tradizionali" come la plastica, i metalli ed il vetro possono essere trattati secondo quanto già avviene negli impianti per il trattamento dei RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) mentre per i LED è necessario pensare a nuovi processi di pretrattamento/riciclo/riuso.

## 1 Introduzione

Negli ultimi anni in Italia ed in Europa sono stati fatti notevoli progressi nell'ambito della raccolta e gestione dei rifiuti grazie alla diffusione sempre più capillare della raccolta differenziata e alla realizzazione di numerosi nuovi centri di raccolta dedicati anche ai RAEE.

Le AEE sono in continua evoluzione adottando soluzioni tecnologiche sempre più innovative e futuristiche fornite dalla ricerca applicata. Tra queste possiamo considerare le apparecchiature relative all'illuminotecnica: già oggi le lampade a fluorescenza hanno preso il posto delle classiche lampadine ad incandescenza ed è prevedibile nel breve futuro che in molte applicazioni le lampade a LED diverranno insostituibili.

I LED (Fig.1) come indicato dal loro stesso nome (Light Emitting Diode) sono diodi che emettono luce [1]: i diodi sono dispositivi elettronici a due terminali che consentono il passaggio di corrente elettrica in una sola direzione, con intensità di corrente che dipende dalla differenza di potenziale applicata ai capi del dispositivo.



**Figura 1. LED: alcuni esempi:**

**a. LED THT; b. LED SMD (fonte: Snow Dragon Industrial Co. Ltd); c. Power LED (fonte: Flashlight News)**

I LED oltre a comportarsi da normali diodi, hanno la proprietà aggiuntiva di emettere luce; per la loro fabbricazione richiedono l'utilizzo di alcuni specifici elementi chimici (fosforo, antimonio, arsenico, alluminio, gallio e indio). Vista la loro crescente diffusione, gli analisti si aspettano nel medio termine un aumento della domanda di questi elementi per rispondere alle maggiori esigenze di produzione.

L'approvvigionamento di alcuni di questi presenta particolari criticità (Fig.2) [2] in quanto l'estrazione primaria è localizzata esclusivamente in alcuni Paesi prevalentemente extra europei che quindi detengono il monopolio commerciale.

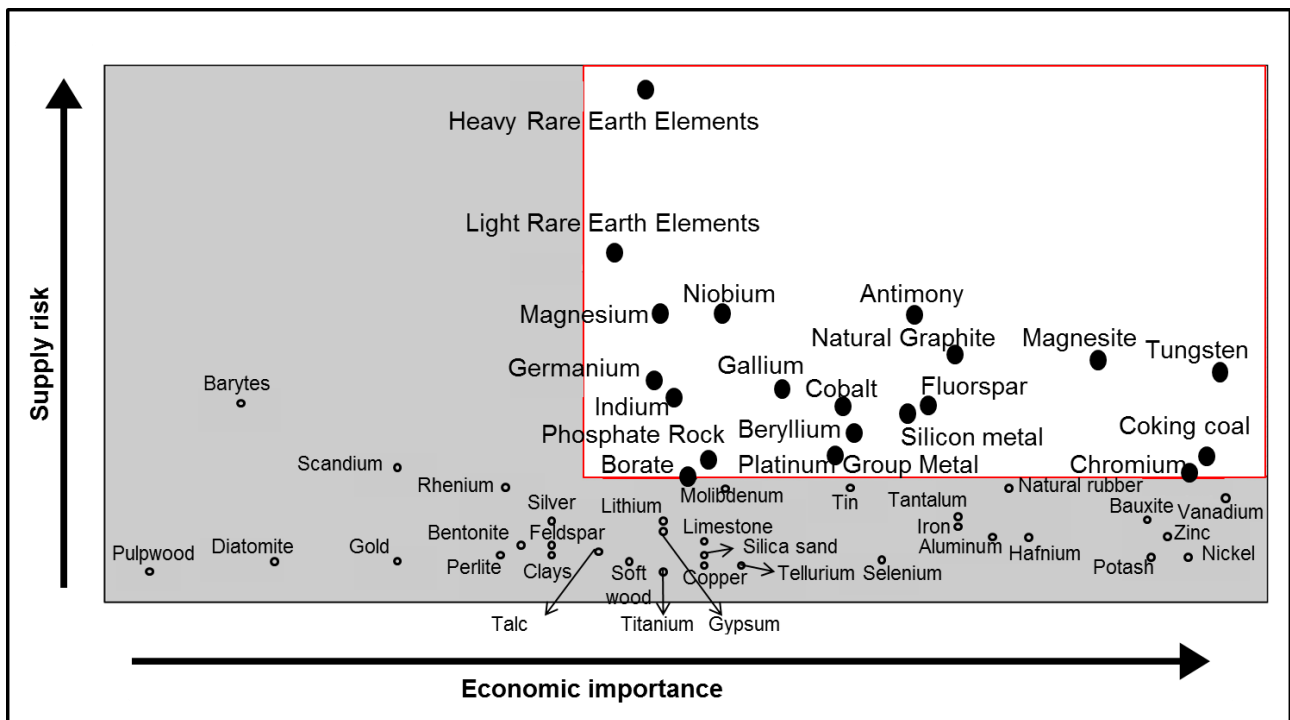


Figura 2. Materiali critici per l'Europa (Commissione Europea, Maggio 2014 [2])

Secondo le schede tecniche fornite dalle principali case produttrici, i LED sono dotati di un eccezionale tempo di vita [3] (circa 50000 ore in media): da questo dato, ipotizzando un utilizzo di 8 ore/giorno [4], si può stimare che possano trascorrere anche 15-20 anni prima che questi dispositivi diventino rifiuti.

Poiché l'adozione di questi dispositivi è iniziata in via significativa orientativamente nel 2008 [5-6], gran parte di essi non è ancora giunto a fine vita e di conseguenza la loro presenza nei rifiuti è ancora trascurabile rispetto al totale dei RAEE raccolti, ma ci si aspetta un incremento nei prossimi anni.

Sullo scenario dell'illuminotecnica, un'alternativa ai LED potrebbe essere rappresentata dagli OLED, di diffusione ancora piuttosto limitata ma con grandi potenzialità di impiego in applicazioni future.

La caratteristica principale degli OLED è il loro spessore estremamente ridotto che li rende particolarmente versatili; rispetto ai LED, gli OLED non sono sorgenti puntiformi, sono in grado di garantire un basso consumo, sono composti da materiali organici poco costosi e possono essere fatti aderire su superfici flessibili, aprendo nuove prospettive alle architetture luminose.

Le loro prestazioni non sono ancora paragonabili a quelle dei LED e quindi probabilmente per una loro diffusione capillare sul mercato si dovrà attendere qualche anno. A questo proposito nel 2005 era stato stimato che l'introduzione degli OLED nel settore dei personal computer era lontana almeno 4 o 5 anni [7], ma questa valutazione è ancora attuale; le applicazioni più diffuse sono ad oggi incentrate su dispositivi di piccole dimensioni.

Dal punto di vista del fine vita, molte sono le differenze tra le due tecnologie: gli OLED hanno una durata di vita nettamente inferiore rispetto ai LED anche se il trend sta migliorando conseguentemente ai grandi investimenti nel settore.

Tenendo conto che attualmente non sono disponibili tecnologie mature per il recupero/riciclo di questi rifiuti "di frontiera", è evidente l'urgenza di individuare strategie dedicate.

Con queste premesse, le attività illustrate in questo lavoro sono state focalizzate sulla valutazione delle potenzialità di recupero sulla base del tasso di crescita della produzione.

L'obiettivo di questa linea di attività è la valutazione della fattibilità del recupero di materiali da AEE di ultima generazione attraverso:

- la valutazione del fine vita dei prodotti, in termini di filiera e di potenzialità tramite la stima dell'immesso sul mercato poiché non sono ancora disponibili sufficienti quantità di tali rifiuti a fine vita;
- uno studio preliminare sullo stato dell'arte del recupero di elementi pregiati da prodotti elettrici ed elettronici di recente introduzione sul mercato (LED, OLED), che entreranno nella filiera dei RAEE nell'arco di qualche anno e ricerca finalizzata all'individuazione di progetti finanziati a livello Europeo (FP7, Horizon 2020, Life, CIP Ecoinnovation) relativi al recupero di elementi pregiati da LED e OLED.

## 2 Valutazione della fattibilità del recupero di elementi pregiati da apparecchiature elettriche ed elettroniche di ultima generazione

### 2.1 Valutazione delle potenzialità delle filiere di LED e OLED

#### 2.1.1 I LED

A livello mondiale il mercato dell'illuminazione è in forte crescita e la tecnologia LED ha ottime prospettive di sviluppo nonostante ancora non sia possibile sostituirla completamente alle tecnologie tradizionali [1].

Un'indagine condotta da McKinsey & Company nel 2012 [8], come riportato nelle Fig.3 e 4, ha indicato che l'industria si aspetta che i LED diventino la tecnologia commercialmente più diffusa per l'illuminazione e che il mercato atteso per i prodotti del settore illuminazione supererà i 100 miliardi di euro nel 2020.

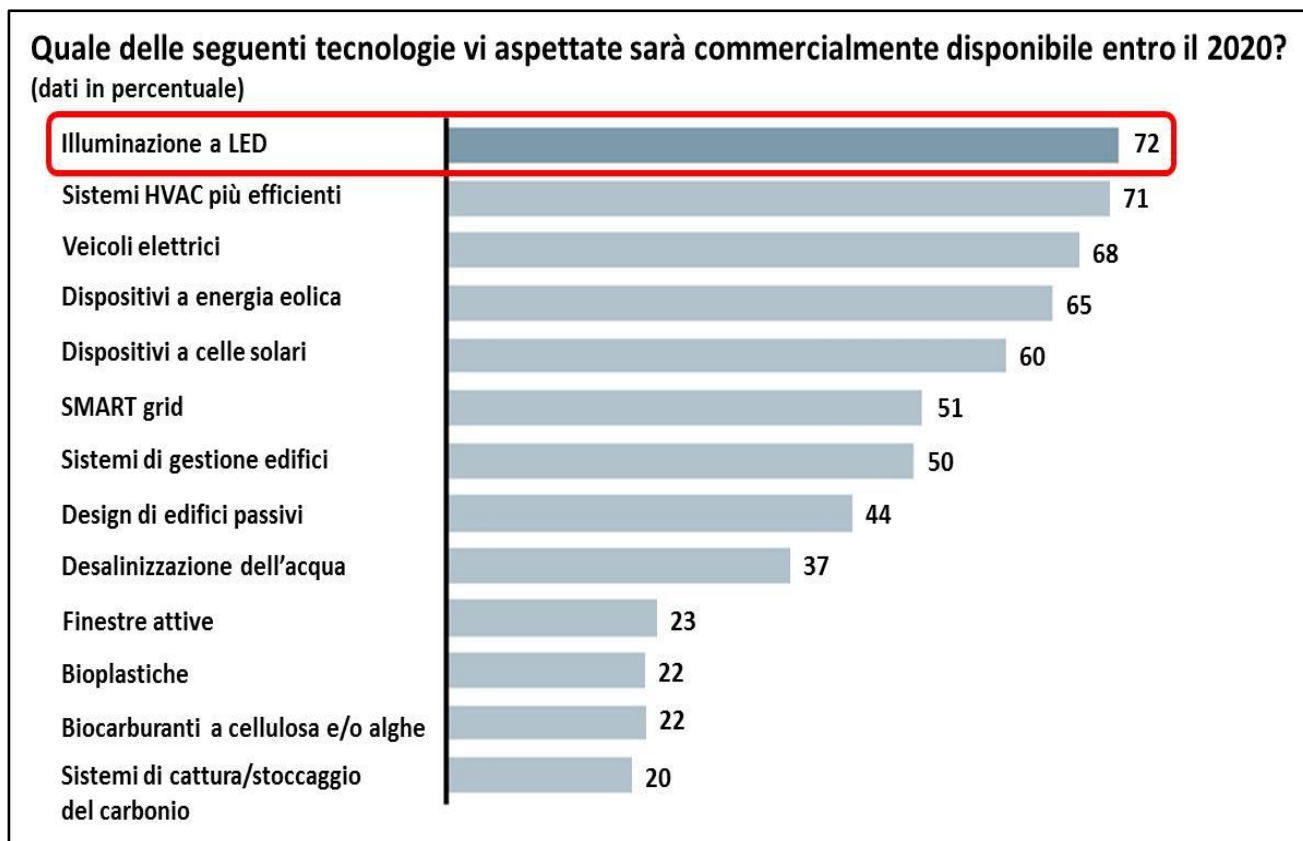
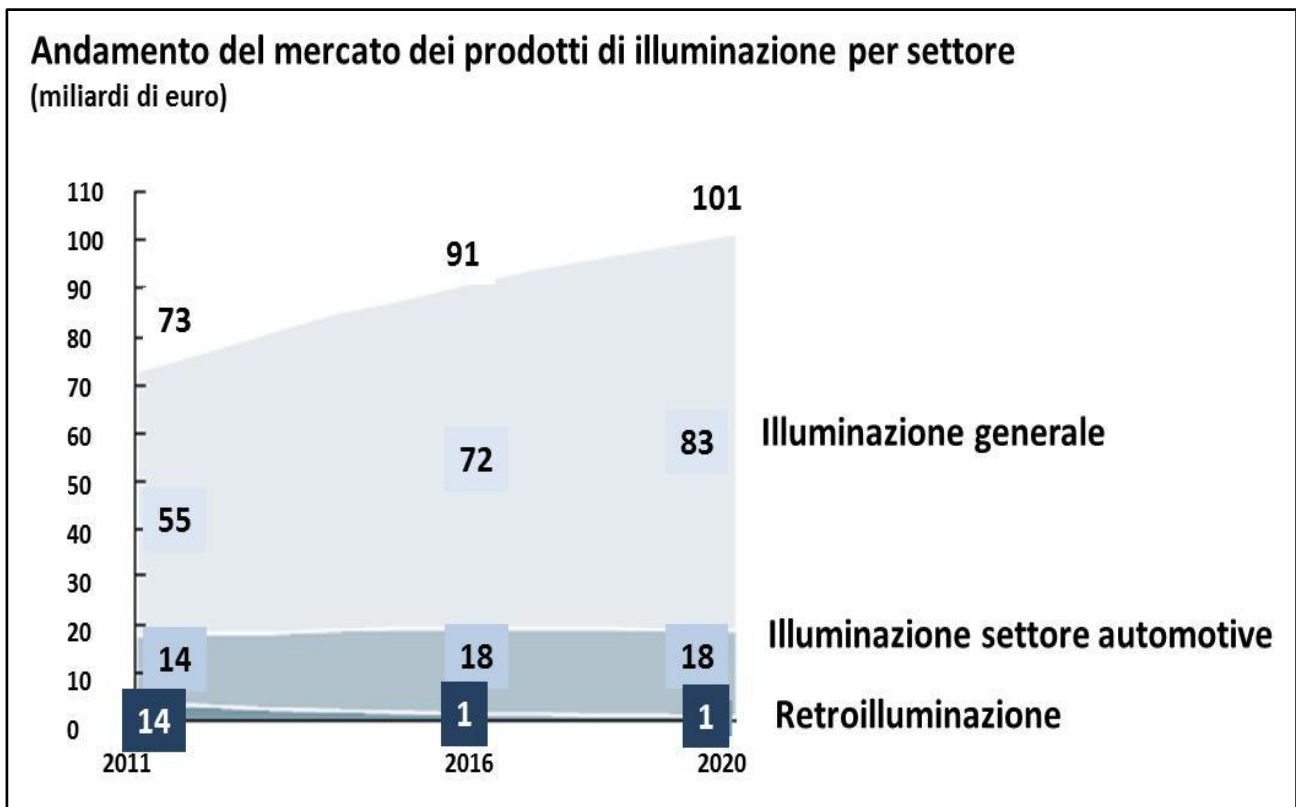


Figura 3. Indagine McKinsey & Company [8] condotta intervistando 4000 manager impiegati in diversi settori industriali e differente posizione geografica





**Figura 4. Aspettative di mercato dei prodotti di illuminazione per settore di applicazione con previsione al 2020 (McKinsey & Company, [8])**

Oltre a fattori puramente tecnologici (durata di vita ed efficienza) altri aspetti come quelli normativi ed economici incidono sulla rapida diffusione dei LED. In particolare l'attuale regolamentazione, vincolando l'immissione sul mercato dei vecchi sistemi di illuminazione (vedi ad es. le lampade a incandescenza) e prevedendo norme più stringenti sull'efficienza energetica ha avuto ricadute positive sullo sviluppo del mercato dei LED.

I costi di tali dispositivi di illuminazione risultano in realtà ancora significativamente superiori a quelli tradizionali, ma l'eccezionale durata del ciclo di vita e l'elevata efficienza rendono la tecnologia potenzialmente conveniente a lungo termine. La tendenziale diminuzione dei costi sta favorendo ulteriormente la penetrazione nel mercato, che secondo il report di McKinsey [8], si prevede al 2020 del 100% per la retroilluminazione dei monitor, del 69% per l'illuminazione generale e del 36% per il settore automotive, che rappresentano le principali applicazioni dei dispositivi LED (Fig.5).

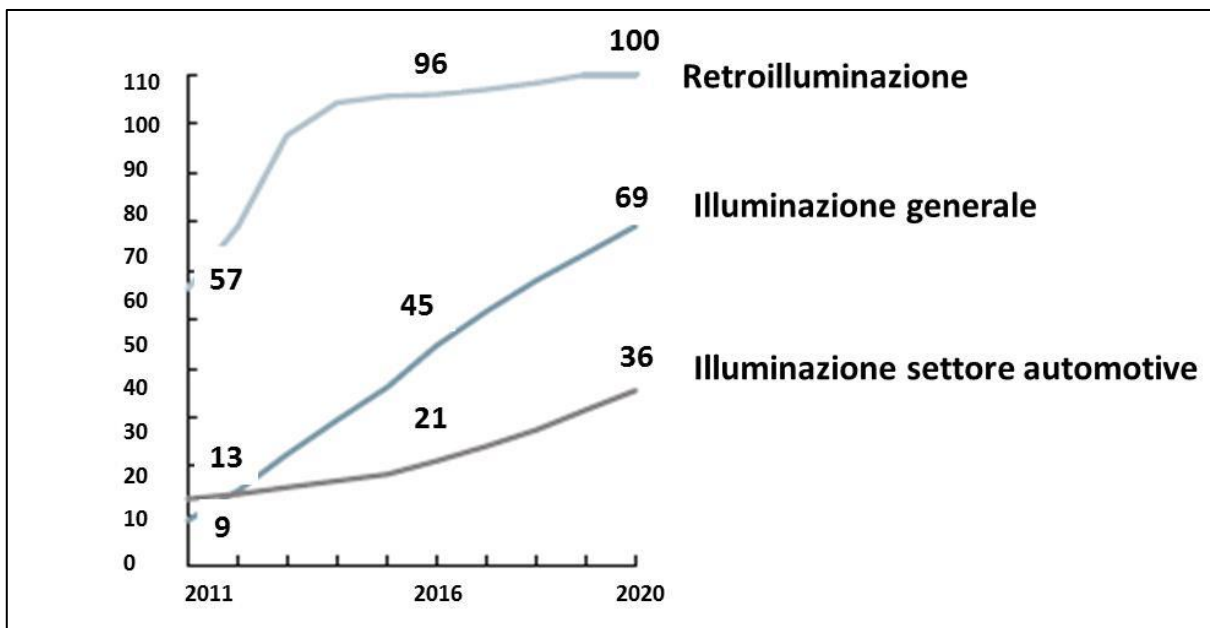


Figura 5. Market share dei LED per settore [8]

Sulla base di questi dati, di quelli riportati dall'ISTAT sui beni posseduti dalle famiglie [9-10] e di quelli del mercato delle auto di KPMG [11] è stata elaborata una previsione al 2035 per applicazione, al fine di valutare l'opportunità di individuare una strategia di recupero per i materiali ad alto valore aggiunto quando si avrà una significativa disponibilità di prodotti a fine vita.

In Fig.6 è riportata la previsione sulla penetrazione della tecnologia LED nel mercato.

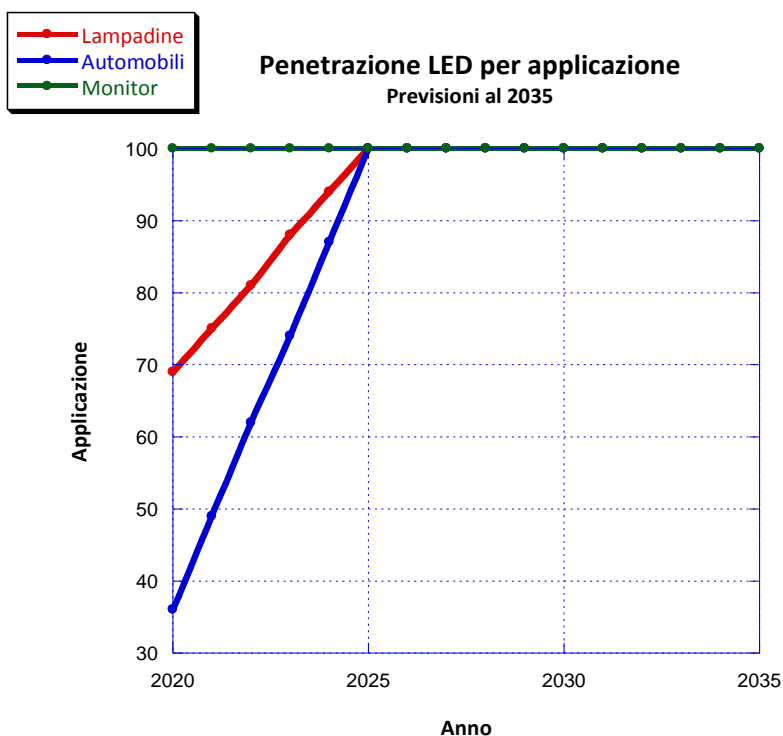


Figura 6. Previsioni di penetrazione LED al fine vita per applicazione

Si sottolinea comunque che generalmente le apparecchiature che utilizzano LED hanno un tempo di vita media inferiore a quella dei LED stessi (per esempio per i monitor è compresa tra 3 e i 5 anni [12]), e quindi non è da escludere la possibilità di investire in tecnologie per il loro recupero integrale dal prodotto complesso, come ipotizzato in recenti attività di ricerca [13].

Secondo le previsioni degli analisti, intorno al 2025 tutte le apparecchiature relative all'illuminotecnica avranno adottato la tecnologia LED e inizieranno a giungere a fine vita le produzioni relative agli anni successivi al 2008.

Riferendoci solo all'Europa, inoltre, un modello sviluppato dal Center for Law and Social Policy (CLASP), agenzia internazionale che promuove l'utilizzo di dispositivi ad alta efficienza energetica ha previsto che entro il 2030 i LED soddisferanno le necessità di 2/3 dell'illuminazione non residenziale. Questo implica che, nonostante si ipotizzi che la domanda di illuminazione cresca, in realtà l'utilizzo dell'energia scenderà del 24%, portando ad un risparmio annuale fino a 53 TWh [14].

Nel caso delle lampadine utilizzate prevalentemente in ambito domestico, prevedendo un tempo di vita di quindici anni e la presenza in ogni nucleo familiare di circa 20 dispositivi, al fine di valutare le potenzialità di recupero dei materiali si può ipotizzare che a partire dal 2025 giungano a fine vita annualmente circa 50 milioni di unità (lampadine).

Il dato è destinato ovviamente a subire le fluttuazioni relative al mercato, in considerazione della completa sostituzione delle tecnologie tradizionali di illuminazione in tali settori.

In previsione dell'arrivo di questi flussi di rifiuti, è quindi auspicabile individuare per tempo strategie di trattamento e recupero dei materiali in essi contenuti [15].

### 2.1.2 Gli OLED

La diffusione degli OLED è attualmente limitata dalla breve durata del ciclo di vita, nettamente inferiore a quella dei LED; prove effettuate su pannelli OLED TV hanno rilevato che dopo 1000 ore il potere illuminante blu era diminuito del 12%, quello del rosso del 7% e quello del verde dell'8% [16]. Complessivamente gli OLED blu hanno una durata di circa 14.000 ore a metà del potere illuminante originale (5 anni a 8 ore al giorno), se utilizzato per gli schermi piatti. Questo dato è nettamente inferiore alla durata tipica di LCD LED e tecnologia PDP (Plasma Display Panels). Negli ultimi anni la ricerca è stata focalizzata sul miglioramento delle proprietà e della durata di questi dispositivi [17], che tuttavia sono ancora soggetti ad una maggiore velocità di perdita del potere illuminante, come mostrato in Fig.7.

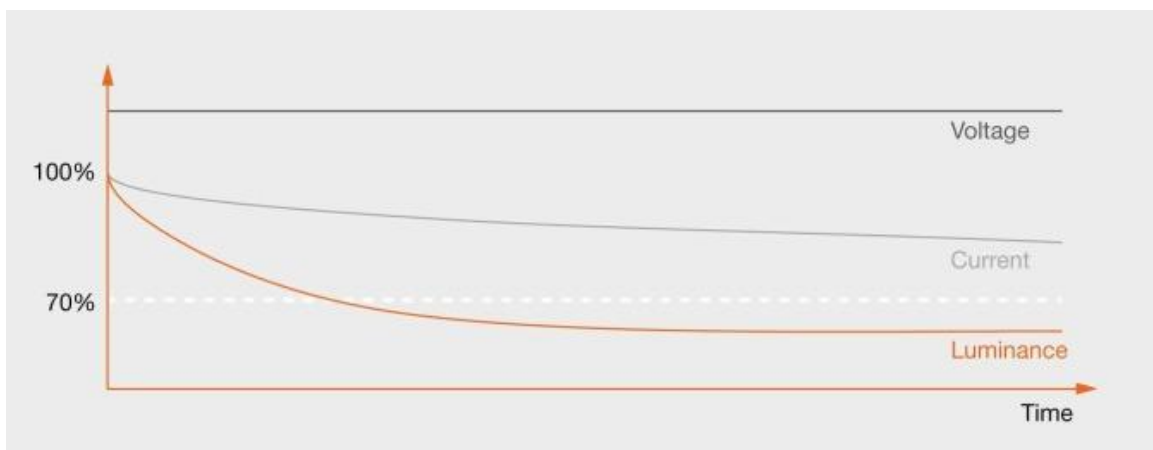


Figura 7. Andamento del potere illuminante di OLED operanti a voltaggio costante (fonte: OSRAM)

Questo limite può in parte essere superato lavorando a corrente costante invece che a voltaggio costante, come mostrato in Fig.8.

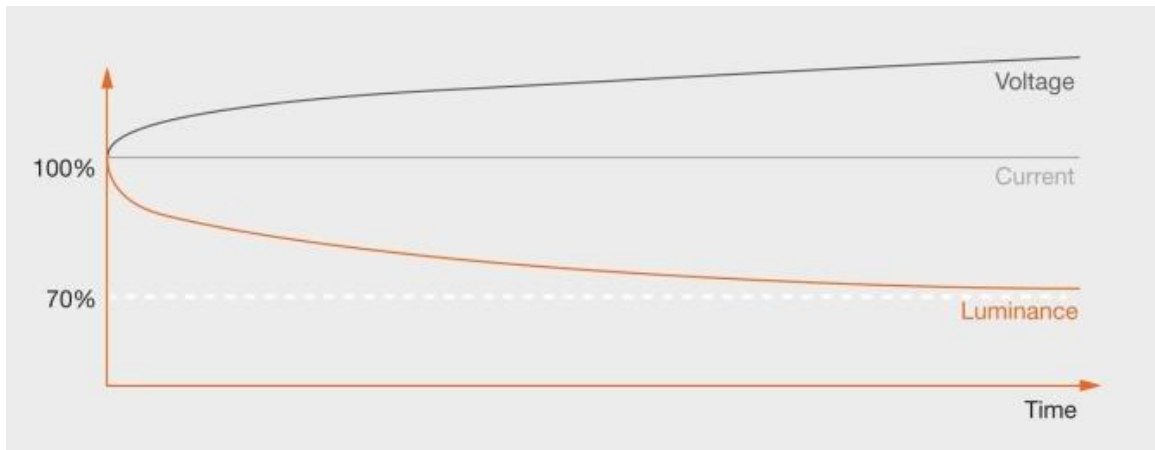


Figura 8. Andamento del potere illuminante di OLED operanti a corrente costante (fonte: OSRAM)

È prevista anche per questo settore una rapida crescita a causa delle loro caratteristiche peculiari che li rendono appetibili sia dal punto di vista del consumo energetico che per le possibili applicazioni in dispositivi ispirati alle nuove tecnologie di comunicazione integrata. Uno studio di n-tech Research (Nanomarkets) [18] prevede fatturati che vanno da 970 milioni di dollari nel 2015 ad oltre 4,4 miliardi nel 2020 per raggiungere i 9,7 miliardi nel 2022 (Fig.9).

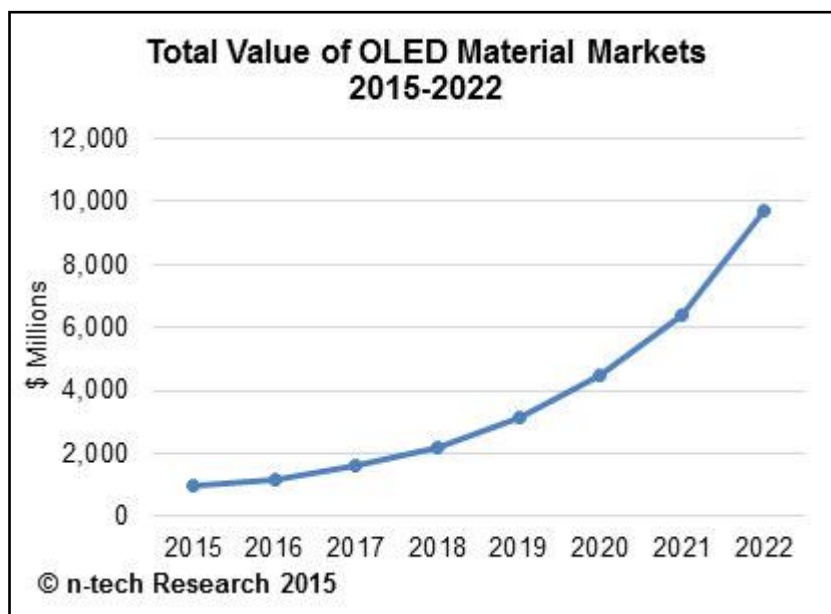


Figura 9. Previsioni sul mercato degli OLED al 2022 [16].

Per gli OLED, ancor più che per i LED, non sono ancora disponibili tecnologie di recupero specifiche.

## 2.2 Stato dell'arte sui processi di recupero e individuazione dei progetti finanziati a livello europeo

I LED, che come discusso nella sezione precedente sono candidati a diventare la tecnologia predominante per l'illuminazione artificiale, contengono in piccolissime quantità diversi materiali critici [19-20-21] come Ga, In e terre rare.

Un ostacolo al recupero dei materiali ad alto valore aggiunto oltre alla loro concentrazione è dovuto alle difficoltà di separare i LED dai dispositivi in cui sono collocati e di cui costituiscono parte integrante.

Attualmente l'intero flusso di rifiuti da apparecchiature contenenti LED non è stato ancora valorizzato [22] a causa della scarsa disponibilità di prodotti arrivati a fine vita e dell'inadeguatezza delle filiere esistenti: questi rifiuti contengono sostanze pericolose come arsenico, piombo, gallio, indio e antimonio, che possono avere effetti nocivi sulla salute umana e sugli ecosistemi [23]; tuttavia le difficoltà di rimozione dei dispositivi luminosi dai prodotti complessi a fine vita rendono difficile la loro valorizzazione.

A livello europeo negli ultimi 10 anni c'è stato un crescente interesse che ha determinato lo stanziamento di fondi dedicati alla ricerca sui LED e gli OLED, anche se ad oggi la quasi totalità dei progetti (Tab.1) ha avuto come obiettivi lo sviluppo di tecnologie per la produzione di dispositivi per aumentare l'efficienza e/o la durata di vita.

**Tabella 1. Progetti europei con oggetto i LED e/o gli OLED (fonte: CORDIS)**

Titolo	Programma e periodo	Budget complessivo (euro)	Tematica
Organic LEDs for ICT and Lighting Applications (OLLA)	FP6-IST 2004-2008	19.328.407	Gli OLED sono le sorgenti luminose di nuova generazione. Il progetto OLLA ha come obiettivo lo sviluppo di nuovi materiali ad alta efficienza e in parallelo la definizione dell'architettura più adatta e conveniente per l'implementazione degli OLED. Attraverso il progetto OLLA, partner industriali, istituzionali e accademici di livello mondiale integreranno le loro risorse per la ricerca e sviluppo, al fine di fare un rapido passo avanti nella tecnologia OLED e di essere in grado di portare soluzioni applicative in modo tempestivo sul mercato mondiale.
Novel Inorganic Nanostructured Materials and Devices with Enhanced Photoemission Activity and Thermal Stability	FP6-IST 2005-2008	2.331.869	L'obiettivo del STABILIGHT è la progettazione di dispositivi prototipi di nano-fotonica basati su materiali nanostrutturati inorganici. Il dispositivo emettitore di luce sviluppato in STABILIGHT sarà caratterizzato da uno strato attivo inorganico. La luce viene emessa su entrambi i lati. Questo dispositivo è progettato per superare le attuali limitazioni della tecnologia OLED per applicazioni automotive.
Combined Organic LED Technology for Large Area Transparent and low cost lighting Applications (ComboLED)	FP7-ICT 2008-2011	7.198.323	Obiettivi del progetto ComboLED sono la riduzione dei costi di produzione nei processi industriali degli OLED.

Titolo	Programma e periodo	Budget complessivo (euro)	Tematica
Organic LED Lighting in European Dimensions (OLED100)	FP7-ICT 2008-2011	19.738.259	L'obiettivo generale di OLED100 è di sviluppare tecnologie OLED efficienti per il settore dell'illuminazione generale in Europa. I recenti studi condotti dal Joint Research Centre, mostrano un'enorme potenzialità di risparmio energetico. Per l'illuminazione generale, gli OLED per competere con soluzioni già esistenti devono mirare al raggiungimento di 100 lm/W e a una vita di 100000 ore (LED inorganici). La partecipazione dei produttori di lampade come Philips e Osram assicurerà un rapido trasferimento tecnologico di qualsiasi risultato nei prodotti reali. Il progetto rafforzerà la posizione di leadership dell'industria europea di illuminazione e punta a creare posti di lavoro.
Graphene chemical vapor technology: roll to roll technology	FP7-NMP 2011-2016	10.537.738,4	Il progetto mira a sviluppare tecnologie di deposizione chimica di strati di grafene per elettrodi trasparenti in applicazioni LED e display. La metodica roll-to-roll fornisce un processo a basso costo per l'accrescimento di grafene su silicio. Il progetto punta ad ottenere prodotti come elettrodi trasparenti per OLED e LED GaN, interruttori ottici, interconnessioni VLSI e sensori.
Development of an automated digital radiography system for the inspection of plastic electronics (PlastronicsSpec)	FP7-SME 2011-2013	1.434.540,6	Per i pannelli o display OLED di prima generazione è previsto un mercato globale in crescita dal livello attuale di 0,5 miliardi di euro a 96 entro il 2019 e di 330 nel 2029. L'assenza di controlli in linea durante la fabbricazione può causare molti difetti con relativi tassi di scarto elevati. Un obiettivo del progetto è quello di eseguire lo scarto automatico e immediato dei prodotti difettosi con il minimo spreco. Si stima un vantaggio economico dovuto ad un'implementazione su larga scala della tecnologia in € 4 miliardi.
Luminescent Hybrid Nanomaterial showing liquid crystalline properties	FP7-PEOPLE 2012-2014	201.932,4	Al fine di minimizzare il consumo di energia degli schermi LCD vengono sperimentate nuove tecnologie OLED che sostituiscono i composti organici con fosfori inorganici, sviluppando materiali innovativi multifunzionali nanostrutturati. Il lavoro è di particolare interesse per i ricercatori ma vi è anche un notevole potenziale industriale e commerciale nel medio e lungo termine.

Titolo	Programma e periodo	Budget complessivo (euro)	Tematica
Human-centric Intelligent LED engines for the take up of SSL in Europe	FP7-ICT 2013-2016	4.630.310	Il progetto HILED darà un impulso allo stato dell'arte dei Solid State Lighting (SSL).
Development and demonstration of flexible multifunctional ETFE module for architectural façade lighting	FP7-ENERGY 2013-2017	3.203.221	L'obiettivo generale del progetto è lo sviluppo, di un modulo di Etilene TetrafluoroEtilene (ETFE) multifunzionale flessibile per l'illuminazione di facciate architettoniche. I principi di base presentano importanti elementi innovativi che si basano sulla combinazione di un'attraente architettura basata su ETFE come materiale da costruzione che agisca come un generatore elettrico e su dispositivi di illuminazione basati su tecnologie LED-RGB e OLED, così come sul controllo dei dispositivi LED attraverso la tecnologia wireless.
Large Area Solid State Intelligent Efficient luminaires	FP7-ICT 2014-2016	4.373.099	L'obiettivo principale del consorzio LASSIE-FP7 è quello di implementare su larga scala e a basso costo moduli di illuminazione SSL LED ad alta efficienza e con alta qualità della luce prodotta, nonché la valutazione del loro impatto ambientale durante l'intero ciclo di vita.
Flexolighting	H2020- EU.2.1.1.6. 2015-2018	4.358.983,5	Il programma Flexolighting si concentra sulla ricerca e innovazione di materiali, processi e tecnologie dei dispositivi per l'illuminazione OLED con l'intenzione di costruire una catena di valore in Europa.

Per quanto riguarda la ricerca sul riciclo come strumento di risparmio di risorse naturali si segnala il progetto cycLED [24] che ha come obiettivo la produzione di LED con minor consumo di materie prime critiche e già predisposti per il riciclo.

### 2.3 Caso studio: studio preliminare per il recupero di materiali da lampadine a LED

Le lampadine a LED comprendono una notevole varietà di dispositivi per illuminazione differenti per struttura, composizione e tipologia di LED in esse contenute. Possono essere classificate in tre categorie a seconda dei LED che le costituiscono:

- a) lampade con LED THT
- b) lampade con LED SMD
- c) lampade con LED PL.

a) I **LED THT** (Through Hole Technology) per svolgere la loro funzione devono essere posizionati all'interno di fori; sono i più piccoli LED esistenti e sono protetti da capsule tonde di materiale plastico di diametro compreso tra 3 e 5 mm all'interno delle quali è presente un chip appoggiato su un riflettore collegato al catodo. Il contatto elettrico con l'anodo è ottenuto con un sottile filo d'oro. La luce viene emessa attraverso una lente integrata nel package e i diversi angoli di emissione luminosa vengono ottenuti variando la distanza tra lente e semiconduttore o cambiando la forma della lente stessa (Fig.10).

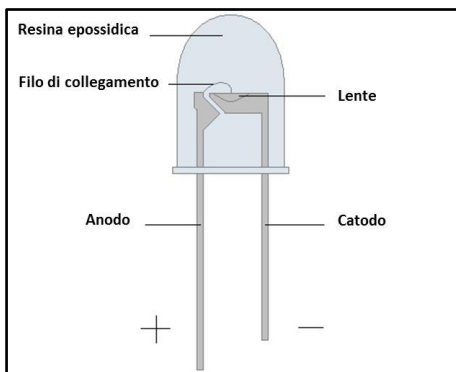


Figura 10. Struttura LED THT (fonte: Entraid ELEC)

b) I **LED SMD** (Surface Mounted Device) si presentano come un'architettura le cui strutture laterali hanno la funzione di catodo e anodo e la base superiore emette luce; sono realizzati in materiale plastico che funziona anche da riflettore. Il chip è posato in una cavità riempita con resine epossidiche, per proteggerlo dall'ambiente esterno e per migliorarne l'emissione della luce (Fig.11).

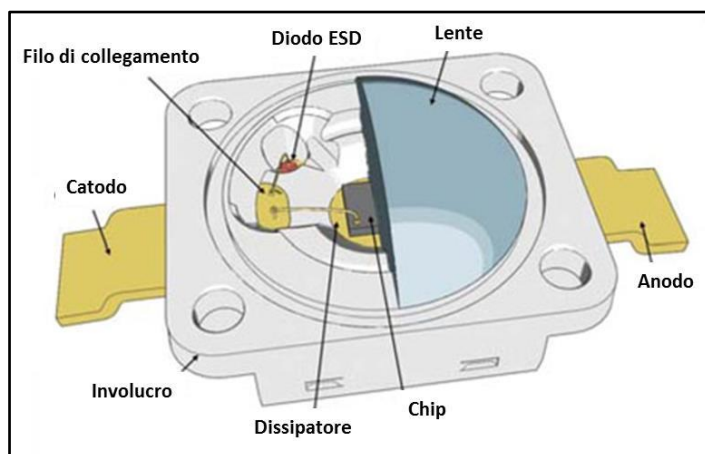


Figura 11. Struttura di un LED SMD (fonte: OSRAM)



c) I **LED PL** (Power LED) sono caratterizzati da potenze di funzionamento superiori e per l'emissione di luce particolarmente brillante. Tale tecnologia permette di lavorare direttamente in circuiti a corrente alternata e di ridurre le perdite di efficienza (Fig.12).

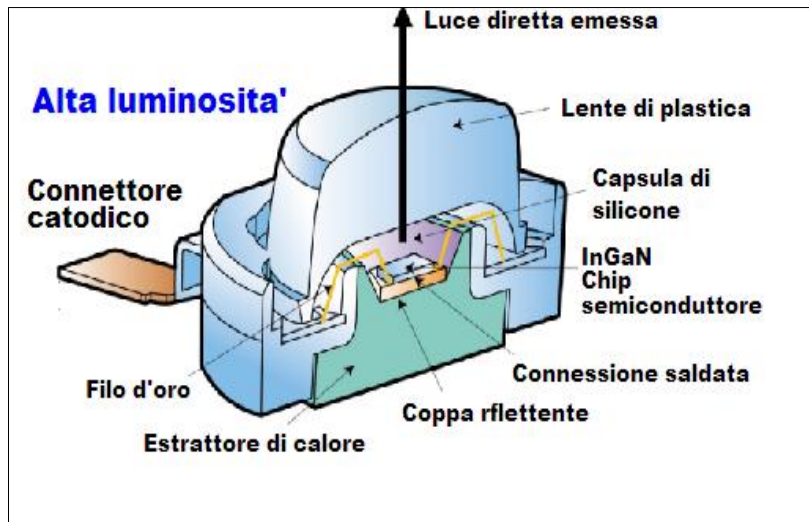


Figura 12. Struttura di un LED PL (fonte: The Worlds of David Darlings – Encyclopedia of alternative energy)

Al fine di studiare le potenzialità di recupero di materie prime dalle lampadine a LED è stata effettuata su di esse una caratterizzazione merceologica.

Data l'estrema eterogeneità di tali dispositivi sono state prese in esame tre tipologie di lampadine a LED (una per categoria).

Per i LED THT sono state esaminate le lampadine modello VALEX (peso unitario medio 63g) contenenti ciascuna 80 LED THT (Fig.13):



Figura 13. Lampadina a LED THT modello Valex

I dispositivi sono stati disassemblati mediante una pinza e un saldatore (Fig. 14), i materiali in esso contenuti sono stati separati in quattro frazioni (plastica, vetro, metallo, LED THT) e pesati.



Figura 14. Materiali costitutivi la lampadina VALEX contenente LED THT

Nella Tab.2 è riportata la composizione percentuale in peso delle quattro frazioni; i LED THT costituiscono circa il 15% in peso del campione.

Tabella 2. Composizione merceologica lampadina VALEX

Componente	Peso (%)
LED THT	15
Metalli	17
Plastica	42
Vetro	26

Per i LED SMD sono state esaminate le lampadine Wing Power (peso unitario medio 68g) contenenti ciascuna 14 LED SMD (Fig.15).

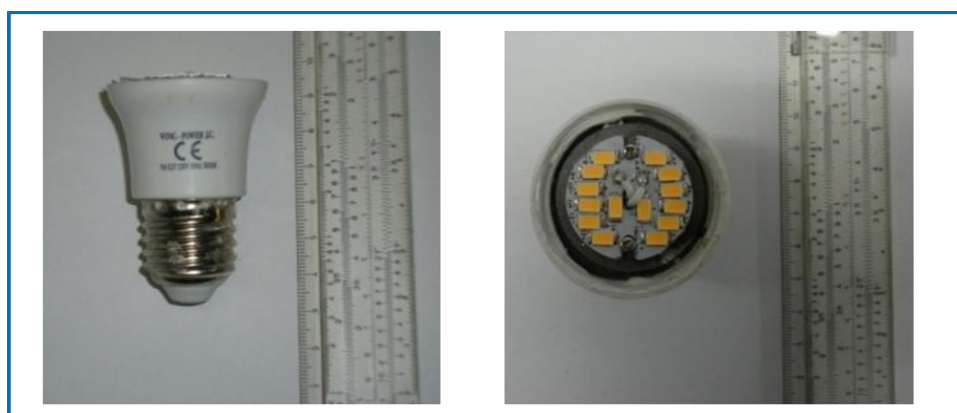


Figura 15. Lampadina a LED SMD modello Wing Power

In questo caso non è stato possibile dissaldare i LED SMD dalla base metallica perché troppo sottili (Fig.16);



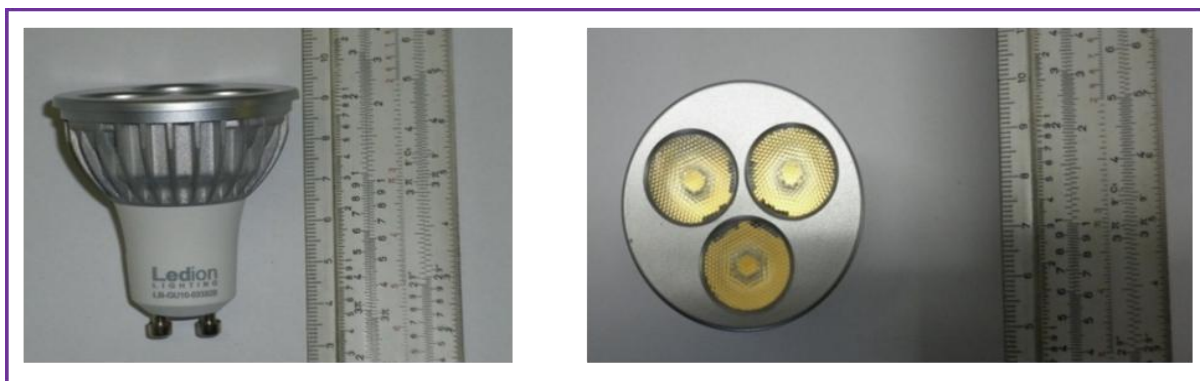
**Figura 16. Materiali costitutivi la lampadina modello Wing Power contenente LED SMD**

Le rimanenti parti sono state separate come nel caso delle lampadine Valex in quattro frazioni riportate in Tab.3.

**Tabella 3. Composizione merceologica lampadina Wing Power**

Componente	Peso (%)
LED SMD + Base	6
Metalli	41
Plastica	28
Vetro	25

Per i LED PL sono state esaminate le lampadine a faretto LED PL LEDION (peso unitario medio g 64) contenenti ciascuna 3 (Fig.17)



**Figura 17. Lampadina a LED PL modello LEDION**

I dispositivi sono stati smontati meccanicamente separando le frazioni sopra descritte (Fig.18):



**Figura 18. Materiali costitutivi la lampadina modello LEDION contenente LED PL**

Nella Tab.4 è riportata la composizione % secondo le quattro frazioni individuate:

**Tabella 4. Composizione merceologica lampadina LEDION**

Componente	Peso (%)
Power LED	3
Metalli	57
Plastica	40

Dalla caratterizzazione merceologica effettuata sulle tre tipologie di lampade a LED esaminate, è emerso che solo una piccola percentuale in peso (tra il 3 e il 15%) è attribuibile ai singoli LED.

La percentuale in peso dei LED varia notevolmente da lampadina a lampadina sia a causa della struttura stessa del dispositivo illuminante che del tipo di LED in esso contenuto: ad esempio nelle lampadine modello VALEX sono contenuti 80 LED THT, in quelle Wing Power 14 LED SMD e in quelle LEDION 3 LED PL. Nella Tab.5 sono riportati i pesi (ottenuti dalla media aritmetica su 50 campioni) per ciascun tipo di LED delle tre tipologie sopra citate.

**Tabella 5. Peso medio per ciascun tipo di LED**

LED	Peso [g]
THT	0,30
SMD	0,03
PL	0,60

I PL pesano circa il doppio dei THT e venti volte più degli SMD.

Nella Tab.6 sono riportate le quantità dei materiali potenzialmente recuperabili

- tenendo conto dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione merceologica delle tre tipologie di campioni esaminate, (nell'ipotesi che la quantità totale dei dispositivi dismessi sia costituita da un'unica tipologia di lampadine)
- prendendo in considerazione l'ipotesi di scenario illustrata nel paragrafo 2.1.1 (secondo la quale è stato stimato un flusso di 50 milioni di lampadine a fine vita a partire dal 2025)

**Tabella 6. Materiali potenzialmente recuperabili da 50 milioni di lampadine delle tipologie indicate**

<b>Lampadina</b>	<b>LED [ton]</b>	<b>Metalli [ton]</b>	<b>Plastica [ton]</b>	<b>Vetro [ton]</b>
<i>Valex</i>	472,5	535,5	1323	819
<i>Wing Power</i>	204	1394	952	850
<i>Ledion</i>	96	1824	1280	-

Materiali come la plastica, i metalli e il vetro possono seguire percorsi di riciclo/recupero ormai consolidati mentre per quanto riguarda la frazione costituita dai LED (100-500 ton) è necessario individuare strategie per la loro valorizzazione.

Si sottolinea che le quantità sopra indicate sono relative solo all'uso domestico e che ulteriori flussi giungeranno dai settori industriali, professionali e automotive.

### 3 Conclusioni

I dispositivi a LED/OLED sostituiranno nei prossimi decenni le tecnologie tradizionali di illuminazione, tuttavia mentre i LED si stanno diffondendo rapidamente nei più svariati settori, la diffusione degli OLED risulta ancora piuttosto limitata (nonostante le grandi potenzialità di impiego) per la loro attuale minore durata.

Secondo le previsioni degli analisti, intorno al 2025 tutte le apparecchiature relative all'illuminotecnica avranno adottato la tecnologia LED e inizieranno a giungere a fine vita le produzioni relative agli anni successivi al 2008.

Nel caso delle lampadine utilizzate prevalentemente ad uso domestico, prevedendo un tempo di vita medio di quindici anni e il possesso di circa 20 dispositivi per nucleo familiare, si può ipotizzare che a partire dal 2025 possano giungere a fine vita annualmente circa 50 milioni di lampadine.

A questo flusso di rifiuti corrispondono quantità di materiali comprese tra 100-500 tonnellate di LED, 500-2000 tonnellate di metalli, 1000-1400 tonnellate di plastica e circa 1000 tonnellate di vetro.

Per l'adeguata gestione di questi flussi è quindi auspicabile individuare per tempo strategie di trattamento e recupero dei materiali in essi contenuti. I materiali "tradizionali" come la plastica, i metalli ed il vetro possono essere trattati secondo quanto già avviene negli impianti per il trattamento dei RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) mentre per i LED è necessario pensare a nuovi processi di pretrattamento/riciclo/riuso.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. F. Bisegna, F. Gugliermetti, M. Barbalace, L. Monti, "Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes)", Report RdS/2010/238.
2. European Commission, Critical raw materials for the EU (2014).
3. Lumileds Holding B.V, "Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems paper" (2015).
4. ISTAT, "I consumi energetici delle famiglie" (2012).
5. Global Lighting association "Global LED Market Overview and Forecast" (2012).
6. Statista Statistics, "LED market: global sales of die units between 2008 and 2016" (2015).
7. European Commission DG TREN, "Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors Final Report (Task 1-8)" (2005), pag. 203.
8. McKinsey & Company, "Lighting the way: perspectives on the global lighting market" (2012).
9. ISTAT, "I cittadini e le tecnologie della comunicazione" , Indagine Multiscopo sulle famiglie "I cittadini e il tempo libero", (2000, Aggiornamento Maggio 2007)
10. ISTAT, "I cittadini e le nuove tecnologie" (2014)
11. KPMG, "Global Automotive Retail Market" (2013).
12. X. Zhuang, W. He, G. Li, J. Huang, Y. Ye, "Materials separation from Waste Liquid Crystal Displays using combined physical methods", Polish Journal of Environmental Studies, 21, 6 (2012), 1921-1927.
13. L. O'Donoghue, H. Lewis, A. Ryan, "System and method for removal of hazardous substances from liquid crystal displays", US8764503, EP2512699.
14. Clasp, "Estimating potential additional energy savings from upcoming revisions to existing regulations under the ecodesign and energy labelling directives - a contribution to the evidence base" (2013).
15. ERECON, "Strengthening the European Rare Earths supply-chain - Challenges and policy options, European rare earths competency network", (2014).
16. HDTV Info Europe, "OLED TV estimated lifespan shorter than expected", (2008).
17. Global Post, "Japanese company doubles diode panel's life span", (2014).
18. n-tech Research (Nanomarkets), "OLED Materials Markets 2015-2022: momentum and opportunities", (2015).
19. W.J. Van den Hoek, G.M.J.F. Luijks, C.G.H., Hoelen, "Lamps . Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry" (2010), pag 53.
20. K.A Franz, W.G Kehr, A.Siggel, J. Wiczoreck, W. Adam, "Luminescent Materials. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry" (2010), pag 41.
21. OKO-Institut, "Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament" (2011).
22. R.U. Ayres, G. Villalba Mendez, L. Talens Peiró, "Chapter 4 - Recycling Rare Metals", Handbook of recycling - State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists (2014), pp. 27-38.
23. S.R. Lim, D. Kang, O.A. Ogunseitan, J.M. Schoenung, "Potential environmental impacts of light-emitting diodes (LEDs): metallic resources, toxicity, and hazardous waste classification", Environmental Science & Technology, 45, 1 (2011), pp. 320-327.
24. Progetto CYC-LED, <http://www.cyc-led.eu/About.html>

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

LED = Lighting Emitting Diode

OLED = Organic Lighting Emitting Diode

AEE = Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche

RAEE = Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche

PDP = Plasma Display Panels