



Dipartimento di scienze economiche,
aziendali, matematiche e statistiche
“Bruno de Finetti”

Research Paper Series, N. 3, 2017

APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA LCA ALL’INTERVENTO DI MODIFICA DEGLI IMPIANTI SEMAFORICI NEL COMUNE DI UDINE

PAOLO BOGONI

Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche “Bruno de Finetti”, Università degli Studi di Trieste

BARBARA CAMPISI

Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche “Bruno de Finetti”, Università degli Studi di Trieste

LUCIA PIANI

*Dipartimento di Scienze AgroAlimentari, Ambientali e Animali
Università degli Studi di Udine*



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE**

Research Paper Series

Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche “Bruno de Finetti”

Piazzale Europa 1

34127, Trieste

Tel.: +390405587927

Fax: +390405587033

<http://www.deams.units.it>

EUT Edizioni Università di Trieste

Via E.Weiss, 21 - 34128 Trieste

Tel. +390405586183

Fax +390405586185

<http://eut.units.it>

eut@units.it

ISBN: 978-88-8303-866-2

APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA LCA ALL'INTERVENTO DI MODIFICA DEGLI IMPIANTI SEMAFORICI NEL COMUNE DI UDINE

PAOLO BOGONI

Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche "Bruno de Finetti", Università degli Studi di Trieste

BARBARA CAMPISI

Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali, Matematiche e Statistiche "Bruno de Finetti", Università degli Studi di Trieste

LUCIA PIANI

*Dipartimento di Scienze AgroAlimentari, Ambientali e Animali
Università degli Studi di Udine*

ABSTRACT¹

In recent years the Municipality of Udine changed the technology of traffic lights in the administered area, no longer equipped with traditional incandescent optics but with Light Emitting Diodes (LED), in order to reduce the greenhouse gas emissions during the operation phase. The paper aims at applying the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, to evaluate whether the transition to the new technology has actually allowed the reduction of environmental impacts, resulting from all life cycle stages for both devices, in different environmental categories. In most cases the obtained results show a better environmental compatibility of LED.

KEYWORDS: LCA, incandescent lamp, LED

¹ **Corresponding author:** Paolo Bogoni, DEAMS, via Valerio 6, 34127 Trieste, Italia; email: paolo.bogoni@deams.units.it; tel: (+39) 040 558 7089.

1. Introduzione

Nell'ambito delle azioni a breve-medio termine previste dal Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES), che il Comune di Udine ha elaborato a seguito dell'adesione volontaria al "Patto dei Sindaci", l'Amministrazione ha previsto un intervento che ha portato alla sostituzione delle lampade tradizionali a incandescenza degli impianti semaforici del territorio comunale con moduli provvisti di tecnologia *Light Emitting Diodes* - LED.

L'individuazione di quest'azione, avente come obiettivo quello di migliorare la qualità ambientale del territorio attraverso l'installazione di sistemi a maggior efficienza, è stata dettata in maniera preponderante dall'analisi dei consumi annui di energia elettrica per il funzionamento di tali impianti, che hanno da sempre rivestito una voce di spesa alquanto significativa per l'Ente. È stato messo in luce, inoltre, come l'utilizzo di energia elettrica da parte di questi sistemi sia stato, negli ultimi anni presi in esame, pressoché costante e come, considerata la completezza, in termini di estensione e di numero di impianti, ormai da tempo raggiuntala dalla rete semaforica, i consumi e i costi associati sarebbero gravati indefinitamente sulle spese dell'Amministrazione (Comune di Udine, 2010). Pertanto, il Servizio Patrimonio e Ambiente del Comune di Udine ha individuato nella modifica della tecnologia di funzionamento degli impianti semaforici una possibile via per abbattere in maniera considerevole i consumi annui di energia elettrica e l'impatto ambientale annuo dovuto alle emissioni di gas serra derivanti dalla fase di funzionamento, ma al tempo stesso anche per ridurre i costi totali annui di gestione, poiché i moduli LED sono sistemi energeticamente molto più efficienti e dotati di un tempo di vita medio di gran lunga superiore rispetto a quello delle lampade tradizionali a incandescenza. Le previsioni hanno quantificato i benefici dell'intervento in una riduzione dei consumi annui di energia elettrica dell'80-90% rispetto a quelli dell'anno di riferimento del PAES (cioè il 2006) una volta completata la sostituzione e in una riduzione delle emissioni annue di diossido di carbonio equivalente (CO₂ eq) di circa 218 t (Comune di Udine, 2010). Entrambe le previsioni si riferiscono unicamente alla fase di funzionamento degli impianti semaforici. A tal proposito, l'Amministrazione ha approvato nell'aprile del 2009 la proposta integrale d'intervento da parte della società AMGA, Energia & servizi Srl, gestore degli impianti.

In merito a ciò, è necessario qui precisare come, con il termine di impianti semaforici, vadano intesi tutti i sistemi per la regolazione del traffico (veicolare e non) e quindi non solo i semafori, ma anche le lanterne pedonali e ciclabili connesse ai semafori e le lanterne lampeggianti a due luci, in quanto fanno parte della stessa rete di alimentazione. Sono invece esclusi altri sistemi quali, ad esempio, quelli relativi all'illuminazione delle sedi stradali e dei percorsi ciclo-pedonali, poiché fanno parte dell'illuminazione pubblica e rientrano in un'altra azione del PAES.

Un'ulteriore precisazione merita anche l'aspetto terminologico: con lampada tradizionale a incandescenza si intende la lampadina che compone una singola luce, per i LED, invece, si utilizza il termine modulo poiché ciascuna luce ottica è composta da un certo numero di LED. Le operazioni di sostituzione hanno riguardato non le lanterne intere, ma solo le lampade ottiche in queste presenti e hanno interessato tutte le tipologie di impianti semaforici sopra indicati. L'intervento ha pertanto riguardato 2.198 lampade tradizionali ad incandescenza, che sono state rimpiazzate da altrettanti moduli dotati di tecnologia LED. Facendo riferimento ai dati del 2013, primo anno durante il quale tutti i

sistemi facenti parte degli impianti semaforici del Comune di Udine hanno funzionato completamente a LED, è stato possibile quantificare con facilità la riduzione annua dei consumi di energia elettrica per la loro alimentazione rispetto al 2006 (anno di riferimento in cui erano presenti solo lampade tradizionali a incandescenza), nonché la riduzione annua in termini di costi per la loro gestione.

Se il risparmio energetico, e dunque economico, è facilmente quantificabile, non risulta altrettanto agevole valutare le conseguenze ambientali di questi interventi messi in essere dall'Amministrazione Comunale. Questo studio, pertanto, si è prefisso lo scopo di valutare la possibile influenza del cambiamento della tecnologia utilizzata negli impianti semaforici sulla riduzione degli impatti ambientali legati a tutti i processi che compongono il ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED, non considerando unicamente la fase di utilizzo e non limitandosi a valutare unicamente l'impatto sul riscaldamento globale dell'atmosfera terrestre.

2. Aspetti metodologici

Il Life Cycle thinking è una filosofia di pensiero che propone di tenere conto di tutti gli aspetti ambientali del ciclo di vita, con l'obiettivo di ridurre l'utilizzo delle risorse e l'impatto ambientale di un prodotto e, al tempo stesso, di migliorare le sue prestazioni socio-economiche lungo il suo ciclo di vita (United Nation Environment Programme and Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 2007).

Tale filosofia trova la sua principale applicazione nel Life Cycle Assessment (LCA), ovvero in quella metodologia che si occupa di valutare gli impatti associati a un prodotto o a una attività attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, di energia e delle emissioni nell'ambiente, e tramite l'individuazione e la valutazione delle opportunità di miglioramento per diminuire gli impatti di queste fasi. L'analisi si applica all'intero ciclo di vita del prodotto ("dalla culla alla tomba"), poiché prende in esame il processo di estrazione delle materie prime, la costruzione, il trasporto e l'utilizzo, fino ad arrivare alla dismissione del prodotto dopo l'uso.

Sulla base di questa definizione proposta dalla Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC, 1991) risulta pertanto evidente come il fulcro di questo metodo di valutazione sia un confronto il più possibile completo tra due prodotti, gruppi di prodotti, sistemi o metodi, con l'obiettivo di rilevare i punti deboli, di migliorare le qualità ambientali e di promuovere prodotti e processi più rispettosi dell'ambiente, individuando le aree prioritarie di intervento per migliorare le prestazioni ambientali (Scipioni et al., 2008).

Tale metodologia è alla base di tutti i sistemi di certificazione ambientale di prodotto come, ad esempio, il marchio Ecolabel Europeo e le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD).

La metodologia LCA prevede che siano condotte delle fasi specifiche al fine di permettere il confronto degli impatti ambientali generati, nell'intero ciclo di vita, da due differenti prodotti che assolvono la stessa funzione. Nel caso dell'intervento che ha portato alla sostituzione della tecnologia su cui si basa il funzionamento degli impianti semaforici del Comune di Udine, le fasi in questione hanno riguardato:

- la definizione dell'obiettivo dello studio
- la definizione del campo di applicazione dello studio
- l'individuazione degli input di materiali e risorse utilizzati per eseguire i processi che compongono il ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED
- la valutazione degli impatti, per ciascuna tipologia di prodotto, nei confronti delle categorie ambientali selezionate
- il confronto degli impatti generati dai due diversi prodotti

I dati primari sono stati forniti dal Dipartimento Gestione Territorio, Ufficio Agenzia Politiche Ambientali del Comune di Udine e da AMGA, Energia & servizi Srl. I dati secondari sono stati ottenuti dalla banca dati EcoInvent 3, inclusa nel software utilizzato, SimaPro 8.1.1 (PRè, 2016).

2.1 Confini del sistema e unità funzionale di riferimento

Il ciclo di vita che è stato considerato per una lampada tradizionale a incandescenza si compone di una serie di processi in sequenza. Le fasi esaminate prevedono la produzione delle materie prime per la fabbricazione della lampada, il loro assemblaggio per la costruzione del prodotto finale (in Ungheria), il trasporto dal sito di produzione fino all'azienda da cui si è rifornita AMGA (a Segrate), il trasporto da Segrate a Udine (sede di AMGA), il trasporto dalla sede di AMGA ai vari punti in cui si trovano gli impianti semaforici per installare ciascuna lampada a incandescenza, l'utilizzo durante il suo tempo di vita (che equivale a 5.000 ore), il trasporto necessario per la disinstallazione della lampada (ovvero dal punto in cui si trovano gli impianti alla sede di AMGA), il trasporto da Udine a Gorizia, dove ha sede l'azienda che si è occupata di gestire le lampade dismesse, e infine il trattamento di fine vita della lampada.

Per quanto riguarda i processi che compongono l'intero ciclo di vita di un modulo LED, invece, è necessario tenere conto di come servano molte più fasi per la sua fabbricazione. Nel caso in esame, infatti, un modulo da 8 W dotato di questa tecnologia si compone di quattro LED, ciascuno con potenza di 2 W. Bisogna inoltre considerare come ogni singolo LED sia costituito da un substrato di supporto, da un diodo di materiale semiconduttore posto al di sopra del substrato e da altre componenti che permettono di ottenere il prodotto finale, incluse la lente di protezione del diodo e le connessioni elettroniche. I quattro singoli LED devono poi essere assemblati assieme in modo da comporre il modulo finale dotato anche di un opportuno sistema per la conversione della qualità della luce emessa. Su queste basi, quindi, i processi che compongono il ciclo di vita di un modulo dotato di quattro LED comprendono la produzione delle materie prime per la fabbricazione del substrato, l'assemblaggio di queste per la sua costruzione (in Ungheria), la produzione delle materie prime per la fabbricazione del diodo, l'assemblaggio di queste per la sua costruzione (in Ungheria), la produzione delle altre materie prime necessarie alla costruzione finale del singolo LED, l'assemblaggio di queste assieme al diodo e al substrato per la sua costruzione finale (in Ungheria), la produzione delle materie prime e componenti per la fabbricazione dei moduli e l'assemblaggio di queste per ottenere il prodotto finale (in Ungheria). Una volta completata la fabbricazione del modulo, le fasi successive prevedono il trasporto dal sito di produzione fino all'azienda da cui si è rifornita AMGA (a Padova), il trasporto da Padova a

Udine (sede di AMGA), il trasporto dalla sede di AMGA ai vari punti in cui si trovano gli impianti semaforici nel Comune di Udine per installare ciascun modulo, l'utilizzo durante il suo tempo di vita (che equivale a 87.000 ore), il trasporto necessario per la disinstallazione del modulo (ovvero dal punto in cui si trovano gli impianti alla sede di AMGA), il trasporto da Udine a Gorizia e infine il trattamento di fine vita del modulo.

Ciascun processo che compone il ciclo di vita di una lampada a incandescenza e di un modulo LED prevede la presenza di input (ovvero le quantità di materiali/risorse che servono ad eseguire i processi), da cui derivano degli output (ovvero le quantità di emissioni nell'ambiente dovute all'utilizzo degli input) che sono responsabili della generazione di impatti ambientali. Le informazioni sugli input considerati provengono in parte dalle informazioni ricavate da uno studio pubblicato dall'United States Department of Energy, US DOE (Dillon & Scholand, 2012) e da quelle fornite dalle società che hanno eseguito i processi. Questi input si riferiscono, in alcuni casi, a una sola lampada tradizionale a incandescenza o a un solo modulo LED, ma in altri casi al loro numero totale. Al momento del calcolo degli impatti ambientali derivanti dalle emissioni prodotte dall'utilizzo dei materiali e delle risorse per l'esecuzione dei processi, quindi, questi dovranno comunque poi essere riferiti a tutti i 2.198 prodotti che sono stati sostituiti o installati.

Nonostante la metodologia LCA sia stata applicata sia a una lampada tradizionale a incandescenza, sia a un modulo LED aventi le caratteristiche di quelle presenti negli impianti semaforici del Comune di Udine, si è reso necessario definire un'unità funzionale di riferimento. Ciò è stato dettato dall'esigenza di rendere possibile il confronto degli impatti ambientali generati dai processi che compongono il ciclo di vita di due prodotti caratterizzati da diversi livelli prestazionali e caratteristiche tecniche. Questo riferimento è stato individuato in un modulo LED del Comune di Udine con potenza di 8 W, avente un tempo di vita di 87.000 ore. Le lampade a incandescenza da 70 e da 100 W del Comune di Udine, invece, presentano un tempo di vita di 5.000 ore e pertanto, al momento del calcolo degli impatti ambientali da esse prodotti, sarà necessario moltiplicare i valori ottenuti per un opportuno fattore correttivo. (rapporto tra il tempo di vita di un modulo LED e quello di una lampada a incandescenza, entrambi espressi in ore) al fine di permettere il confronto. La scelta di normalizzare gli impatti in questo modo deriva da uno studio di LCA pubblicato nel 2009 dall'Osram (Osram, 2009) su diversi sistemi di illuminazione che si possono utilizzare in ambito domestico. Non conoscendo le caratteristiche tecniche specifiche riferite all'efficienza luminosa (in lumen/watt) delle lampade e dei moduli installati negli impianti semaforici del Comune di Udine, infatti, non è stato possibile calcolare il flusso luminoso emesso durante il tempo di vita dei due prodotti (che solitamente si esprime in lumen*ore) e utilizzarlo come unità funzionale di riferimento, come accade nella maggior parte degli studi presenti in letteratura che sono stati condotti su queste tipologie di sistemi di illuminazione, vedi ad esempio Dillon & Scholand (2012).

2.2 Analisi d'inventario

La fase di analisi d'inventario prevede che siano quantificati gli input adoperati per eseguire ciascun processo che costituisce il ciclo di vita del prodotto oggetto dell'indagine, al fine di poter poi quantificare gli impatti ambientali correlati. La metodologia utilizzata per calcolare questi impatti ambientali ha previsto inizialmente di definire e quantificare gli input in ingresso sulla base delle informazioni reperite dalla letteratura o comunicate dalle

società che hanno condotto i processi. Una volta noto l'input, si è passati all'utilizzo di SimaPro al fine di selezionare quello corrispondente nel database Ecoinvent, e a tale input è stata poi associata la quantità di materiale/risorsa adoperata. La scelta di un certo input in Ecoinvent comporta automaticamente di tenere in considerazione specifiche tipologie di materiali/risorse che lo stesso database va a elencare nel campo note. Gli output e gli impatti finali, pertanto, saranno generati dagli input specifici connessi a quelli selezionati nel database. Il software, comunque, non restituisce i valori degli output generati dall'utilizzo di materiali e risorse, poiché associa direttamente gli input dell'inventario alle categorie che l'operatore seleziona per condurre lo studio, al fine di determinare in ciascuna di queste gli impatti ambientali dovuti ai processi del ciclo di vita.

Nel caso del processo di produzione delle materie prime, gli input sono stati riferiti a una lampada per uso domestico da 60 W. Le lampade che sono state sostituite negli impianti semaforici del Comune di Udine presentavano una potenza di 70 o 100 W, ma dal punto di vista costruttivo erano identiche a quelle utilizzate in ambito domestico (a eccezione dell'irrobustimento del filamento, che non è stato considerato). In letteratura si trovano vari studi che sono stati condotti con la metodologia LCA su lampade ad incandescenza, tuttavia solo quello che l'US DOE ha commissionato al Pacific Northwest National Laboratory and N14 Energy Limited (Dillon & Scholand, 2012), al fine di confrontare l'impatto ambientale tra diversi sistemi di illuminazione in ambito domestico, riporta in maniera esaustiva gli input necessari alla produzione delle materie prime per costruire il prodotto finito e le relative quantità. Pertanto, è stato assunto che gli input riportati in tale studio siano validi anche per le lampade da 70 W e 100 W sostituite da AMGA per conto dell'Ente, anche in ragione del fatto che in letteratura non sono disponibili studi condotti specificatamente su impianti semaforici o su loro componenti. Gli input considerati in questa fase del ciclo di vita includono quindi le materie prime che sono state utilizzate per costruire la lampada. Quelli che poi sono stati selezionati in Ecoinvent sono gli stessi utilizzati nello studio pubblicato dall'US DOE (Dillon & Scholand, 2012) e gli impatti ambientali saranno quindi in relazione alla produzione delle materie prime elencate per fabbricare le lampade. I materiali utilizzati si riferiscono ad un'intera lampada e sarà pertanto necessario (come già sopra evidenziato) al momento del calcolo degli impatti moltiplicare i valori ottenuti per il numero totale di quelle che sono state sostituite negli impianti.

Anche nel processo di assemblaggio delle materie prime per la costruzione della lampada le tipologie di input, le relative quantità e quanto selezionato in Ecoinvent derivano dallo studio pubblicato dall'US DOE (Dillon & Scholand, 2012) e pertanto si riferiscono a una lampada domestica da 60 W e, in approssimazione, a quelle da 70 e 100 W. Gli input conteggiati si riferiscono all'utilizzo dell'energia elettrica per assemblare le materie prime e all'utilizzo della manodopera. Nel primo caso, quindi, gli impatti saranno dovuti alla produzione del mix di energia elettrica in Ungheria per l'anno 2007. Si è scelto come riferimento quest'anno poiché, in base alle informazioni fornite da AMGA, gran parte delle lampade sostituite sono state prodotte in Ungheria nel corso di quell'anno. Pertanto, l'input selezionato nel database è stato opportunamente modificato in modo da rispecchiare il mix di produzione di energia elettrica per quell'anno in tale Paese (IEA, 2017^a).

L'altro input per tale processo consiste nell'utilizzo della manodopera, e quindi gli impatti ambientali saranno legati all'esecuzione delle operazioni di assemblaggio delle materie prime. Non essendo presenti nel database altri input associati a questo tipo di operazione, si è ritenuto opportuno di selezionare quello riferito all'assemblaggio di schermi

dotati di tecnologia a cristalli liquidi (*Liquid Crystal Display* - LCD), come suggerito anche nello studio pubblicato dall'US DOE (Dillon & Scholand, 2012). Le risorse utilizzate si riferiscono, in entrambi i casi, alla costruzione di un'intera lampada ed è stato pertanto necessario, al momento del calcolo degli impatti, moltiplicare i valori ottenuti per il numero totale di quelle che sono state sostituite negli impianti.

Il processo seguente nell'ambito del ciclo di vita consiste nel trasporto dall'Ungheria a Segrate, dove ha sede l'azienda SCAE da cui AMGA ha acquistato le lanterne degli impianti semaforici dotate di lampade tradizionali a incandescenza. Per questa fase non è stato possibile acquisire informazioni precise in merito, e dunque è stato ipotizzato che tutti i prodotti siano stati trasportati con un unico viaggio via terra tramite una specifica tipologia di mezzo. L'input, pertanto, è rappresentato dalla distanza (calcolata tramite Google Maps) percorsa considerando il solo viaggio di andata. In questo caso, poiché si è ipotizzato che le lampade siano state trasportate tutte assieme, gli impatti sono già ricondotti al loro numero totale.

Per il processo di trasporto da Segrate a Udine (sede AMGA), invece, l'azienda SCAE ha comunicato come le lampade siano state trasportate tramite un unico viaggio via terra, elencando anche la tipologia del mezzo adoperato. A tal proposito l'input consiste sempre nella distanza percorsa e gli impatti saranno quindi legati all'esecuzione di tale tragitto. Si è ritenuto opportuno selezionare nel database lo stesso input utilizzato nel processo precedente; anche in questo caso è stato considerato solo il viaggio di andata e la distanza è stata calcolata con Google Maps. Gli impatti derivanti sono già riferiti al numero totale di lampade.

Per l'installazione delle lampade non si hanno informazioni in merito, ma si ipotizza che queste siano state posizionate con le stesse modalità di quelle utilizzate per i moduli LED. Per questi ultimi, infatti, AMGA ha comunicato la tipologia di mezzo adoperato per eseguire gli spostamenti dalla sede fino agli impianti, la posizione precisa in cui questi si trovano e il numero di interventi giornalieri necessari (un solo intervento per ogni posizione, eccetto che per due casi specifici in cui gli interventi sono stati eseguiti in due giorni a causa dell'alto numero di impianti semaforici presenti). Pertanto, sempre con Google Maps sono state calcolate dapprima le distanze degli impianti dalla sede di AMGA, e sommandole si è ottenuto il computo totale del percorso eseguito dal mezzo, cioè l'input. Gli impatti saranno quindi legati al tragitto complessivo compiuto. Anche in questo caso è stato considerato solo il viaggio di andata e gli impatti prodotti sono già riferiti al numero totale di lampade.

Il processo successivo consiste nell'utilizzo della lampada durante il suo tempo di vita. L'input consiste quindi nella quantità di energia elettrica utilizzata per l'alimentazione durante quest'arco di tempo, che equivale a 5.000 ore. Pertanto, in base alla potenza della lampada, la richiesta di elettricità sarà differente. Gli impatti connessi saranno quindi legati alla produzione di energia elettrica. I dati relativi al mix di energia elettrica sono stati forniti da AMGA, Energia e Servizi e si riferiscono all'anno di riferimento, 2013, in modo da effettuare una comparazione corretta con i moduli LED, anche se nell'anno considerate non venivano più utilizzate in alcun impianto semaforico. In questo caso il quantitativo di energia elettrica consumata si riferisce a una sola lampada e pertanto, al momento del calcolo degli impatti questi sono stati moltiplicati per il numero totale delle lampade che sono state sostituite.

Per il processo di trasporto al fine della disinstallazione delle lampade valgono le stesse considerazioni già descritte in precedenza per la loro installazione. In questo caso, però, non

si tratta di approssimazioni, giacché il percorso di andata per l'installazione dei moduli è equivalente a quello di ritorno per portare le vecchie lampade dalla posizione degli impianti fino alla sede di AMGA. Ciò è ovviamente legato al fatto che nel momento in cui è stata rimossa una lampada a incandescenza, è stato subito posizionato il nuovo modulo LED.

Una volta conferite al magazzino di AMGA, le lampade sono poi state ritirate dall'azienda Sphaera di Gorizia che si è occupata del loro trattamento finale. In base alle informazioni fornite, le lampade risultano essere state prelevate tramite un unico intervento che è avvenuto via terra con un particolare tipo di mezzo. A tal proposito, l'input consiste nella distanza percorsa che è stata calcolata sempre con Google Maps, e in questo caso è stato considerato solo il viaggio di ritorno. Gli impatti saranno quindi legati all'esecuzione di tale tragitto, e sono già riferiti al numero totale di lampade oggetto dell'intervento.

Il processo finale consiste nel trattamento di fine vita delle lampade disinstallate. L'azienda Sphaera ha comunicato come nessun elemento delle vecchie lampade sia stato smaltito in discarica, poiché tutti i materiali solidi sono stati recuperati. Gli input sono dati dalle quantità di materiali recuperati (che saranno le stesse sia per le lampade da 70 che per quelle da 100 W), ai quali saranno quindi associati gli impatti generati da queste operazioni di recupero. In questo caso gli input si riferiscono a una sola lampada e pertanto, al momento del calcolo degli impatti, i valori ottenuti sono stati moltiplicati per il numero totale dei dispositivi che sono stati disinstallati.

Per l'inventario legato ai processi che compongono il ciclo di vita di un modulo LED bisogna considerare il fatto che sono necessarie più fasi già in sede di costruzione del prodotto, in quanto si presenta tecnologicamente molto più complesso. Ciascun modulo (come già sopra evidenziato) è infatti composto da quattro singoli LED ognuno dei quali è costituito da un substrato di supporto, da un diodo sopra di esso e da altre componenti che permettono di ottenere il prodotto finale. Questi LED devono poi essere connessi tra loro in modo da formare il modulo, avendo cura di installare anche il dispositivo che consente di convertire la luce emessa dai diodi. Per quanto riguarda questi aspetti, in particolare, non sono noti quelli specifici per i moduli che sono stati installati negli impianti semaforici del Comune di Udine. A tal proposito quindi, è stato necessario ricorrere ad alcune approssimazioni riguardanti:

- il tipo di materiale che costituisce il substrato: quello più comunemente utilizzato è solitamente lo zaffiro. Si stima, infatti, che più dell'80% dei LED, all'epoca avesse il substrato costituito da questo materiale (Compound Semiconductor, 2011)
- il tipo di materiale che costituisce il diodo e il sistema utilizzato dal modulo per convertire la luce emessa. Si ritiene che all'epoca la maggior parte dei LED in commercio fosse costituita da diodi a base di nitruro di gallio e nitruro di indio e gallio utilizzati in combinazione con un emettitore al fosforo drogato con cerio, ittrio e alluminio (Laser Focus World, 2011)

Queste approssimazioni sono identiche a quelle presenti nello studio pubblicato nel 2012 dall'US DOE (Dillon & Scholand, 2012), nonostante facciano riferimento a lampade LED utilizzate in ambito domestico. I singoli LED presenti in quest'ultime, infatti, sono tecnologicamente molto simili a quelli di cui sono dotati i moduli installati da AMGA, poiché entrambi sono della stessa marca e sono di modelli con caratteristiche tecniche quasi

identiche. Pertanto, i LED da 2 W del Comune di Udine sono stati considerati analoghi a quelli presenti nelle lampade domestiche su cui il Pacific Northwest National Laboratory and N14 Energy Limited ha condotto i propri studi per conto dell'US DOE. Ne consegue che gli input di materiali per la loro fabbricazione sono gli stessi. Per quanto riguarda i processi di produzione delle materie prime per costruire il substrato, il diodo e le altre parti necessarie alla fabbricazione finale di un LED, gli input saranno quindi rappresentati dai materiali utilizzati, e quindi gli impatti saranno legati alla loro produzione. Date le premesse già discusse in precedenza, le quantità di tali materiali sono le stesse utilizzate nello studio pubblicato dall'US DOE, così come anche gli input che sono stati selezionati in Ecoinvent. La somma dei contributi derivanti da tutti questi tre processi di produzione andrà a restituire quelli associati complessivamente alla fabbricazione di un LED.

A ciascuno dei tre processi di produzione delle materie prime sopra indicati ne è associato uno di assemblaggio. In questo caso gli input sono rappresentati dall'energia elettrica adoperata per connettere le materie prime al fine di produrre il substrato, il diodo e quella necessaria ad unire tra loro queste due componenti assieme alle altre materie prime per la fabbricazione finale del LED. I quantitativi utilizzati sono gli stessi di quelli che compaiono nello studio pubblicato dall'US DOE. Gli impatti saranno quindi associati alla produzione dell'energia elettrica nel Paese in cui sono state assemblate le varie parti, ovvero l'Ungheria. Gli input selezionati in Ecoinvent sono stati opportunamente modificati in modo da rappresentare il mix di produzione di energia elettrica ungherese per l'anno 2010 (IEA, 2017^b) poiché, in base alle informazioni fornite da AMGA, la maggior parte dei moduli sono stati fabbricati in quell'anno. La somma dei contributi derivanti da tutti questi tre processi di assemblaggio andrà a restituire quelli associati complessivamente alla fabbricazione finale di un LED.

I processi del ciclo di vita sopra indicati permettono la costruzione di un singolo LED. A questo punto, al fine di consentire la realizzazione di un modulo da 8 W, è necessario che quattro LED siano assemblati assieme ad altre materie prime. Il processo prevede come input i materiali necessari a fabbricare il modulo, LED compresi. I riferimenti rimangono sempre le quantità e le tipologie che compaiono nello studio pubblicato dall'US DOE ma, tenendo conto delle differenze costruttive tra un modulo semaforico e una lampada domestica a LED, non sono state selezionate le materie prime che costituiscono le strutture aggiuntive della lampada domestica. Gli impatti saranno quindi legati alla produzione dei materiali e dei componenti necessari alla fabbricazione di un modulo con quattro LED e quindi i valori, al momento del calcolo degli impatti finali, dovranno essere opportunamente moltiplicati per il numero totale di quelli che sono stati installati negli impianti semaforici comunali.

Il processo successivo consiste nell'assemblaggio delle parti indicate al punto precedente, al fine di permettere la costruzione del modulo. Gli input sono quindi rappresentati dall'energia elettrica e dalla manodopera utilizzate e valgono le stesse considerazioni già espresse per l'assemblaggio delle materie prime di una lampada tradizionale a incandescenza, con l'unica differenza rappresentata dalle quantità di input adoperate e dalla composizione del mix di produzione di energia elettrica ungherese, che in questo caso si riferisce all'anno 2010 anziché al 2007. Gli impatti saranno pertanto legati alla produzione dell'energia elettrica e all'esecuzione delle operazioni manuali per l'assemblaggio delle materie prime e, anche in questo caso, si riferiscono ad un solo modulo.

Al momento del calcolo degli impatti totali i valori ottenuti sono stati dunque moltiplicati per il numero totale dei dispositivi installati.

Per quanto riguarda il processo di trasporto dal sito di produzione in Ungheria fino a Padova, dove ha sede l'azienda da cui AMGA ha acquistato i moduli, valgono le stesse considerazioni già espresse nel caso della stessa fase relativa alle lampade tradizionali a incandescenza, con l'unica differenza rappresentata dalla lunghezza del tragitto percorso. A tal proposito si è quindi ipotizzato che i moduli siano stati trasportati con un unico viaggio via terra.

La fase successiva consiste nel trasporto dei moduli da Padova alla sede di AMGA, a Udine. L'azienda fornitrice ha comunicato come i prodotti siano stati trasportati via terra tramite un unico viaggio e anche il tipo di mezzo adoperato, pertanto gli input sono rappresentati dalla distanza percorsa cui saranno poi legati gli impatti ambientali che si riferiscono già al numero totale dei moduli.

Per la fase di installazione dei moduli LED valgono le considerazioni già espresse per la stessa fase relativa alle lampade tradizionali a incandescenza. In questo caso, però, non si tratta di approssimazioni, ma di reali informazioni fornite da AMGA.

Il processo seguente consiste nell'utilizzo del modulo durante il suo tempo di vita. L'input consiste nella quantità di energia elettrica utilizzata per l'alimentazione durante quest'arco di tempo, equivalente a 87.000 ore. Gli impatti saranno quindi legati alla produzione di energia elettrica. L'input scelto nel database è stato però modificato in modo da rappresentare al meglio la composizione del mix di energia elettrica fornita da AMGA Energia e Servizi per l'anno 2013, tenendo conto anche delle importazioni dall'estero. La quantità di energia elettrica consumata si riferisce a un solo modulo e pertanto, al momento del calcolo degli impatti, i valori ottenuti sono stati, analogamente a quanto avvenuto per altre fasi, moltiplicati per il numero totale di quelli che sono stati installati.

Per la successiva fase di disinstallazione dei moduli si è ipotizzato che questa potrebbe essere condotta con le stesse modalità del processo di installazione, nel caso in cui in un futuro il Comune decidesse di cambiare nuovamente la tecnologia per il funzionamento degli impianti semaforici, magari avvalendosi di moduli LED energeticamente più efficienti. Si è ipotizzato inoltre che il trattamento di fine vita dei moduli sia realizzato, come nel caso delle lampade tradizionali a incandescenza, dall'azienda Sphaera e che quindi i moduli disinstallati siano trasportati tramite un unico viaggio via terra dalla sede di AMGA a Gorizia. Per quanto riguarda le modalità di esecuzione delle operazioni per il trattamento di fine vita dei moduli LED, la stessa azienda goriziana non ha saputo dare informazioni su come intenderà recuperare i materiali. Sulla base delle indicazioni fornite dallo studio pubblicato dall'US DOE, è stato considerato un recupero di materiali solidi non ferrosi in ragione del 20%, con il restante 80% smaltito in discarica. Gli input consistono nelle quantità di materiali recuperati/smaltiti e gli impatti si riferiranno perciò all'esecuzione di tali operazioni. Anche in questo caso gli input si riferiscono a un solo modulo e pertanto i valori ottenuti sono stati poi moltiplicati per il numero totale dei dispositivi installati per poter calcolare correttamente i relativi impatti ambientali.

2.3 Valutazione degli impatti

In questa fase prevista dalla metodologia LCA è necessario definire le categorie d'impatto cui dovranno essere associati gli input individuati nella fase di inventario, in modo

da poter quantificare gli effetti ambientali generati dai processi che compgono il ciclo di vita di ciascun prodotto.

Gli input legati ai processi del ciclo di vita delle lampade e dei moduli LED sono stati quindi messi in relazione, grazie all'utilizzo del software SimaPro, a quattordici categorie d'impatto, ognuna delle quali identifica un diverso tipo di effetto a carico dell'ambiente. Per ciascuna categoria è stato selezionato nel database Ecoivent uno specifico indicatore, provvisto di un'opportuna unità di misura, il cui valore restituito dal software è in grado di quantificare l'impatto globale dovuto all'utilizzo degli input nella categoria cui questo si riferisce, cioè l'entità dell'alterazione nei confronti dell'ambiente. L'impatto quantificato dall'indicatore va quindi a rilevare il possibile effetto identificato dalla categoria cui questo si riconduce. Le categorie d'impatto selezionate sono le stesse utilizzate anche nello studio pubblicato dall'US DOE (Dillon & Scholand, 2012) e permettono un'ampia valutazione degli impatti su diverse matrici ambientali quali l'aria e il clima, l'acqua, il suolo e le risorse naturali. I valori degli indicatori restituiti dal software sono stati moltiplicati, per quei processi del ciclo di vita che si riferiscono a un solo prodotto (analogamente a quanto già indicato nella fase di inventario), in modo da ricondurli a tutte le 2.198 lampade a incandescenza che sono state sostituite, o ai 2.198 moduli LED che sono stati installati. Un'ulteriore moltiplicazione dei valori degli indicatori si è resa necessaria anche al fine di poter confrontare tra loro gli impatti di due prodotti che presentano un diverso tempo di vita, ovvero 5.000 ore per le lampade tradizionali a incandescenza e 87.000 ore per i moduli LED. Pertanto, al fine di ricondurre i valori alla stessa unità di riferimento, gli impatti prodotti in ciascuna categoria dai processi del ciclo di vita delle lampade a incandescenza sono stati moltiplicati per 17,4 (il rapporto tra 87.000 e 5.000).

2.4 Confronto degli impatti

A questo punto dell'analisi LCA si dispone, per ciascun processo che compone il ciclo di vita di tutte le lampade tradizionali a incandescenza e di tutti i moduli LED, dei valori degli impatti generati in ognuna delle quattordici categorie.

Dato il gran numero di processi che compone ciascun ciclo di vita, si è preferito individuare un totale di cinque macroprocessi, includendo in ciascuno di questi le fasi riconducibili allo stesso tipo di operazione, come riportato in Figura 1. Il numero e le tipologie dei singoli processi del ciclo di vita inclusi in ogni macroprocesso sono però ovviamente diversi nel caso delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED. Analogamente ai processi, la stessa metodologia di suddivisione ha riguardato, per ogni categoria d'impatto, anche gli input e l'origine degli impatti ambientali.

3. Risultati e discussione

3.1 Analisi degli impatti nelle diverse categorie ambientali

Nelle Tabelle che seguono sono riportati, per ciascuna categoria di impatto ambientale, i valori degli indicatori ottenuti attraverso l'applicazione della metodologia di lavoro LCA precedentemente descritta, distintamente per ciascun macroprocesso del ciclo di vita delle

lampade tradizionali a incandescenza (vedi Tabella 1a,b) e dei moduli LED (vedi Tabella 2a,b). Come si può notare dai dati della Tabella 1, l’impatto totale derivante dal ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza è legato principalmente, in tutte le categorie ambientali esaminate, alla fase di utilizzo delle lampade. Al secondo posto, invece, in alcuni casi troviamo l’impatto dovuto alla produzione delle materie prime, in altri quello legato alla costruzione delle lampade. Gli impatti dovuti al trasporto e al trattamento di fine vita delle ottiche tradizionali sono invece minori e, in alcuni casi, trascurabili rispetto ai precedenti. Dalla Tabella 2 appare invece evidente come l’impatto totale derivante dal ciclo di vita dei moduli LED sia principalmente legato, in alcune categorie ambientali, all’utilizzo dei moduli e in altre sia dovuto prevalentemente alla produzione delle materie prime o alla costruzione dei dispositivi. Gli impatti legati al trasporto dei moduli e al loro trattamento di fine vita sono invece (analogamente a quanto visto sopra per le lampade tradizionali a incandescenza) minori e, in alcuni casi, trascurabili rispetto ai precedenti.

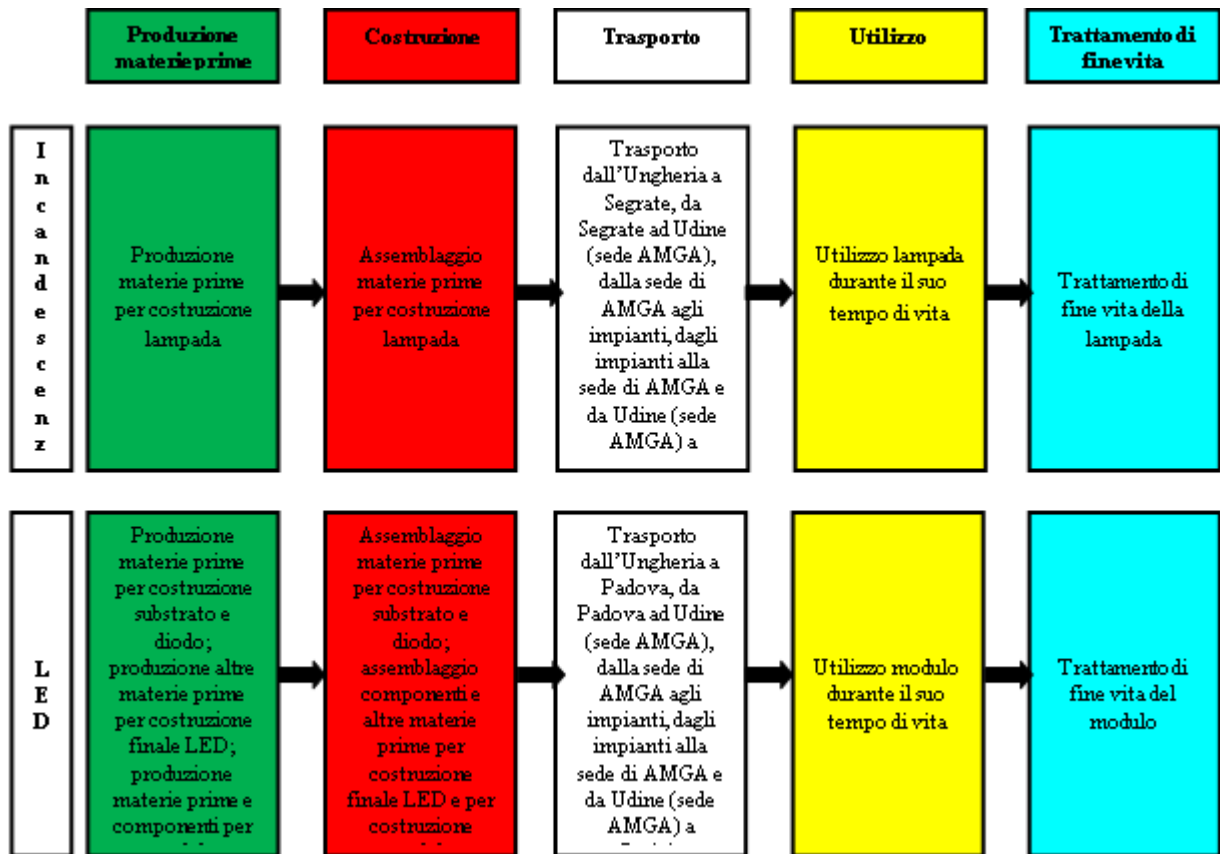


FIG. 1. Suddivisione, nelle cinque tipologie di macroprocessi, dei singoli processi del ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED.

TABELLA 1a. Impatti ambientali di ogni macroprocesso del ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza.

Macroprocesso	Aria/clima					Acqua		
	GWP (kg CO ₂ eq)	AP (kg SO ₂ eq)	POCP (kg O ₃ formato)	ODP (kg CFC11 eq)	HTP (kg 1,4-DCB eq)	FAETP (kg 1,4-DCB eq)	MAETP (kg 1,4-DCB eq)	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq)
Produzione materie prime	1,46*10 ⁴	2,83*10 ³	1,05	1,50*10 ⁻³	9,51*10 ³	4,84*10 ⁴	1,67*10 ⁵	1,23*10 ²
Costruzione	3,42*10 ⁴	1,90*10 ²	1,71	1,10*10 ⁻³	1,27*10 ⁴	4,62*10 ³	2,17*10 ⁴	6,19*10 ¹
Trasporto	2,11*10 ⁴	9,92*10 ¹	3,10	2,70*10 ⁻³	1,27*10 ³	2,13*10 ²	2,20*10 ³	2,17*10 ¹
Utilizzo	7,57*10 ⁶	2,43*10 ⁴	4,68*10 ²	1,22	6,92*10 ⁵	7,43*10 ⁴	5,44*10 ⁵	1,94*10 ³
Trattamento di fine vita	1,69*10 ¹	8,32*10 ⁻²	8,00*10 ⁻⁴	0,00	3,76	1,93*10 ²	5,62*10 ²	5,50*10 ⁻³
TOTALE	7,64*10 ⁶	2,74*10 ⁴	4,74*10 ²	1,23	7,16*10 ⁵	1,28*10 ⁵	7,35*10 ⁵	2,15*10 ³

GWP: *global warming potential*, AP: *acidification potential*, POCP: *photochemical ozone creation potential*, ODP: *ozone depleting potential*, HTP: *human toxicity potential*, FAETP: *freshwater aquatic ecotoxicity potential*, MAETP: *marine aquatic ecotoxicity potential*, EP: *eutrophication potential*

TABELLA 1b. Impatti ambientali di ogni macroprocesso del ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza.

Macroprocesso	Suolo		Risorse naturali			
	LU (m ² *anno)	TAETP (kg 1,4-DCB eq)	ARD (kg Sb eq)	NHWL (kg rifiuti)	HWL (kg rifiuti)	RWL (kg rifiuti)
Produzione materie prime	7,83*10 ²	4,38	1,18*10 ²	5,25*10 ³	1,89	9,85*10 ⁻¹
Costruzione	1,74*10 ³	8,49	1,09*10 ²	5,68*10 ³	5,78*10 ⁻¹	6,37*10 ⁻¹
Trasporto	4,34*10 ¹	4,64	1,33*10 ²	8,85*10 ¹	7,72*10 ⁻²	5,77*10 ⁻²
Utilizzo	6,53*10 ⁴	5,66*10 ²	6,03*10 ⁴	1,89*10 ⁵	3,08*10 ²	1,24*10 ¹
Trattamento di fine vita	5,04*10 ⁻¹	3,60*10 ⁻³	1,05*10 ⁻¹	1,52	4,00*10 ⁻⁴	1,90*10 ⁻³
TOTALE	6,79*10 ⁴	5,80*10 ²	6,07*10 ⁴	2,00*10 ⁵	3,11*10 ²	1,40*10 ¹

LU: *land use*, TAETP: *terrestrial ecotoxicity potential*, ARD: *abiotic resource depletion potential*, NHWL: *non-hazardous waste landfilled*, HWL: *hazardous waste landfilled*, RWL: *radioactive waste landfilled*

TABELLA 2a. Impatti ambientali di ogni macroprocesso del ciclo di vita dei moduli LED.

Macroprocesso	Aria/clima					Acqua		
	GWP (kg CO ₂ eq)	AP (kg SO ₂ eq)	POCP (kg O ₃ formato)	ODP (kg CFC11 eq)	HTP (kg 1,4-DCB eq)	FAETP (kg 1,4-DCB eq)	MAETP (kg 1,4-DCB eq)	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq)
Produzione materie prime	2,54*10 ⁴	1,57*10 ²	2,13	3,70*10 ⁻³	4,53*10 ⁴	7,89*10 ⁴	2,85*10 ⁵	3,19*10 ²
Costruzione	2,41*10 ⁵	3,64*10 ³	1,92*10 ¹	2,60*10 ⁻²	1,31*10 ⁵	1,32*10 ⁴	3,29*10 ⁵	1,15*10 ²
Trasporto	8,72*10 ²	4,06	1,42*10 ⁻¹	1,00*10 ⁻⁴	5,29*10 ¹	8,82	9,17*10 ¹	8,85*10 ⁻¹
Utilizzo	7,22*10 ⁵	2,51*10 ³	4,28*10 ¹	1,08*10 ⁻¹	7,23*10 ⁴	9,64*10 ³	6,04*10 ⁴	2,01*10 ²
Trattamento di fine vita	1,48*10 ⁻¹	1,10*10 ⁻³	0,00	0,00	1,58*10 ⁻²	7,50*10 ⁻³	3,14*10 ⁻²	2,00*10 ⁻⁴
TOTALE	9,88*10 ⁵	6,34*10 ³	6,43*10 ¹	1,38*10 ⁻¹	2,49*10 ⁵	1,02*10 ⁵	6,74*10 ⁵	6,37*10 ²

GWP: *global warming potential*, AP: *acidification potential*, POCP: *photochemical ozone creation potential*, ODP: *ozone depleting potential*, HTP: *human toxicity potential*, FAETP: *freshwater aquatic ecotoxicity potential*, MAETP: *marine aquatic ecotoxicity potential*, EP: *eutrophication potential*

TABELLA 2b. Impatti ambientali di ogni macroprocesso del ciclo di vita dei moduli LED.

Macroprocesso	Suolo		Risorse naturali			
	LU (m ² *anno)	TAETP (kg 1,4-DCB eq)	ARD (kg Sb eq)	NHWL (kg rifiuti)	HWL (kg rifiuti)	RWL (kg rifiuti)
Produzione materie prime	1,23*10 ³	2,79*10 ¹	1,81*10 ²	3,59*10 ⁴	2,03*10 ¹	1,43
Costruzione	1,11*10 ³	3,68*10 ²	1,52*10 ³	3,53*10 ³	4,09	4,04*10 ¹
Trasporto	1,80	7,08*10 ⁻²	5,50	3,67	3,20*10 ⁻³	2,30*10 ⁻³
Utilizzo	6,57*10 ³	5,58*10 ¹	5,73*10 ³	1,98*10 ⁴	3,59*10 ¹	5,85
Trattamento di fine vita	0,00	0,00	1,00*10 ⁻³	0,00	0,00	0,00
TOTALE	8,90*10 ³	4,51*10 ²	7,43*10 ³	5,93*10 ⁴	6,03*10 ¹	4,76*10 ¹

LU: *land use*, TAETP: *terrestrial ecotoxicity potential*, ARD: *abiotic resource depletion potential*, NHWL: *non-hazardous waste landfilled*, HWL: *hazardous waste landfilled*, RWL: *radioactive waste landfilled*

Quanto riportato nelle Tabelle 1a,b e 2a,b è meglio riscontrabile, distintamente per ciascuna tecnologia, nei grafici di Figura 2 e 3, in cui gli impatti generati da ciascun macroprocesso sono stati espressi, per ogni categoria ambientale, sotto forma d'incidenza percentuale sul totale. Per le lampade tradizionali a incandescenza, infatti, l'utilizzo incide sugli impatti totali con un massimo del 99,6% per la categoria GWP, fino a un minimo del 58,2% per la categoria FAETP. La produzione delle materie prime manifesta un'incidenza massima del 37,9% nella categoria FAETP, mentre la costruzione delle lampade si spinge fino a un massimo del 4,54% della categoria RWL. Per gli altri due macroprocessi, invece, ovvero il trasporto delle lampade e il trattamento di fine vita, l'incidenza percentuale sugli impatti totali, in tutte le categorie ambientali, è sempre trascurabile. Questi risultati non confermano pienamente quanto emerso dallo studio pubblicato dall'US DOE (Dillon & Scholand, 2012), in cui l'incidenza degli impatti dovuti alla produzione delle materie prime prevale sempre, per tutte le categorie d'impatto, sul contributo di quelli prodotti dalla costruzione delle lampade. Ciò è legato al fatto che gli input considerati nella fase d'inventario del presente lavoro non sono sempre gli stessi dello studio sopra indicato, e qui utilizzato come riferimento, né per tipologia, né per quantità. Ne sono esempi la quantità di energia elettrica utilizzata dalle lampade durante il loro tempo di vita, ma anche la composizione del mix dell'energia elettrica fornita per il loro funzionamento. Un'altra differenza riguarda la composizione del mix di energia elettrica per la costruzione delle lampade.

Nel caso dei moduli LED, invece, l'incidenza percentuale derivante dal loro utilizzo varia tra il 78,4% della categoria ODP e l'8,95% della categoria MAETP. La costruzione dei moduli si manifesta con un'incidenza compresa tra l'81,4% della categoria TAETP e il 5,96% della categoria NHWL, mentre quella relativa alla produzione delle materie prime per la costruzione dei dispositivi varia tra il 77,6% della categoria FAETP e il 2,48% della categoria AP. Gli altri due macroprocessi incidono, in tutte le categorie ambientali, con un contributo sempre trascurabile. Analogamente alla situazione rilevata per le lampade a incandescenza, i risultati non confermano pienamente, per gli stessi motivi sopra elencati, quanto pubblicato dall'US DOE (Dillon & Scholand, 2012), in cui l'incidenza degli impatti dovuti alla fase di utilizzo è sempre maggiore rispetto al contributo generato da quelli legati alla produzione delle materie prime, che a sua volta prevale sempre, per tutte le categorie ambientali, sull'incidenza degli impatti dovuti alla costruzione. Ne sono esempi il consumo di energia elettrica dei moduli LED del Comune di Udine, ma anche la composizione del mix di energia elettrica fornita per il loro funzionamento. Inoltre, i moduli LED degli impianti semaforici sono diversi dal punto di vista costruttivo rispetto alle lampade LED utilizzate in ambito domestico e pertanto non sono stati considerati tutti gli input di materiali nel processo di produzione delle materie prime, così come la composizione del mix di energia elettrica per l'assemblaggio delle componenti si riferisce alla produzione in un Paese diverso.

3.2 Confronto dell'incidenza relativa degli impatti nelle diverse categorie ambientali

Confrontando tra loro i grafici delle Figure 2 e 3, è evidente come negli istogrammi riportati in quest'ultima vi sia una minore incidenza percentuale sugli impatti ambientali

totali, dovuta alla fase di utilizzo, a favore di quella connessa alla produzione delle materie prime e alla costruzione.

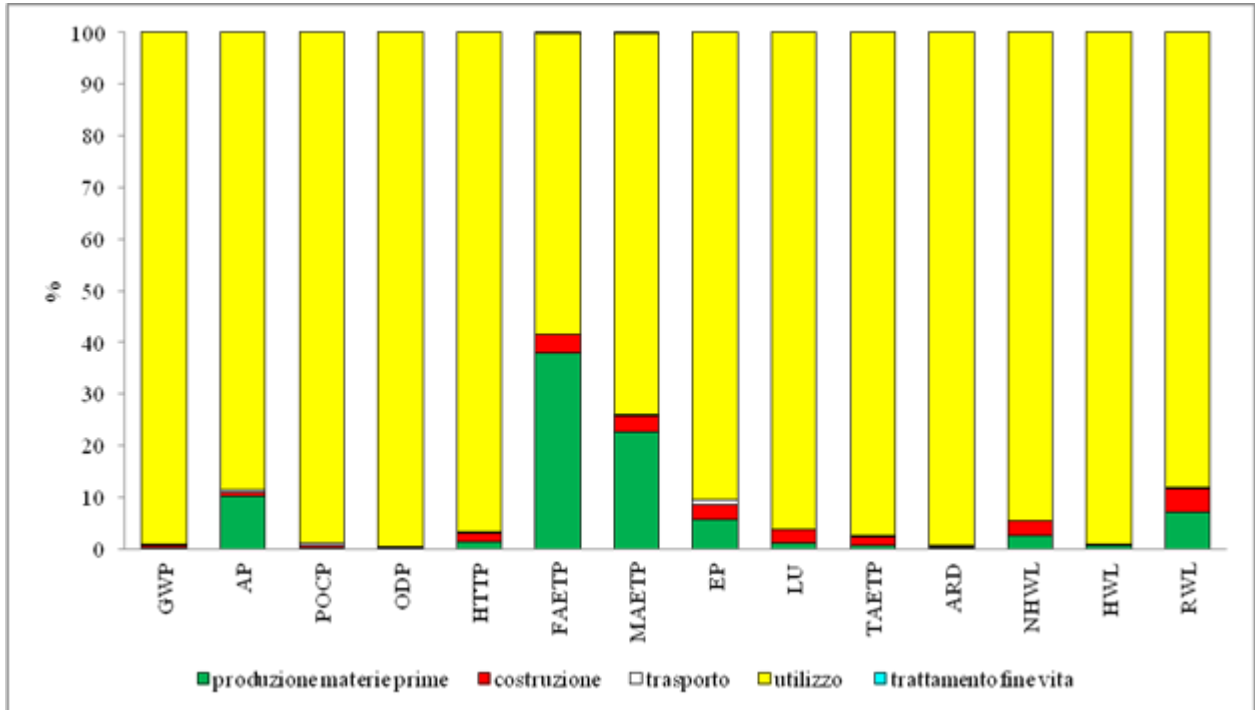


FIG. 2. Lampade tradizionali a incandescenza: incidenza percentuale sugli impatti totali dei singoli macroprocessi.

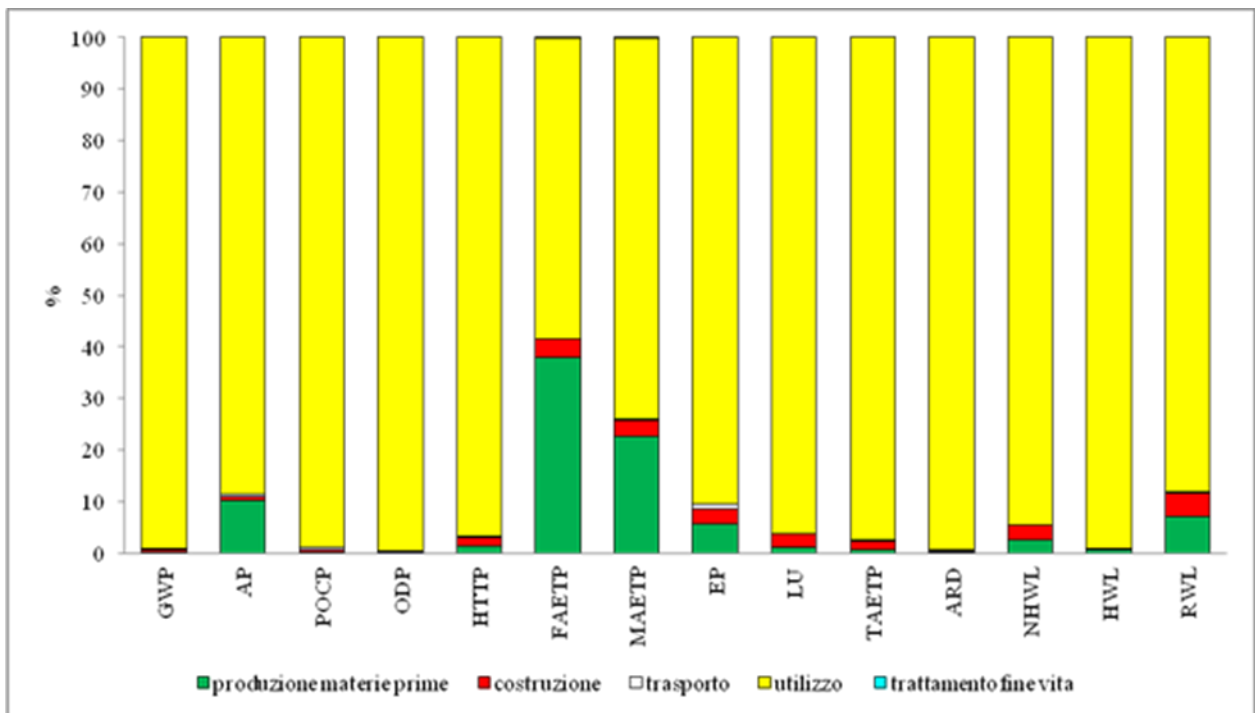


FIG. 3. Moduli LED: incidenza percentuale sugli impatti totali dei singoli macroprocessi.

Ciò si manifesta in tutte le categorie ambientali. Lo stesso andamento, anche se in maniera meno evidente per effetto delle diverse tipologie e quantità di input considerati nella fase di inventario per i due prodotti, è stato riscontrato nello studio presente in letteratura e qui utilizzato come riferimento (Dillon & Scholand, 2012). I risultati riguardanti la variazione dell'incidenza percentuale degli impatti, in una stessa categoria ambientale, non possono però essere tradotti anche in termini di variazione assoluta, fatto legato alla diversa entità con cui sono variati quantitativamente gli impatti legati a ciascun macroprocesso e quindi anche quelli totali. Ciò significa, ad esempio, che se passando dalle lampade a incandescenza ai moduli LED è aumentata l'incidenza percentuale di un macroprocesso, non è sempre vero che l'impatto assoluto corrispondente sia aumentato.

3.3 Confronto tra gli impatti totali nelle diverse categorie ambientali

Le Tabelle 1 e 2 evidenziano, inoltre, come in ciascuna categoria d'impatto ambientale si sia verificata una variazione degli impatti totali, a seguito del cambiamento della tecnologia per il funzionamento degli impianti semaforici, in funzione di come si sono modificati quelli derivanti da ciascun macroprocesso del ciclo di vita di ogni dispositivo. A tal proposito, gli istogrammi riportati nei grafici delle figure 4a,b,c, consentono di comprendere meglio se in ciascuna categoria prevale l'alterazione a carico dell'ambiente prodotta dalle lampade ad incandescenza, o quella derivante dai moduli LED. Per facilitare questa interpretazione si è scelto di riportare in tre modi diversi il valore massimo sull'asse delle ordinate, poiché i valori degli indicatori sono numericamente differenti, in termini di ordine di grandezza, tra una categoria di impatto ambientale e l'altra.

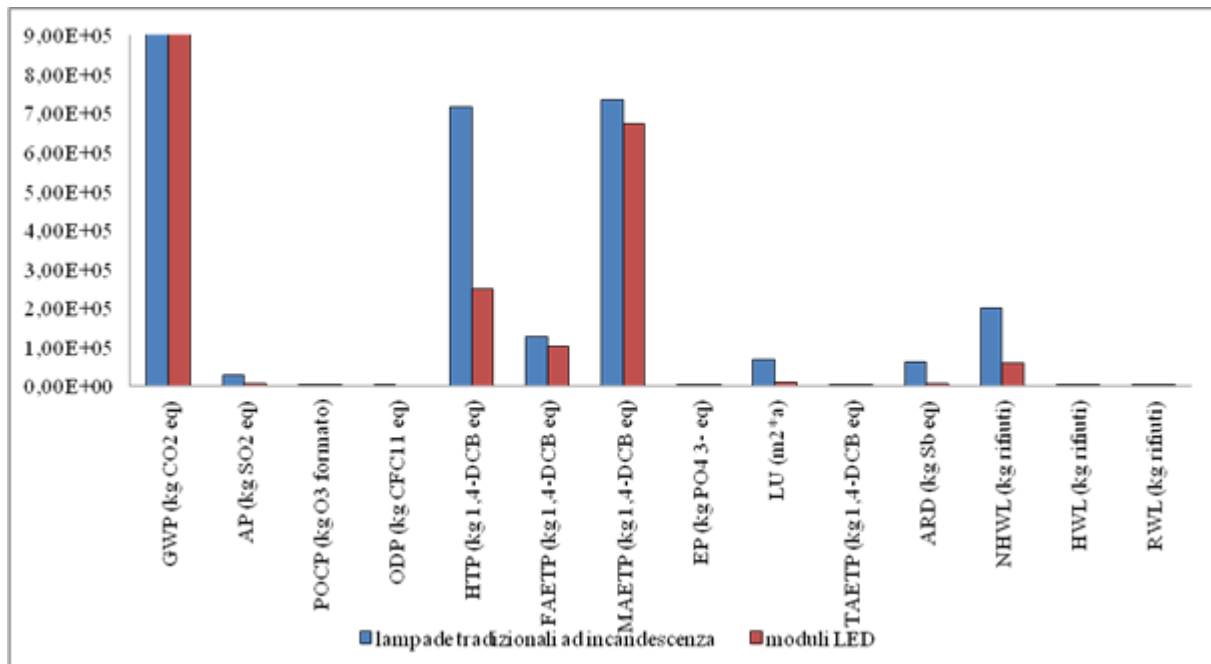


FIG. 4a. Impatti totali, per ciascuna categoria di impatto ambientale, legati al ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED

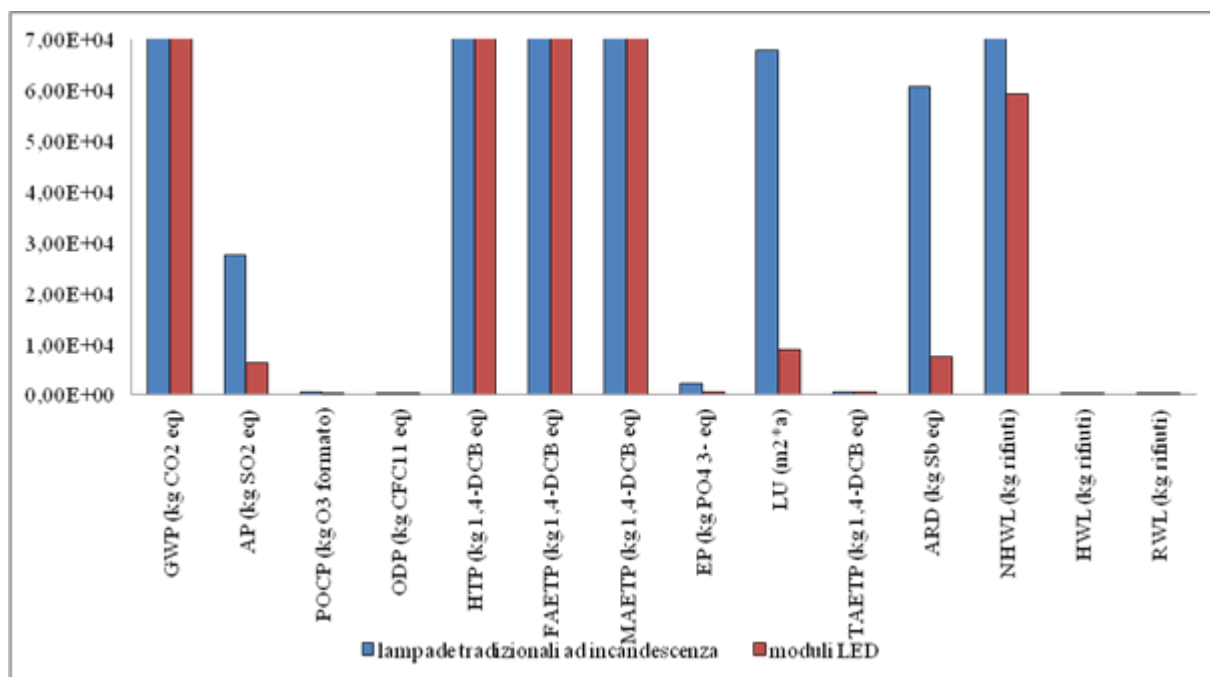


FIG. 4b. Impatti totali, per ciascuna categoria di impatto ambientale, legati al ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED.

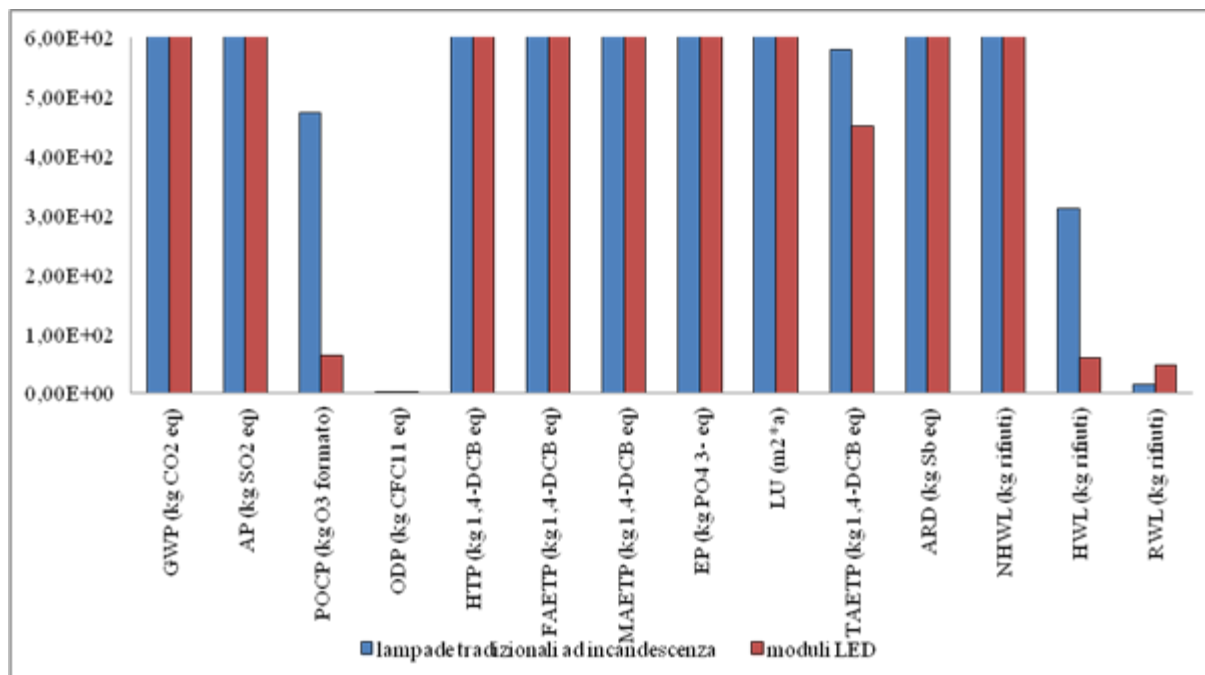


FIG. 4c. Impatti totali, per ciascuna categoria di impatto ambientale, legati al ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED.

I grafici sopra riportati mostrano come, eccetto che nella categoria RWL, gli impatti totali legati ai processi che compongono il ciclo di vita delle lampade tradizionali ad incandescenza siano sempre maggiori rispetto agli stessi riferiti ai moduli LED. L'andamento rilevato nella categoria GWL deriva:

- dalla riduzione degli impatti generati dal trasporto, poiché è necessario percorrere minori distanze, dato che sarà inferiore il numero di dispositivi utili a coprire l'unità di riferimento
- dalla minor quantità di quelli provenienti dall'utilizzo dei dispositivi. Serve infatti produrre molta meno energia elettrica per alimentare i moduli nell'ambito dell'unità di riferimento, per effetto della loro maggiore efficienza energetica
- dalla riduzione degli impatti associati al trattamento di fine vita, in quanto il numero di moduli destinati a tale processo sarà decisamente minore rispetto al numero di lampade. I LED hanno un tempo di vita atteso più elevato, e di conseguenza sarà inferiore il numero delle operazioni necessarie a recuperare, o a smaltire, le parti dei dispositivi giunti a fine vita
- dall'aumento dell'alterazione imputabile alla produzione delle materie prime, poiché bisogna produrre un numero maggiore di materiali per costruire i moduli LED, rispetto alle lampade ad incandescenza
- dall'incremento degli impatti associati alla costruzione dei dispositivi. I moduli LED sono tecnologicamente molto più complessi e quindi richiedono molte più fasi di assemblaggio, con un conseguente consumo maggiore di energia elettrica e di utilizzo della manodopera

Analogamente, anche nelle categorie POCP, ODP, HTP, FAETP, MAETP, EP, TAETP, ARD, HWL e RWL è stato riscontrato, per le stesse motivazioni sopra riportate, il medesimo verso di variazione degli impatti prodotti da ciascuno dei cinque macroprocessi. Nella categoria AP, invece, l'unica differenza, rispetto alla modalità di variazione degli impatti sopra descritta, riguarda la diminuzione, anziché l'aumento, degli effetti ambientali generati durante la produzione delle materie prime. Nelle categorie LU e NHWL, tali differenze sono emerse considerando la costruzione dei dispositivi, dove appunto è stata riscontrata una diminuzione degli impatti.

Le Tabelle 3 e 4 riportano invece le entità delle variazioni degli impatti totali a seguito del passaggio da una tecnologia di funzionamento all'altra. Il segno meno è indice di una diminuzione degli effetti a carico dell'ambiente, mentre il segno più è indice di un aumento. I risultati espressi in termini di variazione assoluta mostrano le alterazioni quantitative più rilevanti nelle categorie GWP, HTP e NHWL e quelle meno consistenti nelle categorie ODP e RWL. In termini di variazione relativa percentuale, invece, l'alterazione più consistente degli impatti totali si è manifestata nella categoria RWL, mentre quelle meno considerevoli hanno interessato le categorie FAETP, MAETP e TAETP.

TABELLA 3a. Variazione degli impatti totali nelle diverse categorie ambientali.

Tipo di variazione	Aria/clima					Acqua		
	GWP	AP	POCP	ODP	HTP	FAETP	MAETP	EP
Variazione assoluta	-6,65*10 ⁶ kg CO ₂ eq	-2,11*10 ⁴ kg SO ₂ eq	-4,10*10 ² kg O ₃ formato	-1,09 kg CFC11 eq	-4,67*10 ⁵ kg 1,4-DCB eq	-2,60*10 ⁴ kg 1,4-DCB eq	-6,10*10 ⁴ kg 1,4-DCB eq	-1,51*10 ³ kg PO ₄ ³⁻ eq
Variazione relativa	-87,0%	-77,0%	-86,5%	-88,6%	-65,2%	-20,3%	-8,30%	-70,2%

TABELLA 3b. Variazione degli impatti totali nelle diverse categorie ambientali.

Tipo di variazione	Suolo		Risorse naturali			
	LU	TAETP	ARD	NHWL	HWL	RWL
Variazione assoluta	-5,90*10 ⁴ m ² *anno	-1,29*10 ² kg 1,4-DCB eq	-5,33*10 ⁴ kg Sb eq	-1,41*10 ⁵ kg rifiuti	-2,51*10 ² kg rifiuti	+3,33*10 ¹ kg rifiuti
Variazione relativa	-86,9%	-22,2%	-87,8%	-70,5%	-80,7%	+240%

Infine, gli istogrammi riportati nei grafici delle Figure 4a,b,c consentono anche di identificare in linea generale (nonostante non sia propriamente corretto confrontare tra loro i valori di indicatori che identificano impatti generati dall'alterazione delle quantità di diverse tipologie di molecole o prodotti) quali siano le categorie in cui si verificano gli effetti più e meno consistenti a carico dell'ambiente.

Le alterazioni più rilevanti sono state riscontrate, per le lampade a incandescenza, nelle categorie GWP, HTP, FAETP, MAETP e NHWL. Nel caso dei moduli LED, invece, tale andamento si è manifestato nelle categorie GWP, HTP, FAETP e MAETP. Gli effetti meno rilevanti a carico dell'ambiente sono stati riscontrati, per le lampade a incandescenza, nelle categorie ODP e RWL. Per i moduli LED, invece, questo risultato si è manifestato nelle categorie POCP, ODP, HWL e RWL.

Questo conferma, in linea di massima, quanto riportato nella letteratura qui utilizzata come riferimento (Dillon & Scholand, 2012), dove, in aggiunta a quelle individuate nel presente studio, per le lampade a incandescenza le alterazioni più rilevanti a carico dell'ambiente risultano essere quelle presenti nella categoria LU mentre quelle meno considerevoli si manifestano nella categoria NHWL. Queste differenze sono legate alle diverse tipologie e quantità di input selezionati nella fase di inventario del presente lavoro, in particolare per i macroprocessi di costruzione, trasporto, utilizzo e trattamento di fine vita delle lampade. Per i moduli dotati di tecnologia LED, oltre a quelle individuate con il presente elaborato, lo studio di riferimento ha evidenziato un elevato impatto anche nella categoria NHWL, mentre gli effetti ambientali si sono mostrati poco evidenti anche nella categoria TAETP. In questo caso, però, a differenza delle lampade a incandescenza, i diversi risultati ottenuti sono legati alle differenti tipologie e quantità di input selezionati, nella fase di inventario del presente lavoro, per tutti i macroprocessi che compongono il ciclo di vita dei moduli LED.

3.4 Sommario degli impatti nelle diverse categorie ambientali

Come già ampiamente descritto al punto precedente, il cambiamento della tecnologia degli impianti semaforici nel Comune di Udine ha consentito di ridurre gli impatti totali in quasi tutte le categorie ambientali. Questo risulta ancora più evidente se si esamina lo *spider graph* riportato in Figura 5. Dal centro di questo grafico partono quattordici rette, ognuna delle quali rappresenta una specifica categoria di impatto ambientale, e lungo ciascuna di esse sono riportati i valori degli impatti totali di ciascun prodotto in quella specifica categoria. In particolare, il dato che si riferisce al prodotto più impattante è stato posto al limite della circonferenza del grafico assegnandovi un valore pari al 100%, mentre quello associato all'altro prodotto (cioè quello meno impattante) è stato riportato lungo la medesima retta, ma normalizzandolo in termini percentuali al valore del 100%. La diminuzione degli effetti a carico dell'ambiente è in linea generale riconducibile, in ogni categoria ambientale, a una riduzione della somma degli impatti totali derivanti dal trasporto, dall'utilizzo dei dispositivi e dal trattamento di fine vita (per i motivi indicati al punto precedente) più consistente rispetto l'incremento della somma di quelli derivanti dalla produzione delle materie prime e dalla costruzione dei dispositivi. Solo nella categoria RWL gli impatti totali generati dai processi del ciclo di vita dei moduli LED sono risultati essere superiori rispetto agli stessi relativi alle lampade tradizionali a incandescenza. I motivi di

questo aumento sono imputabili al maggiore incremento di rifiuti radioattivi generati complessivamente dalla produzione delle materie prime e dalla costruzione dei dispositivi passando dalle lampade a incandescenza ai moduli LED, rispetto all'entità con cui si è ridotto il quantitativo della somma di quelli che possono derivare dal trasporto, dall'utilizzo e dal trattamento di fine vita. Ciò è imputabile essenzialmente alla più elevata complessità tecnologica dei moduli LED. Questi risultati confermano quelli riportati nella letteratura qui considerata come riferimento (Dillon & Scholand, 2012), eccetto che per la categoria RWL, poiché anche in essa prevale l'impatto delle lampade a incandescenza rispetto a quello dei LED. Tali differenze sono probabilmente imputabili, come già sopra evidenziato, alle diverse tipologie e quantità di input selezionati nella fase di inventario soprattutto per quanto riguarda i moduli LED, in particolare con riferimento all'incidenza del nucleare sulla composizione del mix di energia elettrica prodotta nel Paese dove è avvenuta la loro costruzione.

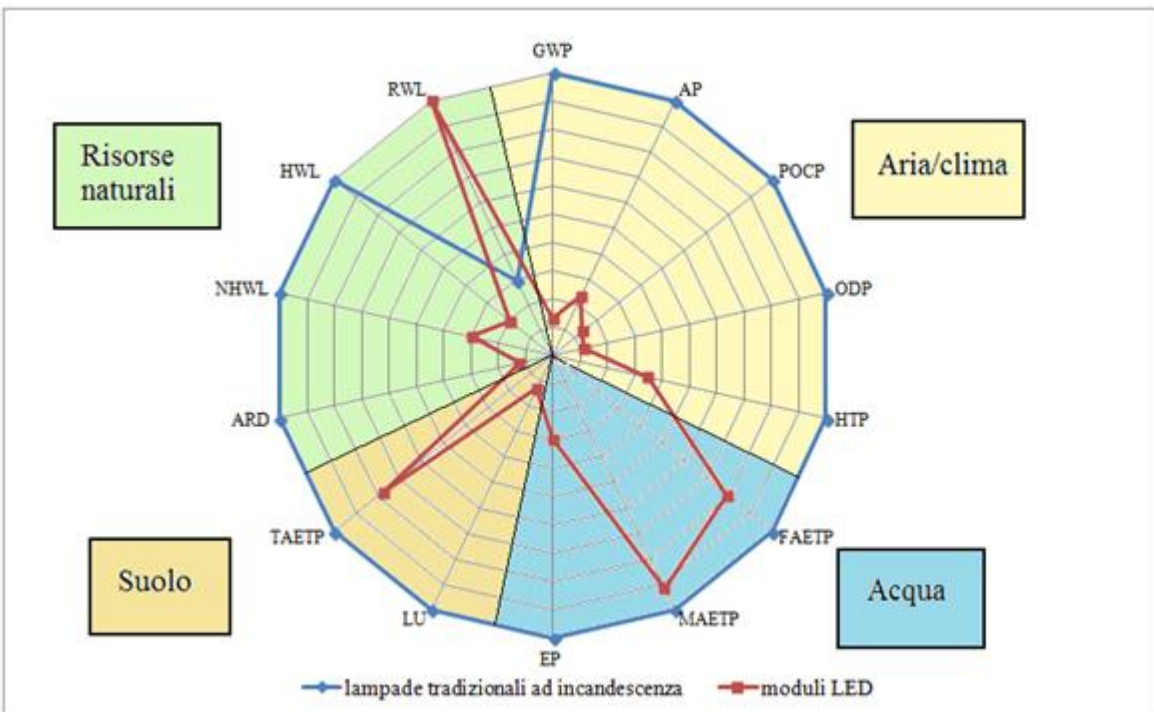


FIG. 5. Confronto tra gli impatti totali, in ciascuna categoria di impatto ambientale, generati dal ciclo di vita delle lampade tradizionali a incandescenza e dei moduli LED.

4. Conclusioni

Un approccio basato sul “ciclo di vita” si è rivelato particolarmente efficace in un caso studio come quello da noi esaminato, dove l’obiettivo principale era rappresentato, sostanzialmente, dalla comparazione di due prodotti ai fini di valutare ex post l’efficacia di alcune scelte effettuate da un’Amministrazione Comunale. L’utilizzo della metodologia LCA ha infatti permesso di valutare nel dettaglio quelle che potremmo definire come “le conseguenze ambientali” di una modifica della tecnologia utilizzata. Ottimo esempio di come una scelta tecnologica inevitabilmente porti a esiti che non appartengono esclusivamente alla sfera economica.

Nello specifico, i risultati hanno posto in luce la migliore compatibilità ambientale dei LED rispetto alle ottiche a incandescenza per quasi tutte le categorie d’impatto ambientale prese in esame. Ciò è imputabile, in linea generale, alla consistente riduzione degli impatti generati durante il trasporto, l’utilizzo e il trattamento di fine vita dei dispositivi. Solo nella categoria RWL l’impatto è aumentato, principalmente per il fatto che per costruire tutti i moduli LED è necessaria una quantità di energia elettrica notevolmente superiore rispetto alle lampade, e anche in relazione all’aumento, dal 2007 al 2010, dell’incidenza del nucleare sulla composizione del mix di energia elettrica prodotta in Ungheria, Paese dove l’azienda fornitrice produce le lanterne semaforiche.

BIBLIOGRAFIA

Compound Semiconductor. *Scaling sapphire underpins the solid-state lighting revolution*. Compound Semiconductor, 5 December 2011.

Comune di Udine. *Piano d’Azione per l’Energia Sostenibile*. Udine, Giugno 2010, 4-9.

H. E. Dillon and M. J. Scholand. *Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 2: LED Manufacturing and Performance*. Prepared for Solid-State Lighting Program of US Department of Energy by Pacific Northwest National Laboratory and N14 Energy Limited. Richland, Washington, USA, June 2012, 1-69.

IEA, International Energy Agency, 2017^a. *Statistics, Hungary: Electricity and Heat for 2007*. URL: <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=HUNGARY&product=ElectricityandHeat&year=2007>, ultimo accesso 20 luglio 2017.

IEA, International Energy Agency, 2017^b. *Statistics, Hungary: Electricity and Heat for 2010*. URL:

<https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=HUNGARY&product=ElectricityandHeat&year=2010>, ultimo accesso 20 luglio 2017.

Laser Focus World. *Co-doped luminescent glass creates white light from UV LEDs*. Laser Focus World, November 2011.

Osram. *Life Cycle Assessment of illuminants: a comparison of light bulbs, compact fluorescent lamps and LED lamps*. Osram Opto Semiconductors GmbH. Regensburg (Germany), November 2009, 1-24.

PRè, SimaPro 8.1.1 *Life Cycle Assessment Software Package*. PRè Consultant, Amersfoort (NL), 2016.

A. Scipioni, A. Mazzi, F. Zuliani e A. Boatto. Life Cycle Assessment: uno strumento per la valutazione degli impatti ambientali. *De Qualitate VIII*, Settembre, 46-53, 2008

SETAC. *A technical framework for Life Cycle Assessment*. Workshop report from the Smuggler Notch, Vermont, 1991.

United Nation Environment Programme and Society of Environmental Toxicology and Chemistry. *Life Cycle Management. A business guide to sustainability*. United Nation Environmental Programme, 2007.