



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE

Tesi di Laurea

SOLUZIONI DIGITALI A SUPPORTO DEL CICLO DI
VITA DEL PRODOTTO

DIGITAL SOLUTIONS TO SUPPORT THE
PRODUCTLIFE CYCLE

Relatore

Prof. Maurizio Bevilacqua

Correlatrice

Ing. Sara Antomarioni

Laureando

Cristian Guerrini

Anno accademico 2020-2021

Sommario

0. Introduzione.....	1
0.1 Contenuto della tesi.....	1
0.2 Struttura della tesi	1
1. Ciclo di vita di un prodotto.....	2
1.1 Introduzione	2
1.2 Product Lifecycle Management (PLM)	3
1.3 La Valutazione del Ciclo di Vita (LCA)	5
1.4 Fasi dell’LCA.....	7
1.5 Il costo del ciclo di vita (LCC).....	9
1.6 I Limiti dell’LCA e dell’LCC.....	10
2. Metodologie innovative a supporto degli studi LCA ed LCC	11
2.1. Progettazione e valutazione energetica	12
2.1.1. Introduzione	12
2.1.2. Inclusione della durabilità nello studio LCC.....	13
2.1.3. Metodologia proposta	14
2.2. Life Cycle Optimization Tool & Life Cycle Data Tool	18
2.2.1. Introduzione	18
2.2.2. Proposta del set di strumenti.....	19
2.2.3. Caso applicativo industriale	25
2.3. Geographic Information System per la valutazione LCA.....	28
2.3.1. Introduzione	28
2.3.2. Modello proposto.....	30
2.3.3. Caso di studio	32

2.4.	Approccio integrato di progettazione sostenibile	36
2.4.1.	Introduzione	36
2.4.2.	Descrizione del metodo	37
2.4.3.	Modellazione dell'LCC	41
2.4.4.	Integrazione ed implementazione del software.....	43
2.5.	Sostenibilità sociale nel processo di realizzazione del prodotto	45
2.6.	L'obsolescenza degli apparecchi elettronici da parte della società	47
2.6.1.	Introduzione	47
2.6.2.	Descrizione del modello.....	49
2.6.3.	Implementazione della simulazione Monte Carlo.....	51
2.7.	Caso di studio: la produzione di pneumatici ecologici.....	54
2.7.1.	Introduzione	54
2.7.2.	Ciclo di vita degli pneumatici	55
2.7.3.	Metodo e piano d'analisi	57
2.7.4.	Risultati.....	60
2.8.	Caso di studio: la produzione di pale di turbine aeronautiche.....	61
2.8.1.	Introduzione	61
2.8.2.	Il processo produttivo	62
2.8.3.	Analisi dei risultati	64
3.	Analisi grafica dei documenti	66
3.1.	Articoli per anno	66
3.2.	Articoli per tematica.....	67
4.	Conclusioni.....	68
	Bibliografia	69

0. Introduzione

Con l'avvento della quarta rivoluzione industriale, l'esigenza di essere al passo con i tempi, richiede prodotti sempre più innovativi, performanti e a costi ridotti. L'impegno dell'azienda nel ricercare e sviluppare nuovi prodotti risulta essere uno dei fattori strategici più significativi per accrescere la propria competitività all'interno del mercato, ridurre i consumi energetici, migliorare la sicurezza sul lavoro e, non per ultimo, limitare l'inquinamento interno ed esterno.

0.1 Contenuto della tesi

Con la seguente tesi si vuole realizzare una panoramica su tutto quello che riguarda il ciclo di vita di un prodotto, in particolar modo ponendo l'accento sulle soluzioni digitali a supporto del prodotto stesso. Quest'ultime sono state ricavate da articoli scientifici appositamente selezionati, in maniera tale da analizzarne la possibilità e i vantaggi relativi alla loro implementazione.

0.2 Struttura della tesi

Capitolo 1 - Ciclo di vita di un prodotto: Propone una panoramica completa su tutto quello che riguarda la vita del prodotto dalla progettazione, fino alla sua uscita dal mercato. Verranno anche definiti gli strumenti principali a supporto del ciclo di vita stesso del prodotto.

Capitolo 2 - Metodologie innovative a supporto degli studi LCA ed LCC: Si effettua un'analisi critica di una serie di articoli scientifici, ponendo il focus sulle soluzioni innovative proposte per ovviare alle mancanze degli strumenti principali di analisi del ciclo di vita

Capitolo 3 – Analisi mediante grafici: Analisi grafica per classificare gli articoli analizzati, secondo vari parametri.

1. Ciclo di vita di un prodotto

1.1 Introduzione

Il ciclo di vita del prodotto (PLC o Product Life Cycle) si riferisce all'evoluzione di un prodotto, dalla sua progettazione fino alla sua futura uscita dal mercato, e prevede la suddivisione in quattro fasi principali:

- 1) *Introduzione*: La durata di questa fase dipende dalla predisposizione del mercato di riferimento ad accettare il nuovo prodotto, tuttavia sarebbe auspicabile che questa fase richiedesse minor tempo possibile, considerando che vi sono scarsi profitti e costi unitari di produzione e distribuzione elevati.
- 2) *Crescita*: In questa fase di sviluppo, il mercato comincia ad espandersi attirando nuovi clienti e concorrenti. I profitti crescono proporzionalmente e raggiungono livelli elevati per poi declinare con l'aumento del numero di concorrenti che acquistano nuove quote di mercato. Ogni azienda cerca di prevalere sulle altre, attraverso campagne pubblicitarie aggressive e puntando alla promozione del marchio sottolineando le differenze con gli altri concorrenti.
- 3) *Maturità*: Il mercato, arrivati a questo punto, ha una base di clienti e fornitori già consolidata. Vengono aggiunti prodotti complementari e il servizio ai clienti diventa un importante elemento di differenziazione, poiché non c'è più possibilità di acquisire nuovi clienti se non sottraendoli ai concorrenti attraverso delle strategie di prezzo. Tutti i rivali che hanno una piccola fetta di mercato e non possono permettersi di giocare sul prezzo escono di scena in questa fase. Si cerca di differenziare il prodotto e di preservarne il potere all'interno del mercato.
- 4) *Declino*: Vi è una diminuzione della domanda relativa al prodotto e una conseguente limitazione delle spese di promozione e pubblicità. Per alcuni prodotti vi è inoltre una scomparsa dai mercati, solitamente dovuta a vari fattori (cambi di passo tecnologici, cambiamenti nei gusti dei consumatori o magari un aumento della concorrenza). [1]

1.2 Product Lifecycle Management (PLM)

Il PLM è un approccio strategico alla gestione delle informazioni, dei processi e delle risorse a supporto del ciclo di vita di prodotti e servizi. Partendo dalla loro ideazione, allo sviluppo, al lancio sul mercato, al ritiro. L'organizzazione e la gestione di grandi quantità di dati rappresentano un'importante e difficile mansione nel settore della produzione. Inoltre, mantenere queste informazioni aggiornate nonché accertarsi che i dati siano controllati e accessibili tra i diversi reparti di un'azienda è una grande sfida. Nell'ambito di un sistema PLM i team e le persone possono creare, organizzare, gestire e consolidare le informazioni in modo efficace. Lo scopo, quindi, è raccogliere quante più informazioni possibili riguardo la fase di design, la produzione, l'utilizzo e lo smaltimento finale di un prodotto, in poche parole può essere visto come un quadro per l'ottimizzazione del prodotto e una grande opportunità per massimizzare la collaborazione lungo la catena di approvvigionamento.

I *Systems Engineering* rappresentano la prima fase del Product Lifecycle Management e accompagna anche tutte le fasi successive nel processo di PLM. Si concentra sulla definizione delle esigenze dei clienti e delle funzionalità richieste nelle prime fasi del ciclo di sviluppo, nel documentare i requisiti, quindi nel procedere con la progettazione di architettura e di convalida del sistema, sempre tenendo in considerazione la totalità dei problemi.

Vi sono però alcune alternative digitali interessanti che vengono impiegate al fine di supportare il processo di sviluppo dei prodotti. Queste opzioni nascono soprattutto poichè le imprese non possono rinunciare all'impiego di particolari strumenti di rappresentazione e simulazione virtuale se vogliono aumentare o perlomeno mantenere inalterato il vantaggio competitivo sui propri competitor. Questi consentono di realizzare prodotti dalle prestazioni superiori, ma al contempo necessitano di essere adeguatamente strutturati all'interno dell'organizzazione aziendale.

Queste tecnologie permettono innanzitutto di velocizzare la fase di test e di limitare l'esigenza di dover ricorrere alla costruzione di molti prototipi fisici, aumentando la qualità delle informazioni relative alla progettazione e il grado di conoscenza conseguito dai membri del team.

la *Realtà Virtuale*, si serve dell'utilizzo di un calcolatore e di particolari software e hardware allo scopo di generare la simulazione di un ambiente, di oggetti e fenomeni alternativi, che devono tuttavia apparire reali agli occhi dell'utente. Il suo impiego durante lo svolgimento del processo di sviluppo di un prodotto richiede l'uso di potenti e costosi calcolatori. Tale strumento consente ai progettisti di entrare in un contesto virtuale dove possono direttamente interagire con l'articolo

muovendosi attorno a esso, osservandolo e toccandolo, da cui è possibile trarre precise conclusioni e coadiuvare il processo decisionale.

In contrapposizione alla Realtà Virtuale, dove l'utente risulta totalmente immerso in un ambiente alternativo, la *Realtà Aumentata* si pone l'obiettivo di sovrapporre al contesto reale, immagini, contenuti o animazioni di carattere virtuale generate a computer che si rivelino il più possibile veritieri agli occhi della persona. Quest'ultimo sistema permette dunque di integrare il mondo effettivo e gli oggetti virtuali, arricchendo e potenziando l'interazione dell'utilizzatore con l'ambiente reale tramite l'aggiunta di particolari informazioni. Tale caratteristica consente di ridurre la laboriosità in fase di modellazione, diminuendo la quantità di oggetti da ricreare. Ciò costituisce un fondamentale punto di forza che la rende potenzialmente molto più efficace ed efficiente della RV.

Negli ambienti di progettazione avanzata ha trovato sempre più spazio l'applicazione di modelli informatizzati di oggetti sui quali si possono effettuare simulazioni virtuali, generalmente noti come *Gemelli Digitali* (Digital Twin), inseriti allo stesso modo all'interno della prototipazione virtuale. Questa soluzione unisce il mondo reale con quello virtuale come rappresentazione di un processo, un prodotto o un servizio. Alcuni sensori vengono installati sull'oggetto fisico trasmettendo i suoi dati al gemello digitale che li elabora e valuta. Monitorando i sistemi è possibile conoscere in anticipo eventuali guasti e problemi ancora prima che si verifichino, poiché il modello si aggiorna e si modifica al variare di controparti fisiche [2].

1.3 La Valutazione del Ciclo di Vita (LCA)

Gli studi di LCA (Life Cycle Assessment), negli ultimi anni, sono sempre più diffusi grazie all'esigenza crescente da parte delle aziende di tenere sotto controllo, dal punto di vista ambientale, i processi legati ai propri prodotti. Le aziende mirano al raggiungimento degli obiettivi derivanti dalle politiche europee di sostenibilità ambientale, che prevedono strategie volte al miglioramento dei risultati nel campo della protezione e gestione ambientale nonché l'uso di fonti di energia rinnovabile. In seguito alle problematiche di carattere ambientale che contribuiscono al progressivo deterioramento degli ecosistemi, oggi si sta rafforzando in Europa la domanda di una migliore qualità ambientale e di una maggiore efficienza dei servizi e degli impianti tecnologici permettendo di valorizzare, anche da un punto di vista economico e imprenditoriale, i prodotti, le imprese e i territori gestiti con criteri rigorosi di sostenibilità ambientale.

Per una corretta gestione ambientale, molte imprese si sono impegnate, volontariamente ad utilizzare strumenti di gestione e strategie appropriati, attraverso un pacchetto di strumenti standardizzati, che si basano sulle capacità di autoregolazione del mercato e sul comportamento responsabile di produttori e consumatori.

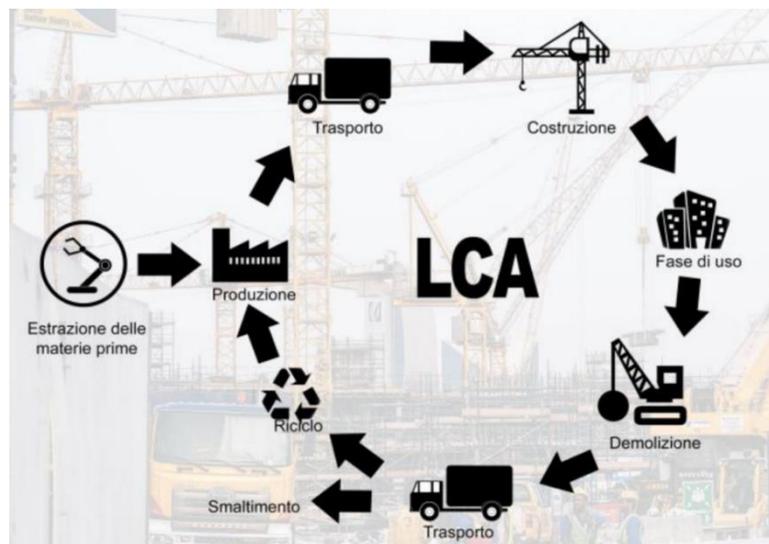


Figura 1.1: Ciclo di vita di un prodotto

A questo proposito, l'International Standard Organization è un'organizzazione internazionale, rappresentata in Italia da UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), che ha provveduto a sviluppare norme standardizzate in materia di gestione ambientale dell'impresa.

Le norme sviluppate appartengono alla serie ISO 14000, che fornisce strumenti di gestione alle organizzazioni che intendono porre sotto controllo i propri aspetti ed impatti ambientali e migliorare le proprie prestazioni in tale campo. Fra le norme della famiglia ISO 14000 la serie ISO 14040 definisce la Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) di un prodotto. Il metodo LCA è una procedura standardizzata che tende a determinare il costo ambientale delle attività umane, quantificando e valutando l'impatto ambientale di un prodotto (o processo o attività) considerando tutte le diverse fasi del suo ciclo di vita. Nasce nello specifico come approccio "dalla culla alla tomba", ossia inizia con la raccolta delle materie prime necessarie e si conclude con il termine della vita utile del prodotto.

Con precisione la definizione sulla metodologia LCA, proposta dalla SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) e formalizzata nella ISO 14040 (UNI EN ISO 14040, 1998), è la seguente:

È un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici e ambientali relativi a un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale."

1.4 Fasi dell'LCA

Secondo le Norme ISO 14040 e ISO 14044 un'analisi LCA si svolge in quattro fasi distinte:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione
- Analisi dell'Inventario
- Valutazione dell'Impatto Ambientale del ciclo di vita
- Interpretazione dei Risultati

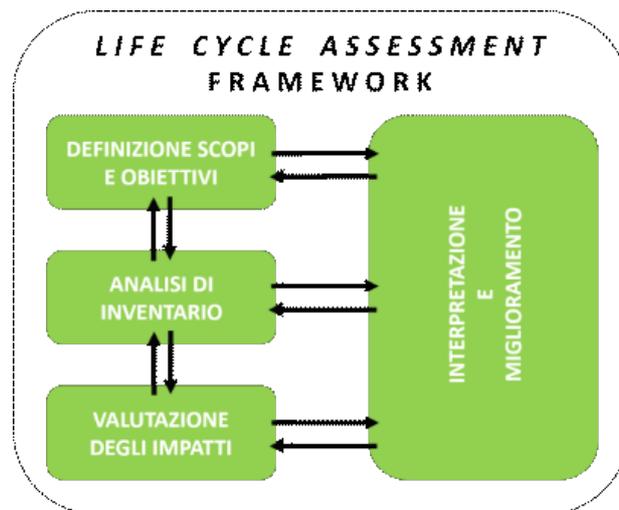


Figura 1.2: Fasi dell'LCA

- 1) *Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione:* Consiste nel definire e descrivere il prodotto, processo o attività. Il sistema prodotto è suddiviso in unità di processo, ciascuna delle quali include tutte le attività relative ad un'operazione o ad un gruppo di operazioni. Stabilendo la motivazione e il contesto in cui la valutazione deve essere effettuata, andando ad individuare i limiti e gli effetti ambientali da sottoporre a revisione per la valutazione. Una prima delimitazione dei confini del sistema può avvenire attraverso criteri geografici e tecnologici. A questo segue il successivo accantonamento delle componenti che risultano essere irrilevanti nella ricerca di informazioni che le caratterizzano. Di conseguenza vengono incluse altri componenti alle quali inizialmente non si era attribuita un'adeguata importanza. Infine, la definizione dei requisiti di qualità dei dati, poiché la qualità dei dati è rilevante per capire l'affidabilità dei risultati dello studio e di conseguenza per interpretarlo correttamente.

- 2) *Analisi dell'Inventario*: Prevede la raccolta e la definizione dei dati, con la conseguente modellizzazione del sistema oggetto di analisi da svolgere in accordo con quanto definito nella fase precedente. È tipicamente la fase che richiede i maggiori sforzi di tutta l'analisi, poiché si occupa di identificare e quantificare l'uso di energia, acqua, materiali e le emissioni nell'ambiente. Per la raccolta dati è necessario conoscere in maniera completa e dettagliata tutte le unità di processo del sistema ed è preferibile che essi siano raccolti presso le aziende che hanno commissionato l'analisi (dati primari). Nel caso in cui non siano disponibili dati da fonti dirette sul caso di studio, ci si può attenere a specifici database contenuti all'interno dei software per LCA, manuali tecnici e bibliografia (dati secondari).
- 3) *Valutazione dell'Impatto Ambientale (Life Cycle Impact Assessment - LCIA)*: Le informazioni ottenute dall'analisi di inventario costituiscono il punto di partenza per la fase di valutazione degli impatti, ovvero dei potenziali effetti sia sulla salute umana che sull'ambiente, associati ai consumi di risorse (acqua, materiali...), di energia e i relativi rilasci nell'ambiente documentati nell'analisi d'inventario stessa.

CATEGORIE D'IMPATTO	
Consumo di risorse	Consumo di risorse naturali Consumo di energia primaria
Potenziati impatti ambientali	Cambiamenti climatici Assottigliamento della fascia d'ozono Acidificazione Eutrofizzazione Smog fotochimico Tossicità (aria, acqua, suolo) Ecotossicità Degrado del territorio ed altri tipi di effetti Effetto serra
Rifiuti prodotti	Produzione di rifiuti pericolosi

Figura 2.3: *Categorie d'impatto dell'LCIA*

- 4) *Interpretazione dei Risultati*: Si cerca di analizzare i risultati delle considerazioni fatte a proposito dell'inventario e quelle relative all'impatto ambientale per selezionare il prodotto, processo o servizio. Passaggio importante è quello dell'identificazione degli hot-spot, ossia materiali o processi che contribuiscono maggiormente agli impatti complessivi. Vengono inoltre compiute delle valutazioni sulla completezza e solidità del modello (come analisi di sensitività e incertezza), andando a trarre delle conclusioni, anche alla luce delle

limitazioni presenti. Lo strumento del Life Cycle Assessment (LCA) permette una comprensione chiara, trasparente e scientifica delle problematiche ambientali legate ai prodotti e servizi erogati al mercato in un'ottica di ciclo di vita, in maniera tale da permettere la programmazione di azioni al fine di ottenere un continuo miglioramento [3][4].

1.5 Il costo del ciclo di vita (LCC)

Un altro strumento operativo è il Life Cycle Costing ossia una metodologia che consente di valutare i costi lungo l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla produzione alla fase di smaltimento. L'LCC rappresenta il costo totale di un'operazione o di parte di questa nell'arco della sua vita, includendo i costi di pianificazione, progettazione, acquisizione, gestione, manutenzione e dismissione. È una valutazione economica in cui si considerano tutti i costi che sono originati dall'opera in un periodo determinato di analisi.

L'approccio può essere usato per supportare il processo decisionale sia durante il suo intero ciclo di vita e sia per cercare di migliorare la comprensione totale di un bene. Grazie a questa metodologia si può migliorare la trasparenza della composizione dei costi, rendendo più facili e più efficaci le scelte tra i diversi mezzi in maniera tale da raggiungere gli obiettivi desiderati. Permette inoltre di arrivare ad un adeguato equilibrio tra i costi di capitale iniziali, futuri e ricavi, rendendo evidenti le opportunità e favorendo una migliore efficienza economica, utile per fornire direttamente informazioni sui costi ai progettisti, al fine di ridurre il costo del ciclo di vita dei prodotti che progettano.

1.6 I Limiti dell’LCA e dell’LCC

Nonostante le sue numerose applicazioni e la sua capacità nel processo di identificazione dell’impatto ambientale in riferimento al processo produttivo di un bene un servizio o un prodotto, la metodologia LCA presenta delle limitazioni che riguardano soprattutto la disponibilità di dati completi e precisi, la complessità dello studio e il quantitativo significativo di risorse richieste in termini di costo e tempo. Si incontrano, difficoltà soprattutto quando si analizzano prodotti nuovi, ossia in quella fase che in gergo viene definita come NPD (New Product Development), poiché i dati necessari devono essere necessariamente ipotizzati, pertanto l’LCA per il processo di NPD deve essere semplificato in modo da suggerire decisioni rapide agli sviluppatori di prodotti, poiché la rapidità è uno dei parametri più importanti nello sviluppo di nuovi prodotti. Importante in uno studio di LCA è la natura delle scelte e delle assunzioni (es. stabilire i confini di un sistema o scegliere le categorie di impatto) che nella maggior parte dei casi può essere soggettiva. I modelli utilizzati per l’analisi d’inventario o per la valutazione degli impatti non sono adatti a qualunque applicazione e non sono in grado di descrivere in modo esaustivo qualsiasi tipo di impatto ambientale. La disponibilità e qualità dei dati possono limitare o compromettere in qualche modo l’affidabilità dei risultati, pertanto risulta particolarmente rilevante lavorare con un set di dati consistenti e documentato. L’LCA è inoltre maggiormente applicabile ad indicatori d’impatto su scala globale (ad esempio, cambiamenti climatici) e meno agli impatti locali come lo smog, dove i fattori temporali e spaziali delle emissioni assumono un’importanza crescente.

Esistono alcune difficoltà nell’applicazione delle tecniche LCC ai PSS (Product-Service System), che di solito includono la necessità di analizzare vari scenari per valutare efficacemente l’impatto dei rischi e delle incertezze. Queste derivano soprattutto da alcune specificità del PSS, quali la modifica del ruolo e delle responsabilità di clienti e fornitori nelle varie fasi del ciclo di vita del PSS, la difficoltà di prevedere tempistiche e frequenza complessiva di utilizzo di alcuni servizi e la mancata disponibilità di dati del ciclo di vita. Il divario sulle informazioni LCC tra i vari stakeholder durante la fase di progettazione del PSS (Product-Service System) può portare a scelte insoddisfacenti e impedire il pieno sfruttamento dei benefici del PSS [5].

2. Metodologie innovative a supporto degli studi LCA ed LCC

In questo capitolo analizzeremo, in prima battuta, dei documenti scientifici che mirano a colmare le lacune relative ad un generico studio di LCA/LCC, andando ad integrare metodologie innovative progettate appositamente per massimizzare la bontà dei dati in ingresso, relativamente al campo di studio specifico su cui si vuole condurre una qualsiasi analisi di sostenibilità. I documenti e gli approcci innovativi proposti vengono presentati in base a tre macro-tematiche ritenute importanti per definire una panoramica quanto più ampia possibile all'interno degli studi LCA ed LCC:

- Sostenibilità Energetica
- Sostenibilità Ambientale
- Sostenibilità Sociale

Nella seconda parte di questo capitolo verranno invece analizzati due diversi casi di studio:

- La possibilità di produrre pneumatici per auto in maniera ecologica
- La produzione di pale di una turbina, utilizzando la *Selective Laser Melting* (SLM)

Entrambi i casi oggetto di studio nella fattispecie vanno a confrontare i metodi tradizionali con quelli innovativi basandosi sulle valutazioni d'impatto ed evidenziandone gli sprechi sia in termini economici che ambientali.

2.1. Progettazione e valutazione energetica

2.1.1. Introduzione

La valutazione degli impatti ambientali dei sistemi di prodotto ha assunto un ruolo chiave nella fase di sviluppo di nuovi prodotti (NPD), con particolare attenzione alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica. Di conseguenza, le normative ambientali hanno acquisito restrizioni più severe, per indurre uno sviluppo di prodotti più efficiente dal punto di vista energetico e rispettoso dell'ambiente.

Il metodo *ErP (Energy- Related Products)* permette di compiere una valutazione funzionale sulla durabilità del prodotto da incorporare per misurazioni pratiche nelle seguenti valutazioni:

- Un controllo di conformità per garantire che i prodotti legati all'energia soddisfino la direttiva ErP emanata dall'Unione Europea.
- Una valutazione economica per calcolare il costo totale durante il ciclo di vita del prodotto (LCC).
- Una valutazione per quantificare i carichi ambientali del prodotto attraverso una valutazione del ciclo di vita semplificata.

La consapevolezza ambientale porta alla comparsa del design del ciclo di vita (Life-Cycle Design, LCD).

Questo rappresenta un pensiero durante l'intero ciclo di vita del prodotto, basandosi sulla valutazione e sul costo del ciclo di vita per la quantificazione delle prestazioni in termini sia ambientali che economici. L'LCA è ampiamente utilizzato nell'NPD per stimare gli impatti ambientali durante il ciclo di vita del

prodotto, tuttavia, l'LCA completo è inefficiente all'inizio del NPD a causa della scarsità di dati. Tuttavia, l'analisi LCC è stata tipicamente condotta in NPD all'interno di scenari statici, questa ipotesi può causare un divario tra i costi sostenuti da LCC e quelli reali e si traduce in stime dei costi imprecise. Pertanto, il calcolo preciso dell'LCC durante l'NPD è necessario per gli sviluppatori di prodotti che devono specificare le distribuzioni dei costi durante il ciclo di vita del prodotto. Le prime decisioni di progettazione hanno un impatto significativo sulla coscienza ambientale, pertanto i progettisti debbono affrontare una problematica di conformità alle normative ambientali, dei costi e delle funzioni.

L'articolo che andiamo ad analizzare parla della necessità di fornire un metodo di progettazione che possa portare tali sviluppatori di prodotti a combinare facilmente il loro tipico processo NPD con il pensiero LCD per le loro decisioni sui parametri di progettazione.

2.1.2. Inclusione della durabilità nello studio LCC

La durabilità può essere un indicatore chiave delle prestazioni per risolvere questa problematica, poiché rappresenta la capacità di un prodotto di svolgere la sua funzione al livello di prestazione prevista in un dato lasso temporale, in condizioni d'uso previste e azioni prevedibili. Gioca un ruolo fondamentale soprattutto per i prodotti che consumano energia e risulta ben stimata durante l'NPD tradizionale, poiché gli sviluppatori di prodotti hanno una vasta conoscenza dei materiali e dell'elettronica del prodotto. Tuttavia, la durata stimata attraverso la conoscenza dell'ingegneria del prodotto viene raramente inoltrata all'LCA e all'LCC, a causa di una considerazione indipendente dalle prestazioni ambientali.

Questa può essere classificata nel livello di un materiale, un componente e un prodotto.

- La durabilità di un materiale indica il periodo di vita utile di un dato materiale in condizioni specifiche.
- La durata di un componente riguarda la vita utile dei componenti del prodotto.
- La durata di un prodotto si riferisce alla vita di servizio di un prodotto.

Il deterioramento dei materiali o la formazione di criticità ai componenti può causare la rottura di un prodotto per via delle loro reazioni a catena.

Il metodo proposto è allineato al tipico NPD in modo che gli sviluppatori di prodotti possano comprendere i tempi di esecuzione del controllo di conformità alla normativa e delle valutazioni ambientali, economiche e funzionali. I sistemi di prodotti target sono limitati ai prodotti relativi all'energia e alle normative ambientali ErP.

2.1.3. Metodologia proposta

La procedura presa in esame è individuata attraverso quattro fasi principali:

- 1) *Valutazione funzionale*: la durabilità di un prodotto è stata riconosciuta come aspetto primario nella prospettiva funzionale perché determina la vita di servizio del prodotto stesso. Quest'ultima risulta direttamente associata all'elettricità consumata durante la fase di utilizzo del prodotto e ai carichi ambientali emessi dall'utilizzo di elettricità. Può essere misurata attraverso la vita tecnica, su cui si concentra il presente lavoro, e la vita utile: la prima indica l'intervallo di tempo in cui il prodotto svolge la sua funzione primaria fino a quando non si verifica un primo guasto; mentre la seconda valuta per quanto tempo un prodotto è considerato utile dall'utente prima che diventi obsoleto.

Il processo di questa valutazione funzionale comprende la selezione dei potenziali componenti soggetti a guasto.

La *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) è utile in questo senso poiché va ad identificare i componenti con guasti molto frequenti che potrebbero causare un grave malfunzionamento al prodotto e la relazione causa-effetto rispetto ai potenziali guasti.

La modellazione analitica deriva la durabilità stimata di questi componenti utilizzando equazioni matematiche. Questa deve quindi essere esaminata attentamente per la selezione del design del prodotto e dei componenti. È necessario modellare componenti con guasti molto frequenti attraverso mezzi analitici per stimarne la durata, la quale solitamente dipende da vari fattori di invecchiamento meccanico, elettrico, termico e ambientale, andando a causare un affaticamento del metallo dovuto alla sollecitazione applicata al materiale.

Gli sviluppatori devono infine confermare se la durabilità soddisfa le specifiche di prodotto. Questa, in caso affermativo, sarà incorporata nel controllo di conformità ErP e nelle valutazioni economiche e ambientali per il loro ragionevole calcolo.

2) *Controllo di conformità ErP*: una volta che un prodotto è stato concettualizzato, è necessario esaminare e preparare una checklist di conformità per identificare i requisiti ErP. Il controllo di conformità è basato su metodi di misurazione e calcolo ed indica se le prestazioni del prodotto soddisfano i requisiti ErP. In caso contrario, è necessario aggiornare i concetti e le specifiche del prodotto. La raccolta dati può essere fatta seguendo i requisiti ErP che stabiliscono metodi di misurazione affidabili, accurati e riproducibili per la loro conformità. Ovviamente non è semplice raccogliere i dati perché i prodotti finali sono incompleti o in fase di progettazione. Può essere disponibile la raccolta dei dati mediante una misurazione diretta o indiretta, è preferibile però che questa venga condotta in maniera diretta, poiché la raccolta dati avviene tramite sensori, da dispositivi di misurazione in un ambiente sperimentale in cui vengono identificati i componenti del prodotto o se sono pronti, attraverso prototipi. La misurazione indiretta è un metodo che si limita solo a stimare i valori richiesti, fino alla comparsa dei prototipi fisici, tuttavia, così facendo vengono introdotte approssimazioni, che limiteranno la precisione dei dati ottenuti.

La conformità, dopo aver raccolto i dati, può essere verificata in base ai risultati del calcolo, attraverso un confronto analitico con la direttiva ErP.

3) *Valutazione economica*: questo processo consiste in una scomposizione dei fattori di costo, in modo tale da agevolare gli sviluppatori nel comprendere i flussi di costo di un prodotto per quanto riguarda le fasi di acquisizione, utilizzo e smaltimento. La fase di acquisizione riguarda l'NPD e la produzione, nonché la costruzione del sistema di produzione. L'obiettivo principale è decidere quale possa essere la progettazione ottimale di un prodotto e l'allocazione ottimale delle sequenze di processo per fabbricare e assemblare parti e componenti. La fase di utilizzo è associata al periodo durante il quale il consumatore utilizza il prodotto. I fattori di costo possono includere il prezzo al dettaglio suggerito dal produttore (*Manufacturer's Suggested Retail Price, MSRP*), il trasporto, il consumo di energia (ad es. Eletticità per elettrodomestici e benzina per veicoli), manutenzione e adempimento dei materiali. Il consumo di energia è un fattore di costo dominante

per i prodotti che ne usufruiscono per essere alimentati, tuttavia, è anche il fattore più imprevedibile a causa delle elevate incertezze nell'utilizzo del prodotto. Alla fine della loro vita utile, i prodotti vengono disassemblati in parti, componenti o materiali in fase di smaltimento. I fattori di costo rilevanti possono contenere il costo sostenuto da queste attività di smaltimento oltre al trasporto (es. Costo di Smontamento).

Equazione 1.1

$$LCC = \sum \text{costi d'acquisto} + \sum \text{Costi durante l'utilizzo} + \sum \text{Costi di dismissione}$$

Infine, l'LCC viene opportunamente revisionato, al fine di ottenere un trade-off tra fattori di costo e decisioni di progettazione.

Ovviamente è difficile ottenere un LCC esatto durante NPD a causa della scarsità di dati, della pressione relativa alla tempestività delle decisioni da prendere, tuttavia, è necessario superare questa limitazione. La ragione per cui la durabilità è incorporata sin dalla valutazione funzionale è per ridurre l'incertezza e per ridurre il più possibile il gap tra il costo energetico ipotetico al costo energetico reale sostenuto durante la fase di utilizzo.

- 4) *Valutazione ambientale*: l'LCA viene semplificato attraverso l'inclusione di un'analisi di inventario e una valutazione dell'impatto parziale, in maniera da aiutare gli sviluppatori a prendere decisioni rapide quantificando i carichi ambientali sui flussi di massa e di energia di un sistema di prodotto. La raccolta dati è il processo di acquisizione dei dati di input e output dai flussi di materiale ed energia associati a un sistema di prodotto, questa è importante, ma il modo più fattibile è utilizzare database referenziali di inventario del ciclo di vita (LCI), i quali offrono diversi set di dati generici, trasparenti e coerenti. Tuttavia, gli sviluppatori devono calibrare e regolare i dati referenziali perché raramente contengono i dati che meglio si adattano all'obiettivo e all'ambito. La quantificazione del carico ambientale è formata da fasi molto importanti, come specificare l'ingresso e l'uscita di materiali, l'energia e le emissioni in un diagramma di flusso del processo, calcolare i carichi ambientali sulle singole unità di processo e quindi aggregare i carichi ambientali su un'unità funzionale. Il diagramma di flusso del processo fornisce uno schema per acquisire e calcolare le quantità di carichi ambientali causati dai materiali, dall'energia e dalle
- 5) funzionale.

emissioni da modellare, comprese le loro relazioni. Le quantità di materiali, energia ed emissioni devono essere assegnate all'unità funzionale per comprendere il contributo frazionario di ogni unità di processo a un sistema di prodotto. Quindi, ogni carico ambientale su un processo unitario può essere quantificato moltiplicando la quantità di materiali, energia o emissioni per un fattore di caratterizzazione, che classifica e converte il risultato di analisi dell'inventario nell'unità comune di una categoria di impatto classificata. Il fattore di caratterizzazione corrisponde

- 6) al carico ambientale equivalente per parametro di inventario (ad esempio, anidride carbonica, anidride solforosa e biossido di azoto).

A sua volta, l'aggregazione dei carichi ambientali su tutte le unità consente l'acquisizione del carico ambientale totale di un sistema-prodotto. La Revisione LCA riesamina i risultati per scendere a compromessi tra la solidità ambientale e le decisioni di progettazione. [6]

2.2. Life Cycle Optimization Tool & Life Cycle Data Tool

2.2.1. Introduzione

I produttori europei di sistemi industriali devono identificare la migliore soluzione orientata al ciclo di vita, al fine di soddisfare le esigenze dei clienti ed ottenere un vantaggio competitivo negli anni a venire sui competitor. Le aziende possono essere supportate da metodologie già ben note, quali il Life Cycle Costing (LCC) e il Life Cycle Assessment (LCA), eseguendo analisi di costo e ambientali lungo l'intero ciclo di vita per lo sviluppo di prodotti più sostenibili. Tuttavia, le metodologie sopra proposte hanno delle imperfezioni, l'obiettivo è, quindi, superare i limiti individuati, proponendo l'utilizzo delle tecnologie ICT (*Information and Communication Technologies*), al fine di migliorare la sostenibilità del ciclo di vita (i costi dei sistemi industriali e gli impatti ambientali).

- Per prima cosa è stata condotta un'analisi del contesto attuale in cui operano i produttori di sistemi industriali, evidenziando come la sostenibilità possa essere un aspetto competitivo da perseguire e non solo un'esigenza imposta dalle istituzioni.
- Il secondo passo è stato l'analisi della letteratura, focalizzata sul Life Cycle Costing e sul Life Cycle Assessment.
- La terza fase ha mirato a colmare le lacune individuate, proponendo un set di strumenti per migliorare la sostenibilità del ciclo di vita, applicando le tecnologie ICT.
- Infine, il set di strumenti proposto è stato implementato in un ambiente industriale e valutato in modo qualitativo tramite questionario, al fine di raccogliere feedback su di esso.

Inoltre, i progettisti sono stati identificati come i principali attori coinvolti nelle metodologie LCC e LCA, a causa della loro elevata influenza sui costi del ciclo di vita e sugli impatti ambientali. Sono state condotte diverse ricerche empiriche per valutare quale sia la percentuale del costo del ciclo di vita o dell'impatto ambientale del ciclo di vita influenzato durante la fase di progettazione, identificando come il design del prodotto rappresenti solo 5- 10% del costo totale, ma è in grado di influenzare fino all'80% del costo del ciclo di vita.

2.2.2. Proposta del set di strumenti

Al fine di colmare le lacune precedentemente individuate, è stato previsto un set di strumenti per il miglioramento della sostenibilità del ciclo di vita dei sistemi industriali, utilizzando le tecnologie ICT.

Il set proposto prevede due strumenti principali:

1) *Life Cycle Optimization Tool*: È uno strumento per la creazione e l'identificazione di una configurazione orientata al ciclo di vita ottimale, definendo quei componenti di un sistema industriale che minimizzano i costi del ciclo di vita e gli impatti ambientali del ciclo di vita, secondo vincoli prettamente tecnici. Lo strumento consente il confronto di diverse soluzioni tecnologiche (es. per una stazione di montaggio possono essere stazioni automatiche, semiautomatiche o manuali).

- **Modello logico**: il modello proposto si basa su un'ottimizzazione multi-obiettivo dei costi del ciclo di vita e degli impatti ambientali del ciclo di vita. Per quanto riguarda gli impatti ambientali, i dati dell'Eco-Indicator 99 vengono utilizzati come principale fonte per valutare questi aspetti (è una delle valutazioni d'impatto più utilizzate nella LCA), per quanto riguarda i costi, è stata utilizzata "un'unità mimetizzata". Dall'analisi della letteratura sono stati identificati alcuni algoritmi/metodi matematici ai fini di ottimizzare il ciclo di vita (la programmazione lineare, l'algoritmo genetico e l'ottimizzazione dello sciame di particelle sono i più utilizzati). L'algoritmo genetico viene scelto per tre ragioni:
 - (i) è più efficiente di altri all'aumentare del numero di variabili;
 - (ii) non presenta problemi con l'ottimizzazione multi-obiettivo;
 - (iii) è adatto per applicazioni che trattano sistemi strutturati per componenti (un prodotto potrebbe essere visto come un cromosoma e i suoi componenti come geni).

Nello specifico, è stato scelto "NSGA-2", poichè è uno degli algoritmi genetici più popolari e si è dimostrato essere uno dei più efficienti per l'ottimizzazione multi-obiettivo su una serie di problemi di benchmark. La forma analitica generale del modello è:

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\text{LCC}_{ij} \cdot x_{ij}) \\
& \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\text{LCEI}_{ij} \cdot x_{ij}) \\
& \text{Subject to} \\
& \prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (A_{ij} \cdot x_{ij}) \geq TV \\
& \prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (A_{ij} \cdot x_{ij}) \leq TV \\
& \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \forall i = 1, 2, \dots, N \\
& x_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M
\end{aligned}$$

Figura 2.1: Forma analitica modello NSGA-2

- **Descrizione modello:**

LCC (Life Cycle Cost) e LCEI (Life Cycle Environmental Impact);

A è un valore tecnico o prestazionale generico, mentre TV è il valore target (vincolo). Infine, x_{ij} è una variabile binaria, il cui valore è 1 se si usa l'alternativa j -esima del componente i -esimo, altrimenti vale 0. L'indice " i " rappresenta i componenti necessari per costruire il sistema industriale, l'indice " j " indica le diverse alternative per il componente i -esimo.

Il modello risulta essere multi-obiettivo, poichè minimizza i costi del ciclo di vita del prodotto (Eq. (1)), ma allo stesso tempo minimizza l'impatto ambientale del ciclo di vita (Eq. (2)). Inoltre, il modello presenta due tipi di vincoli: il primo che impone il rispetto di un determinato valore obiettivo tecnico/prestazionale (le forme generali sono Eq. (3), (4)) e il secondo che implica una correlazione logica tra gli indici (per ciascun componente (i), viene utilizzata una ed una sola alternativa (j), Eq. (5)).

Il *Life Cycle Optimization Tool* mira ad essere utilizzato nella fase concettuale, quindi è in grado di coprire i vincoli di base del cliente. Il modello precedentemente descritto viene poi implementato in un framework composto da un "*Front End*" e un "*Back End*".

Il Back End è realizzato tramite un linguaggio di programmazione ad oggetti,

Java, finalizzato allo sviluppo di metaeuristiche per la risoluzione di problemi multi-obiettivo chiamate *jMeta*, utilizzate per via della loro portabilità, flessibilità ed estensibilità. Il lato Back End contiene il modulo dove scrivere il problema in forma analitica (Valutazione degli obiettivi di progettazione) e il modulo del motore di ottimizzazione, basato su NSGA-2.

Il Front end è invece sviluppato da ZK-2 un framework web Java. L'interfaccia utente è suddivisa in due aree principali: una che si occupa della definizione delle funzioni obiettivo e l'altra che invece va a definire lo spazio relativo al design.

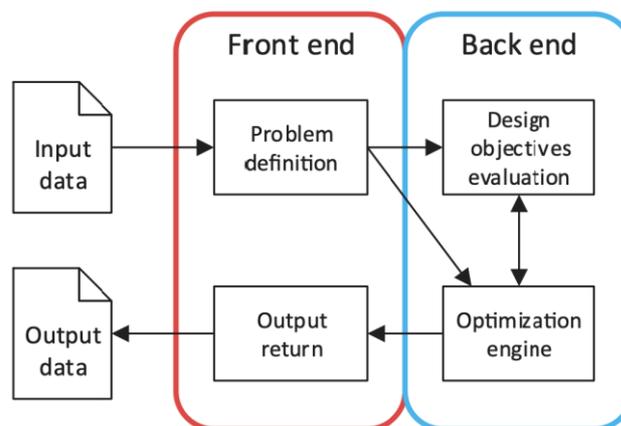


Figura 2.2: Struttura del Life Cycle Optimization Tool

Nell'area Objective Functions Definition, coerentemente con la struttura, è possibile:

- (i) selezionare gli obiettivi da valutare nel modello di ottimizzazione spuntando la checkbox;
- (ii) definire quanti componenti costituiscono le funzioni obiettivo che riempiono la casella di testo;
- (iii) inserire la matrice dei dati contenente i valori LCC, LCA.

Tutti i parametri e i dati inseriti vengono controllati e validati, al fine di evitare errori, se tutti sono corretti, l'interfaccia mostra un pulsante nascosto che consente l'esecuzione dell'algoritmo (NSGA-2).

Dopo l'esecuzione dell'algoritmo, i risultati dell'ottimizzazione vengono visualizzati in una nuova finestra (*Output return*), che riporta:

- (i) i valori dei principali parametri;
- (ii) il valore delle funzioni obiettivo;
- (iii) tutte le soluzioni ottimali ottenute.

2) *Life Cycle Data Tool*: La sua potenzialità è l'elaborazione dei dati raccolti dal campo, attraverso diversi sensori installati lungo tutta la linea, al fine di restituire dati utilizzabili (reali) a progettisti e sistemisti. Al livello pratico, il *Life Cycle Data Tool* è in grado di raccogliere dati importando "file *.csv" dai PLC (*Programmable Logic Controller*) delle diverse stazioni/macchine o utilizzando il linguaggio QLM (*Qt Meta Language*).

È composto anch'esso da un Front End e un Back End:

il Front è l'interfaccia utente, dove l'utente può porre delle domande, al fine di ricevere le informazioni desiderate (*output return*);

Il Back contiene la logica, per rispondere alle domande dell'utente, restituendo le informazioni richieste. Risulta connesso al Database PLC, il quale riceve i dati dai diversi sensori installati sulle macchine/stazioni del sistema industriale.

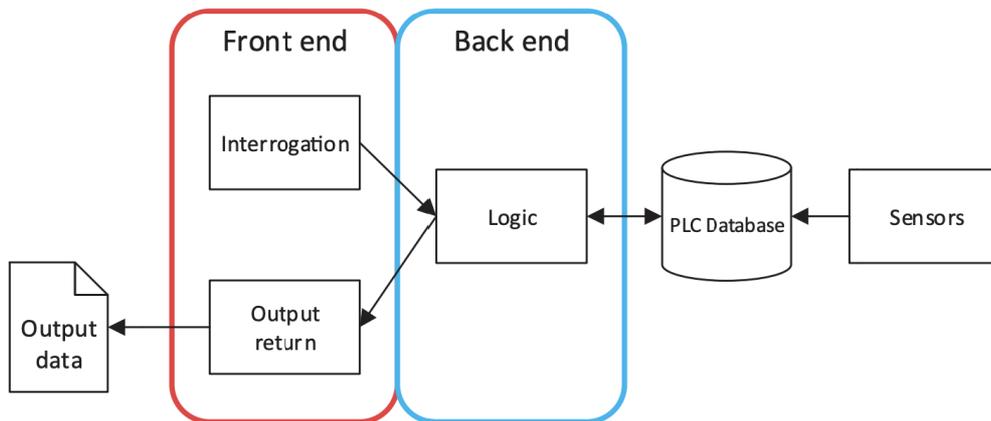


Figura 2.3: Struttura del *Life Cycle Data Tool*

I benefici ottenuti attraverso questo strumento sono:

- (i) il monitoraggio in tempo reale del sistema durante la fase di utilizzo, andando a migliorare la capacità di intervento (in termini di tempo e precisione);
- (ii) la possibilità di aggiornare il database aziendale, migliorando il costo del ciclo di vita e le stime di impatto ambientale delle proposte successive;

- (iii) l'estrazione di dati utili dal campo per i progettisti, consentendo il confronto tra dati reali e dati stimati (in fase di progettazione) e la comprensione del comportamento del sistema (tasso di guasto, disponibilità, affidabilità, consumo energetico, ecc.) durante la fase di utilizzo, al fine di migliorare la progettazione dei sistemi successivi.

I dati archiviati nel PLC possono essere esportati dal *Life Cycle Data Tool* come file standard *.csv o utilizzando il nuovo linguaggio standard QLM, dove vengono riepilogate le prestazioni, i guasti e i parametri principali della giornata di utilizzo. I progettisti possono selezionare il periodo di tempo da analizzare e le informazioni di sistema vengono di conseguenza elaborate nella pagina principale. L'interfaccia iniziale riassume i principali parametri dell'impianto al fine di verificare rapidamente le prestazioni di ogni macchina/stazione dell'impianto.

Per ciascuno di essi sono riportati i valori medi di diversi indicatori, come il tempo medio di ciclo, la quantità totale di pezzi prodotti e di pezzi buoni, il tempo medio tra due guasti (*Mean Time Between Failure*, MTBF) e il tempo medio di riparazione (*Mean Time To Repair*, MTTR), la disponibilità e l'efficacia complessiva delle apparecchiature (*Overall Equipment Effectiveness*, OEE).

I progettisti possono inoltre visualizzare informazioni dettagliate su una particolare macchina/stazione dell'impianto, visualizzando diverse pagine che riassumono numericamente e graficamente le principali prestazioni. Ad esempio:

- la pagina Guasti mostra il tipo di guasti, classificati per durata dei guasti e per percentuale complessiva di occorrenze;
- la pagina della Disponibilità, invece, mostra i principali parametri della macchina in termini di disponibilità, come il MTBF e il MTTR;
- La pagina Working Status descrive come sta lavorando la macchina e i relativi stati (es. funzionante, guasto, bloccato, da caricare...).

Inoltre, il Life Cycle Data Tool è in grado di suddividere la macchina/stazione in sottogruppi funzionali, valutando diversi indicatori di prestazione e consentendo un'analisi più dettagliata, poiché questa caratteristica permette di capire quale sottogruppo funzionale influenza le prestazioni complessive della macchina/stazione.

Il primo strumento copre la fase di Beginning of Life (la fase di progettazione), mentre il secondo si occupa della Middle of Life (la fase di utilizzo).

La fase di fine vita non viene presa in considerazione.

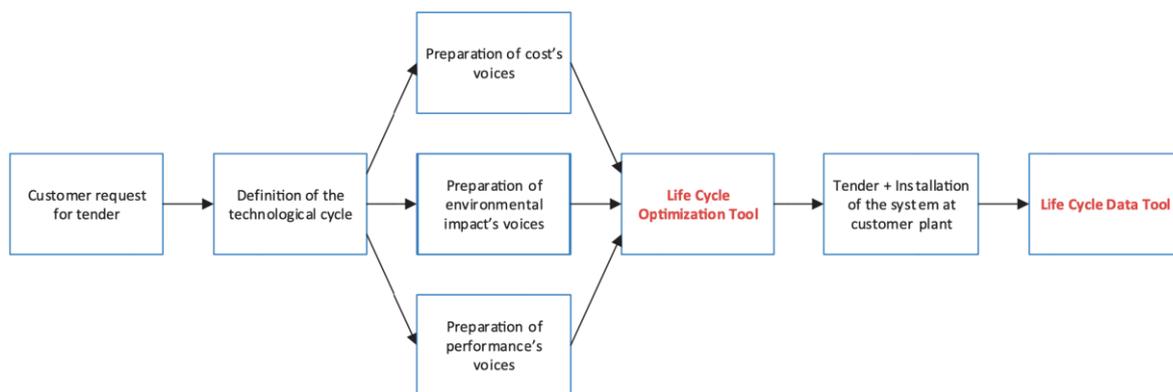


Figura 2.4: Integrazione del set di strumenti nel processo

I produttori di impianti industriali ricevono solitamente una richiesta di progetto da parte del cliente, il quale fornisce anche i requisiti tecnici dell'impianto (durata di vita, voci di costo e di impatto ambientale da considerare, prestazioni minime, ecc...).

Per inviare un'offerta, il fornitore deve prima di tutto definire la distinta di processo, al fine di soddisfare le esigenze del cliente (il/i prodotto/i che il cliente deve realizzare).

Definita la distinta di processo, il fornitore conosce quali stazioni/macchine necessita per realizzare l'impianto industriale, e le possibili alternative per ciascuna stazione, pertanto, il fornitore deve predisporre i costi, gli impatti ambientali e le voci di prestazione, combinando i propri dati con quelli forniti dal cliente. Successivamente alla fase di acquisizione dei dati, è possibile utilizzare il *Life Cycle Optimization Tool*; gli input dello strumento sono i dati calcolati in precedenza, mentre l'output è un insieme di soluzioni ottimali orientate al ciclo di vita. I progettisti del fornitore possono scegliere quale soluzione proporre al cliente e nel caso in cui la soluzione proposta sia approvata l'impianto viene realizzato e installato presso lo stabilimento del cliente. Durante la fase di utilizzo del sistema è possibile utilizzare *Life Cycle Data Tool*, che consente il monitoraggio del sistema e la raccolta dati dal campo in modo strutturato e utile.

2.2.3. Caso applicativo industriale

Il caso industriale è rappresentato da un fornitore globale italiano di sistemi di automazione industriale, principalmente per il settore manifatturiero automobilistico. L'azienda offre la propria competenza sull'integrazione di sistemi per lo sviluppo, la produzione, per assistere le fasi di avvio della produzione, le attrezzature e le attività di manutenzione completa dell'impianto.

I problemi principali che i progettisti di questa azienda devono affrontare sono due:

- 1) Creazione e identificazione della soluzione ottimale orientata al ciclo di vita da proporre al cliente in fase di progettazione: l'azienda che fornisce la migliore soluzione in termini di costo del ciclo di vita (e/o impatto ambientale del ciclo di vita), vince l'ordine.
- 2) Raccolta dei dati dal campo al fine di aumentare la conoscenza dei loro sistemi, infatti, progettisti e sistemisti non hanno una completa conoscenza o visione dei propri sistemi e del loro comportamento durante la fase di utilizzo. Consentendo la raccolta di dati utili, i progettisti sono in grado di confrontare i dati stimati in fase di progettazione con i dati reali della fase di utilizzo, individuando eventuali scostamenti.

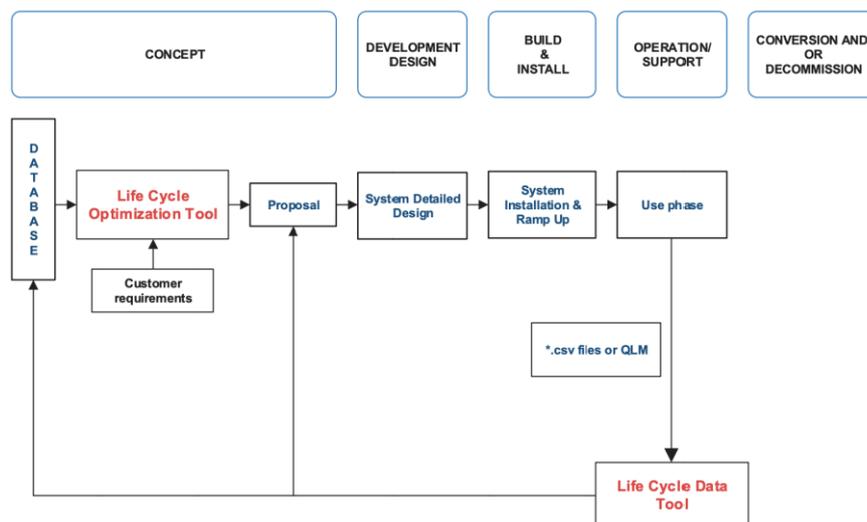


Figura 2.5: Applicazione del toolset al ciclo di vita del sistema oggetto di studio

La Fig. 2.5 mostra l'inclusione del set di strumenti proposto all'interno del ciclo di vita del sistema dell'azienda. Il Life Cycle Optimization Tool viene utilizzato per supportare i progettisti durante la fase di concept e, quindi, durante la definizione della proposta. Il Life Cycle Data Tool è invece incluso durante la fase di utilizzo, consentendo il monitoraggio e la raccolta di dati reali dal campo, migliorando la conoscenza dei progettisti dei loro sistemi. Il *Life Cycle Optimization* è stato testato su un caso industriale fornito dall'azienda, nonché una frazione di una catena di montaggio del motore. Il *Life Cycle Data*, invece, è stato testato all'interno dell'azienda, in un laboratorio che simula il comportamento di un sistema produttivo.

Per la valutazione del set di strumenti proposto è stato organizzato un evento all'interno dell'azienda, in cui al termine della presentazione, è stata effettuata una valutazione degli strumenti tramite questionario. All'evento hanno partecipato 12 persone dell'azienda, impiegati in diversi reparti (ingegneria di sistema, ICT, progettazione, produzione, standardizzazione di prodotto, innovazione e gestione dell'energia).

Il questionario valutava il toolset in maniera qualitativa: infatti, per ogni domanda, gli intervistati dovevano segnare un valore da 1 a 4, dove 1 identificava una risposta molto negativa, e 4 ne identificava una molto positiva. Il questionario era composto da 27 domande, 14 relative allo strumento Life Cycle Optimization e 13 relative allo strumento Life Cycle Data.

- Le prime sei domande per entrambi gli strumenti hanno valutato la facilità di introduzione e l'usabilità degli strumenti Life Cycle Optimization e Life Cycle Data all'interno dell'azienda e dei suoi processi.
- Le restanti domande, invece, valutavano quale tipo di valore strategico potevano portare gli strumenti.

Analizzando i risultati del questionario, per quanto riguarda il *Life Cycle Optimization*, gli intervistati hanno riconosciuto in maniera positiva le capacità di valutare sia i costi che gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita. Inoltre, gli intervistati hanno valutato positivamente la possibilità di confrontare diversi lay-out e di considerare la soddisfazione del cliente, aggiungendo vincoli tecnici all'interno dell'algoritmo. Per quanto riguarda lo strumento *Life Cycle Data*, gli intervistati considerano molto positivamente la possibilità di raccogliere dati strutturati dal campo, oltre alla possibilità di riutilizzare la conoscenza generata per il miglioramento della progettazione dei sistemi

futuri. Inoltre, è stata apprezzata la possibilità di monitorare in tempo reale l'impianto, tenendo, quindi, sotto controllo i costi generati durante la fase di utilizzo (costi di manutenzione, consumi energetici, ecc...) e mantenendo contemporaneamente la soddisfazione del cliente, attraverso efficienti ed efficaci interventi sul sistema. È importante sottolineare che i feedback ricevuti non hanno rilevanza statistica, a causa del campione troppo piccolo (solo 12 osservazioni).

Il set di strumenti è stato sviluppato per il settore dei sistemi industriali e potrebbe essere applicato a contesti produttivi simili e a problemi di progettazione simili, con alcuni adattamenti ad hoc.

Il set è stato discusso e utilizzato dagli utenti industriali, che ne hanno apprezzato i risultati e che lo utilizzano nel lavoro quotidiano. Il modello sviluppato è un prototipo stand-alone, tuttavia dovrebbe essere posizionato tra i sistemi PLM e MES (Manufacturing Execution System), con relativi vincoli di interoperabilità [7].

2.3. Geographic Information System per la valutazione LCA

2.3.1. Introduzione

Recentemente sono stati presentati alcuni studi sulle capacità generali del PLM per migliorare l'aspetto della sostenibilità, ma l'argomento non è ancora completamente risolto. Il PLM per il *Design for Sustainability* (DfS) affronta diverse sfide e una di queste è proprio la mancanza di informazioni per i decisori.

Il Life Cycle Impact Assessment (LCIA), in questo senso, guarda al destino delle sostanze e ai potenziali impatti dell'interazione tra un sistema di prodotto e l'ecosfera, gli aspetti tecnologici e ambientali non sono indipendenti e un cambiamento nel contesto ambientale richiede implicitamente un adeguamento nella tecnologia utilizzata. Poiché le caratteristiche e lo stato ambientale delle ecosfere differiscono a livello territoriale, le caratteristiche progettuali e le specifiche tecnologiche devono essere modificate e adottate sulla base di queste differenze, ma non si riesce a capire a priori come queste caratteristiche cambierebbero realmente le scelte progettuali. L'implementazione di questo approccio nella progettazione di prodotti e sistemi richiederà informazioni geospaziali sulla/e relativa/e ecosfera/e.

L'obiettivo è quello di rispondere a questo problema modellando il legame tra territorio e PLM/LCA utilizzando un framework GIS (Geographic Information System) /PLM/LCA. In primo luogo, si propone un nuovo modello di dati relativi al prodotto costituito da dati ambientali (come LCI) e dati geografici sullo stato ambientale del territorio.

Al giorno d'oggi, lo sviluppo sostenibile diventa sempre più complesso e richiede un'alta intensità di conoscenze, necessitando di ulteriori supporti e assistenza, soprattutto nelle prime fasi di progettazione. L'uso intelligente dei database digitali esistenti come il PLM potrebbe aiutare a risolvere questi problemi. Per avere successo nella missione di supporto al PLM, le applicazioni necessitano di modelli di dati affidabili, completi ed efficienti per poter filtrare, strutturare, integrare, controllare e incanalare i flussi di informazioni.

Nel 2002 "Fenves" ha proposto un modello di prodotto chiamato *Critical Path Method* (CPM) per supportare l'intera gamma di gestione del ciclo di vita del prodotto. "Gujarat" ha sviluppato un modello di dati comune (*clean development mechanism*, CDM) contenente tutte le informazioni

parametriche richieste sia per la modellazione CAD che per l'analisi CAE per l'integrazione parametrica CAD/CAE.

Sebbene CPM e CDM siano utilizzati per estrarre e modellare informazioni applicate nei sistemi tecnologici, nessuno di essi è in grado di creare una lista di dati che possa essere utilizzata per la progettazione sostenibile, soprattutto dal punto di vista ambientale. L'LCA è stato sviluppato per supportare DfS, ma sembra difficile applicarlo nelle prime fasi della progettazione, poiché la maggior parte degli strumenti esistenti basati sull'LCA non si concentrano sul design, ma sono impostati per una gestione strategica o un'analisi retrospettiva dei prodotti esistenti. Una vera LCA può essere utilizzata correttamente solo per un prodotto completamente definito in cui i dati sul ciclo di vita sono disponibili e accurati. La regionalizzazione viene utilizzata come soluzione per migliorare l'accuratezza dei risultati della valutazione del ciclo di vita e per renderla attingibile per i decisori. Si è registrato un numero crescente di ricerche LCA regionalizzate, e in particolare sono stati sviluppati molti modelli LCA regionalizzati abbinati al *Geographic Information System* (GIS) per i prodotti agricoli. Tuttavia, non è stata prestata abbastanza attenzione ai prodotti industriali, in termini di LCI, lo studio della relativa posizione geografica e lo stato degli impatti ambientali prima e dopo la progettazione proposta per ogni fase del ciclo di vita. Il GIS è stato utilizzato da diversi interpreti per integrare la differenziazione spaziale nell'LCA, non solo per il calcolo dei fattori di caratterizzazione regionalizzati, ma anche per creare "*site-specific inventories*".

Il GIS, accedendo a diverse fonti di informazione (risorse biologiche, fonti di inquinamento e aree colpite, copertura e uso del suolo, disponibilità e qualità dell'acqua e fonti e uso di energia), consente l'utilizzo di un insieme di semplici operazioni come sovrapposizione, classificazione, interpolazione e aggregazione di informazioni spaziali che potrebbero generare informazioni utili per i decisori a supporto del DfS.

2.3.2. Modello proposto

Il modello concettuale proposto contiene tre sottomodelli di dati:

- Product (P)
- Environment impact (E)
- Geography (G)

"Artifact" è la classe principale della categoria (P), mostrata in grigio, questa classe ha relazioni con la categoria (E) tramite le classi LifecycleProcess e SubstanceFlow.

La classe SubstanceFlow, mostrata in rosso, è la classe principale della categoria (E) e rappresenta un collegamento tra le classi Artifact e GeographicRegion.

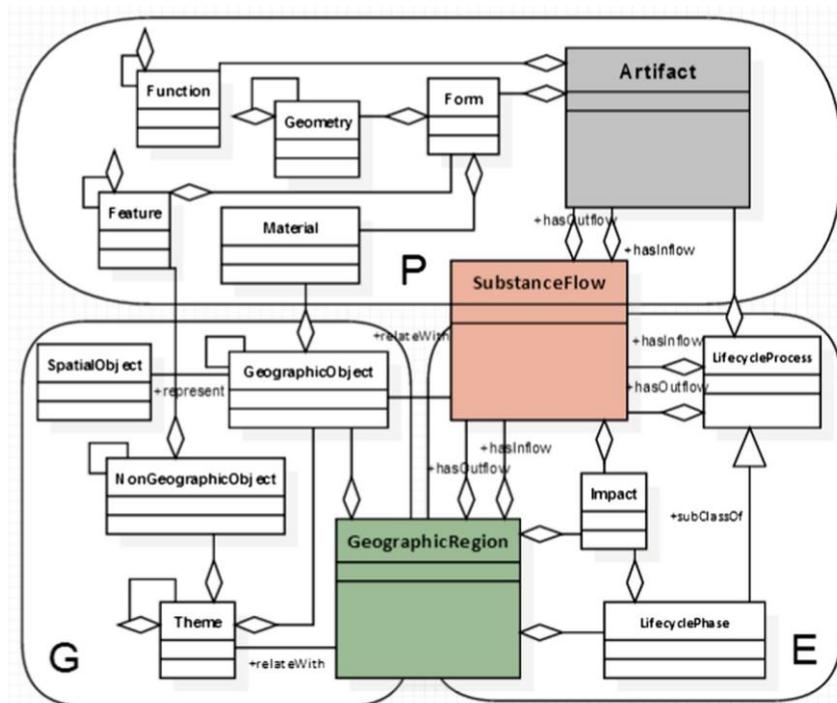


Figura 2.6: Struttura modello PEG

- 1) *Product Data Model (P)*: molti ricercatori hanno basato i loro lavori sul modello di prodotto principale (CPM) del NIST (*National Institute of Standards and Technology*) perché è un modello di prodotto di livello base, ossia risulta generico, semplice, di dominio pubblico, estensibile e indipendente da qualsiasi sviluppo di prodotto specifico. Inoltre, il CPM in grado di catturare il contesto ingegneristico comunemente condiviso nelle attività di sviluppo del prodotto, questo lo rende in grado di supportare l'intera gamma di PLM. La categoria (P) è quindi basata sulla combinazione dei vantaggi del CPM con l'obiettivo di progettare un

prodotto fabbricato: le classi Form, Geometry, Function, Material, Feature e Artifact sono selezionate per il loro stretto collegamento con le caratteristiche geografiche e ambientali.

- 2) *Environmental Impact Data Model (E)*: Nel 2015 “Yingzhong” ha proposto un modello concettuale semantico orientato all’LCA per il ciclo di vita del prodotto dividendo lo spazio ambientale del prodotto in tecnosfera ed
- 3) ecosfera. La parte (E) del nostro modello si basa su una versione modificata del modello di Yingzhong concentrandosi soprattutto sulla panoramica del ciclo di vita. Sono definite tre classi di primo livello:
 - Product_Lifecycle
 - Lifecycle_Process
 - Substance_flow → la quale a sua volta viene ripartita in altre tre sottoclassi:
 - Elementary_Flows
 - Product_Flows
 - Waste_Flows

I flussi elementari come base per il calcolo degli impatti ambientali del ciclo di vita di un prodotto possono essere classificati in due ulteriori sottoclassi, una relativa alle risorse e l’altra che riguarda le emissioni.

- 4) *Geography Data Model (G)*: La modellazione dei database geografici è stata eseguita attraverso diversi modelli come GeoOOA, Geo-ER, Geo-OMT, MADS e GeoFrame. Dai modelli di dati citati, GeoFrame è selezionato come (G) per la sua capacità di includere l’analisi dei modelli, che facilita l’utilizzo dei dati geografici per i progettisti con poca conoscenza dei metodi di sviluppo software. In questo quadro ci sono tre classi principali:
 - Geographic_Region
 - Theme
 - Nongeographic_Object

Il Theme viene definito durante la progettazione concettuale, la quale può portare all’implementazione di più livelli. La classe Geographic_Object è una generalizzazione per tutte le classi del dominio che vengono percepite nella panoramica dell’oggetto, in cui gli attributi definiti sono mappati come campo di una tabella razionale. La Geographic_Region Class può essere definita da caratteristiche fisiche, caratteristiche umane e caratteristiche funzionali.

2.3.3. Caso di studio

Il caso di studio proposto riguarda una torcia, la quale è formata da due componenti principali: corpo e testa.

Utilizzando le informazioni della distinta base, la pianificazione del processo di produzione del prodotto, combinando le informazioni specifiche dei materiali utilizzati per realizzare le parti e le informazioni sul processo dell'unità di produzione, è possibile ottenere un albero del processo.

A causa di alcune limitazioni, il ciclo di vita è limitato ai processi di produzione e fine vita (*End Of Life*, EOL) del guscio di plastica.

La fase di fabbricazione del guscio di plastica consiste in processi unitari di produzione (*gate to gate*), che convertono il materiale in polipropilene mediante un processo di iniezione e l'EOL consiste nel processo di raccolta e riciclaggio di plastica e anche parti elettriche (batteria e lampada).

Per lo studio LCA di questo caso, L'SO₂ è l'unica emissione studiata e inclusa come dato nel GIS.

I dati di flusso elementari, come parte del flusso di sostanze relative alla produzione e all'EOL vengono raccolti e utilizzati per la creazione delle istanze relative al flusso.

I dati LCI sulla quantità di emissioni di SO₂ per i processi di produzione sono ottenuti da un software open source "*OpenLCA*" e da una banca dati ELCD (*European Platform on Life Cycle Assessment*).

Ad esempio, il processo di iniezione consuma elettricità, per cui il consumo di energia può essere definito come flusso di riferimento e l'input nel database LCI per ottenere l'impatto ambientale di tutti i processi a monte della produzione di energia elettrica.

Viene illustrata una rappresentazione per la parte del modello di dati menzionata per contrassegnare le istanze di processo, le istanze di flusso e le istanze di regioni geografiche.

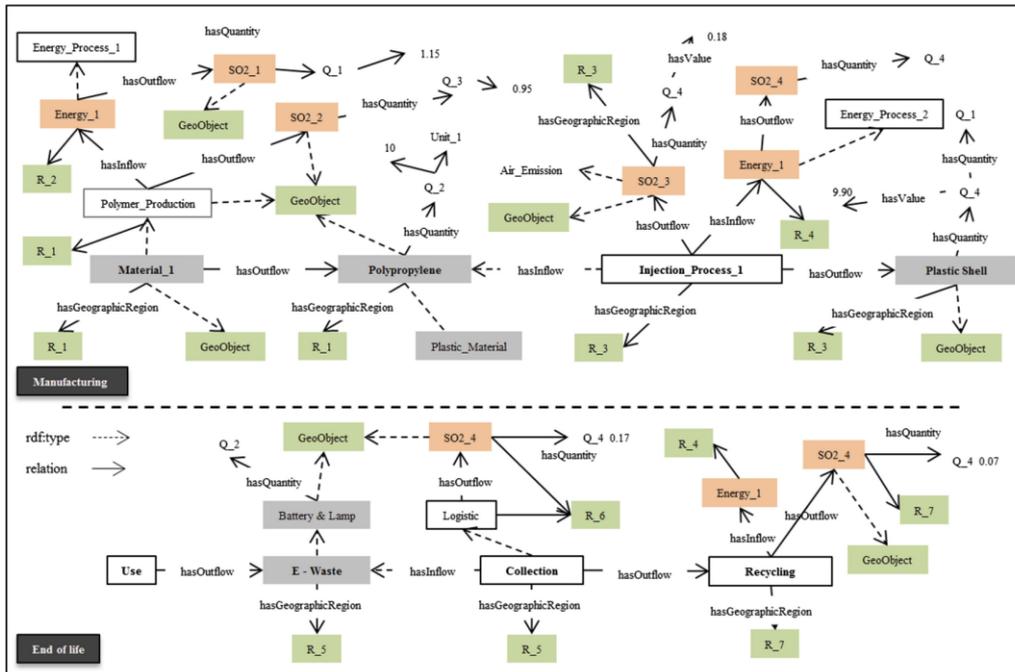


Figura 2.7: Rappresentazione grafica delle istanze

Ad esempio, il primo nodo è un materiale in polipropilene, risultato della "Produzione_polimeri" mostrata come classe "Materiale_1". La posizione geografica di produzione del polimero è in Champagne Ardenne, indicata come classe "R_1".

La produzione di polimeri necessita di energia elettrica (classe "Energt_1") prodotta in un'altra posizione geografica della stessa regione ("classe R_2"). "Injection_process_1" fa parte del processo di produzione e "SO2_3" è un'istanza della classe Air_Emission e il suo nome della sostanza è SO2, che è un'istanza di "GeoObject" entra nella regione geografica inserita R_3.

Il primo approccio riguarda gli individui che consegnano i rifiuti elettronici ai punti di raccolta all'interno delle città (il quale viene selezionato come processo EOL per questo caso di studio), il secondo invece coinvolge produttori o individui che utilizzano centri di recupero fuori città. Le batterie e le lampade ("classe E-waste") sono il risultato del deflusso dalla fase di utilizzo che ha un afflusso verso punti di raccolta (R_5). Dopo la raccolta, c'è un processo logistico per consegnare i rifiuti ai centri di riciclaggio (R_7).

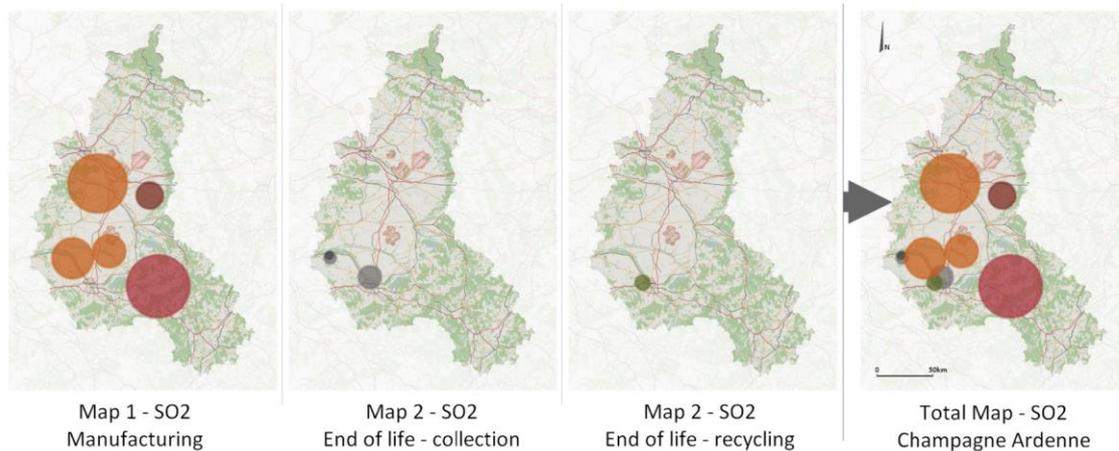


Figura 2.8: Emissione di SO2 nelle differenti località

La Figura 2.8 presenta l'emissione di SO2 per diverse località geografiche come livelli di dati per il GIS.

Map1, Map2 e Map3 sono mappe divise in base all'impatto di ciascuna attività e la Total Map rappresenta l'emissione di SO2 del processo di produzione totale.

Considerando i molteplici formati esistenti per descrivere le informazioni ambientali e geospaziali, ci sono molti modi per combinare i dati. Tuttavia, non esiste ancora un formato che consenta di archiviare nello stesso file i dati di LCA e quelli di GIS. Per creare le mappe, è stato scelto un database "PostgreSQL" per memorizzare i dati e renderli disponibili con lo stesso sistema di richieste di linguaggio (SQL). La struttura PostgreSQL ha permesso di collegare i dati LCA con le informazioni geospaziali: coordinate e oggetti geometrici (punti in questo caso ma potrebbe anche ammettere linee e poligoni). Il modello di dati risultante, abbinato alla libreria JavaScript "OpenLayers", ha consentito la visualizzazione dei risultati LCA su una mappa di base del modulo (MapQuest).

L'analisi dei risultati sopra menzionati mostrano che il modello proposto e la sua rappresentazione per il relativo caso di studio possono rappresentare le interazioni tra il prodotto e il territorio in cui esso è collocato, allo stesso tempo gli impatti vengono quantizzati sull'ambiente e sui consumi delle risorse all'interno del ciclo di vita di un prodotto. Le istanze di flusso possono essere determinate e presentate come caratteristiche geografiche specifiche dai diversi livelli di dati GIS.

L'accesso ai livelli GIS può aiutare i progettisti di prodotto ad analizzare gli impatti ambientali prima e dopo la progettazione, in maniera tale da poter modificare le caratteristiche di progettazione e le specifiche di prodotto in base allo stato ambientale di ciascun territorio.

Utilizzando il modello proposto, sarà possibile includere caratteristiche geografiche per la valutazione dell'impatto ambientale e fornirle ai progettisti aiutandoli a identificare quali caratteristiche e specifiche del prodotto sono fonte impatto, al fine di portare ad una migliore progettazione per soluzioni di sostenibilità.

Questo approccio può risolvere il problema dell'LCA, la quale risulta non è applicabile nelle prime fasi di progettazione. Utilizzando diversi livelli di dati geografici, questo modello può fornire preziose informazioni per i decisori: ad esempio, nel caso di studio presentato, l'emissione di SO₂ è definita come uno strato di dati illustrato su una mappa, che potrebbe essere combinato e confrontato con altri dati per prevedere cambiamenti futuri [8].

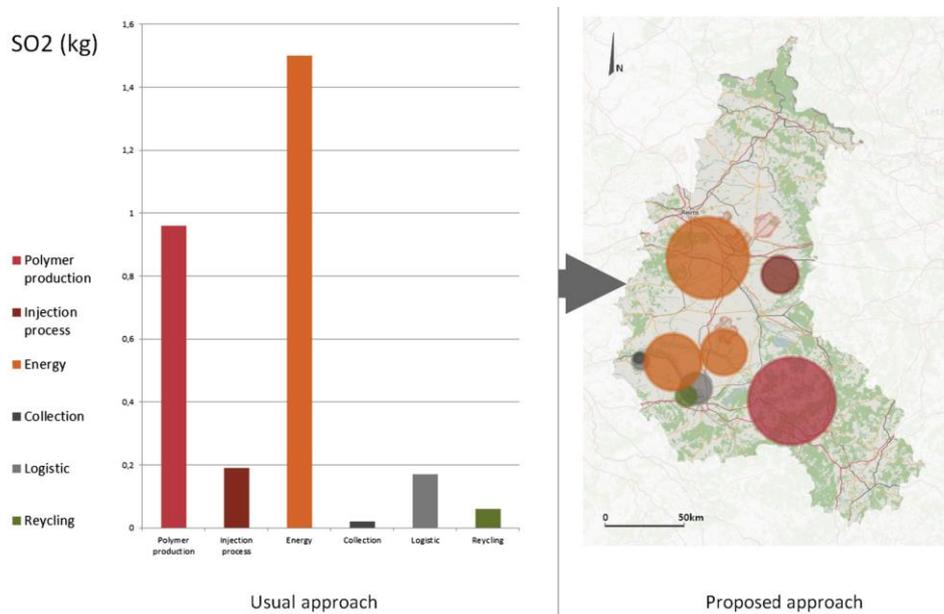


Figura 2.9: Differenze grafiche tra un approccio classico e l'approccio proposto

2.4. Approccio integrato di progettazione sostenibile

2.4.1. Introduzione

La progettazione ingegneristica ha da sempre posto la sua attenzione verso la realizzazione di prodotti superiori dal punto di vista tecnico ed economico, nonostante l'esigenza comune di uno sviluppo sostenibile. Uno dei fattori chiave per la sostenibilità è la legislazione, poiché ci sono stati vari requisiti legislativi e politiche di prodotto per incoraggiare la produzione in questo senso, come ad esempio le direttive UE: per prevenire la produzione di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (*Rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, RAEE*), oppure imponendo restrizioni sull'uso di determinate sostanze pericolose nella costruzione di vari tipi di apparecchiature elettroniche (*Restriction of Hazardous Substances, RoHS*), la strategia di sviluppo sostenibile del Regno Unito e di Singapore attraverso il Piano Verde del 2012.

Per cui eventuali produttori, che fabbricano/assemblano prodotti concordi con quanto detto sopra, devono rispettare questi requisiti legislativi. Questo ha imposto importanti sfide tecniche sulla progettazione, sfortunatamente molti produttori locali in generale non hanno una consapevolezza sufficiente per valutare l'effetto di tutto ciò sulla domanda dei loro prodotti.

L'obiettivo principale è quello di sfruttare il potenziale di produzione locale per una crescita sostenibile fornendo informazioni a designer ed ingegneri attraverso tecnologie integrate e strumenti di supporto alla progettazione sostenibile.

Il focus è sullo sviluppo di un approccio integrato di progettazione sostenibile, volto a migliorare le performance di sostenibilità del prodotto nel controllo dei costi del ciclo di vita, della riduzione dell'impatto ambientale e della conformità gestionale alle normative.

2.4.2. Descrizione del metodo

Applicando i concetti e le tecnologie di sostenibilità sopra citate per il processo NPD a dei prodotti elettronici di consumo, è stato sviluppato un approccio integrato di progettazione sostenibile.

L'approccio sviluppato fornisce:

- metriche di valutazione per criteri ambientali
- modelli e metodi di modellazione LCC
- database contenenti dati relativi all'inventario del ciclo di vita
- metodo di integrazione NPD sostenibile implementato negli strumenti di supporto alla progettazione, al fine di aiutare i progettisti e gli ingegneri a bilanciare e migliorare la sostenibilità del ciclo di vita, evidenziando caratteristiche tecniche, di redditività economica e relative agli impatti ambientali all'inizio delle fasi di sviluppo del concept di prodotto

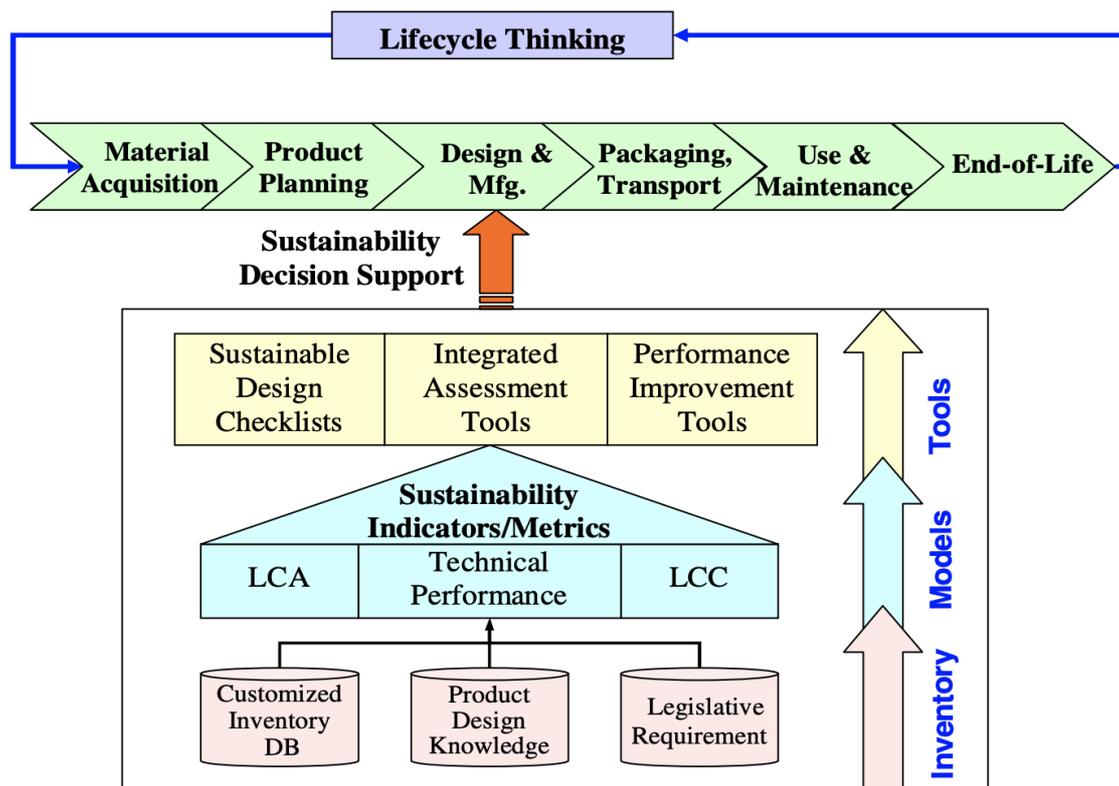


Figura 2.10: Design dell'approccio sostenibile

le principali fasi del ciclo di vita da studiare comprendono l'acquisizione dei materiali, la fabbricazione del prodotto, il trasporto, l'utilizzo e l'EoL.

Come discusso in precedenza, l'LCA è il metodo più comunemente usato per identificare i potenziali impatti ambientali e attribuirli direttamente alla sostenibilità di un prodotto durante tutto il suo ciclo di vita. In questo studio andremo ad utilizzare l'EDIP, sviluppato in Danimarca all'interno del più ampio progetto nel 1991, con l'obiettivo di sviluppare una metodologia che permettesse di considerare gli aspetti ambientali nello sviluppo dei prodotti industriali.

Il sistema contiene un insieme di indicatori di prestazione ambientale, ossia un attributo quantificabile di un prodotto, che caratterizza i potenziali contributi del prodotto agli impatti ambientali.

Tabella 1.1: Indicatori di performance ambientale

Lifecycle Stage	Environmental Attribute	Performance Indicator
Material Acquisition	Resource	Reduction in natural stocks of scarce resources.
	Energy Waste	Energy used in material acquisition. Waste generated during material acquisition.
Product Manufacturing	Mass	Mass of materials consumed per unit of product.
	Energy Waste	Energy used during production. Industrial waste generated during production;
	Hazardous material	Ration of waste to product output. Toxic or hazardous material used in production.
Transport	Mass Distance	Product mass transported. Transport distance.
Use	Energy	Energy consumed during operation (for electrical products).
	Maintenance	Useful operating life.
EoL	Reuse	Percentage of product re-used; Percentage of renewable energy.
	Recycling	Percentage of material recycled; Product disassembly time.
	Waste	Total waste landfilling.

La tabella 1.1 mostra gli attributi significativi individuati per ogni fase del ciclo di vita. Le metriche prestazionali sono spesso specifiche dell'azienda o del prodotto in sé, nel suddetto approccio, entrambi i metodi: qualitativo (basato sull'osservazione ponderata e giudizio) e quantitativo (basato su dati empirici) sono utilizzati per lo sviluppo delle prestazioni metriche dell'ambiente.

Gli indicatori ambientali presenti nella tabella sono organizzati in quattro categorie:

1. *Metrica generica delle risorse*: utilizzando il metodo EDIP, viene definita una metrica di risorsa M per quantificare la risorsa totale da prelevare presso risorse naturali scarse da impiegare nei materiali di un dato prodotto. È descritta tramite:

Equazione 2.1

$$M(resource) = \sum_i [R_i / \check{R}_i(t)|_{t=t1}]$$

Ove R_i è il consumo di risorse del materiale i -esimo utilizzato in un prodotto ed $\check{R}_i(t)$ rappresentano le riserve globali note per persona, in riferimento al materiale i -esimo, in un dato tempo di riferimento $t = t1$.

2. *Metrica generica dell'energia*: allo stesso modo, una metrica energetica quantitativa è definita come un'aggregazione dell'energia consumata all'interno del ciclo di vita, compresa quella utilizzata durante le fasi di acquisizione dei materiali, produzione, trasporto, utilizzo ed EoL.

Tuttavia, il consumo di energia durante la fase di utilizzo dipende da scenari di utilizzo e carico predefiniti, specifici per ogni prodotto elettronico.

Dal momento che è possibile utilizzare vari tipi di energia in ogni fase del ciclo di vita (elettrica, gas naturale, olio combustibile...), definiamo l'energia primaria, misurata in MJ (Mega Joule), che verrà utilizzata come equivalenza per tutti i tipi di energia. La metrica energetica ($M(\text{energy})$) è descritta tramite:

Equazione 2.2

$$M(energy) = \sum_i \sum_j f_j (E_{ij})$$

Ove E_{ij} è il consumo di energia di tipo j durante l' i -esima fase del ciclo di vita, calcolata secondo dati di LCI o attraverso banche che fanno riferimento ai processi e ai flussi di energia, mentre f è la funzione che converte le unità di energia di tipo j in energia primaria.

3. *Metrica integrata di prestazione ambientale*: integra le influenze di attributi ambientali sulle prestazioni del prodotto, comprese le prestazioni di conformità RoHS. Sotto ogni attributo, sono identificati sotto-fattori per illustrare misure e valutazioni più dettagliate delle prestazioni (es. l'attributo "sostanza pericolosa" contiene il sottofattore "effetto

sulla salute”, “effetto ambientale”, “numero di sostanze indesiderate” ...) La formula che identifica la metrica di prestazione ambientale (M(performance)), è:

Equazione 2.3

$$M(\text{performance}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n w_i r_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_i \text{Max}(r_{ij})}$$

Ove (in $i=1,2,\dots,m$) m indica il numero di attributi ambientali considerati nella metrica ed (in $j=1,2,\dots,n$) n denota il numero di sottofattori rispetto ad un attributo ambientale.

r_{ij} è la valutazione del sottofattore j -esimo sotto l' i -esimo attributo ambientale, mentre w_i è il peso al livello di importanza dell' i -esimo attributo.

$\text{Max}(r_{ij})$ rappresenta la valutazione completa del sottofattore j -esimo sotto l'attributo ambientale i -esimo.

4. *Metriche EoL*: Per valutare le prestazioni EoL di un prodotto, in particolare per valutare i livelli di conformità RAEE, vengono sviluppate metriche EoL, che includono:

- Percentuale di materiali recuperati
- Percentuale di risorse recuperate
- Contenuto riciclato in base al peso
- valore di EoL
- Tempo per lo smontaggio

Oltre a queste metriche di valutazione ambientale vengono modellate anche le metriche relative al costo del ciclo di vita.

2.4.3. Modellazione dell'LCC

L'LCC viene utilizzato per valutare il costo totale di acquisizione, proprietà e trattamento EoL di un prodotto. Il processo di modellazione LCC in questo caso prevede diversi passaggi:

Il primo passo è la scomposizione dell'LCC in *Constituent cost Elements* (CE). Ci sono vari approcci per identificare e abbattere i CE richiesti, in questo studio viene utilizzato un approccio multidimensionale attraverso una matrice per la ripartizione dei costi. La dimensione della matrice CE è configurabile, a seconda dello scopo e della portata dello studio LCC. Ad esempio, per stimare il costo totale del ciclo di vita di un prodotto, le dimensioni della matrice CE possono essere configurate in maniera tale da rappresentare le fasi del ciclo di vita del prodotto, le strutture di scomposizione del prodotto (sottosistema, assieme, sottoassieme, parte), le categorie di costo (materiale, energia, manodopera...).

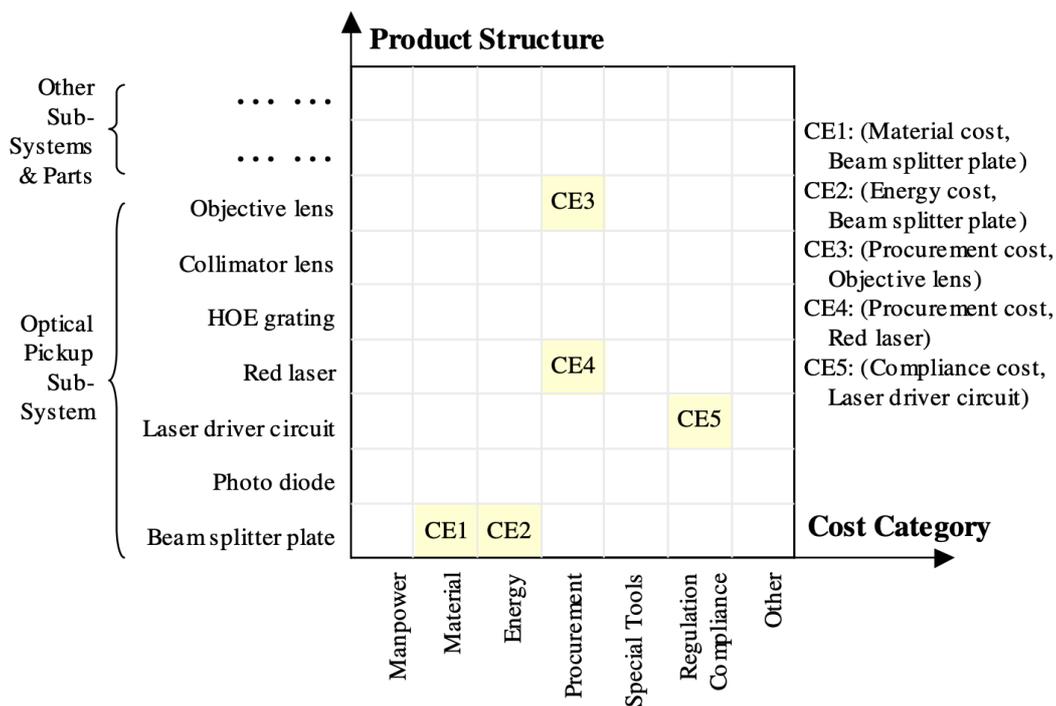


Figura 2.11: Matrice di ripartizione dei costi per la produzione di un lettore DVD

La Fig. 2 mostra una struttura di ripartizione dei costi per la produzione di un lettore DVD, oggetto di studio.

È una matrice bidimensionale con una dimensione che rappresenta la struttura del prodotto e l'altra la categoria di costo. Le CE identificate (celle della matrice) con un impatto maggiore sull'LCC vengono selezionate per ulteriori modellazioni della funzione di costo.

Il passo successivo è modellare ogni costo in funzione della stima per ogni principale CE individuato. Per costruire la funzione di stima dei costi vengono utilizzati principi matematici, ad esempio, le informazioni presenti nella

Tabella 1.1 consentono di formalizzare la relazione tra i costi di alcuni CE e le corrispondenti variabili di costo.

L'ultimo passaggio del processo LCC è riassumere tutti i costi in delle funzioni per formare un modello di costo del ciclo di vita, tuttavia, poiché l'analisi LCC considera i costi che verranno sostenuti in futuro, è necessario prendere in considerazione vari fattori economici (valore attuale netto, tassazione, inflazione...) nel modello LCC.

Gli strumenti software sono necessari agli algoritmi per calcolare il costo totale del ciclo di vita, che nel caso del ciclo di vita del lettore DVD risulta essere:

Equazione 2.4: Espressione della funzione di costo per il ciclo di vita del lettore DVD

$$LCC = \sum_{i=1}^m g_i \left(\sum_{j=1}^n f_{ij}(X_{ij}) \right)$$

Ove X_{ij} è un array di variabili di costo per l'elemento di costo j durante la fase

i -esima del ciclo di vita, f è la funzione che stima i costi di X ed n rappresenta il numero totale di elementi di costo individuati;

g_i è la funzione relativa al fattore economico per la fase i -esima del ciclo di vita del prodotto ed m denota il numero delle fasi del ciclo di vita.

Per una facile implementazione della matrice CE e dell'Equazione 2.4 attraverso strumenti software di calcolo, è stato definito un insieme di modelli di ripartizione dei costi per l'elettronica di consumo, al fine di appiattare la struttura della matrice CE lungo le diverse dimensioni, in modo che tutti gli elementi di costo del ciclo di vita possano essere sistematicamente individuati e calcolati.

2.4.4. Integrazione ed implementazione del software

Il metodo di integrazione di Sostenibilità-NPD si basa sull'integrazione attraverso la condivisione dei dati.

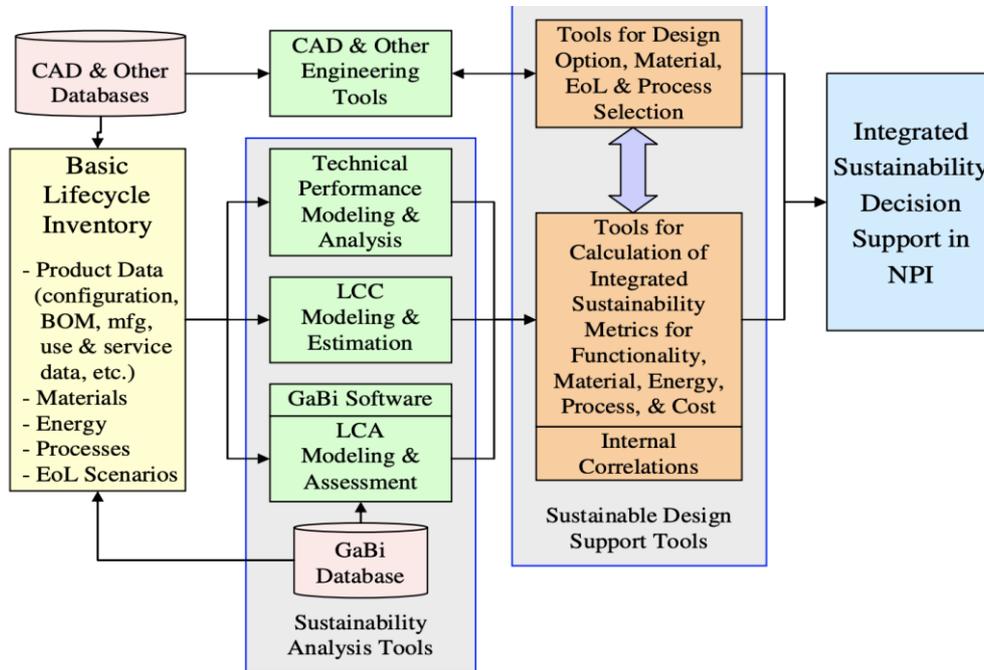


Figura 2.12: Struttura del software

La struttura mostrata in Figura 2.12 mostra come gli strumenti analitici LCA e LCC condividano la configurazione del prodotto, la distinta base, il processo di fabbricazione, l'utilizzo e i dati di manutenzione generati da altri progetti o applicazioni ingegneristiche lungo tutto il ciclo di vita del prodotto. In altre parole, i metodi e gli strumenti per la sostenibilità del ciclo di vita devono essere integrati nel normale sviluppo NPD al fine di consentire la condivisione dei dati. I dati dell'inventario del ciclo di vita per LCA e LCC sono considerevoli, tuttavia, nelle prime fasi dell'NPD dove si trovano le caratteristiche più significative del ciclo di vita determinato (come la pianificazione e il concept del prodotto), pochissimi dati di prodotto sono disponibili per la condivisione con LCA/LCC. Quindi è importante per la sostenibilità-NPD stabilire un modello di integrazione coerente con parallelismi tra requisiti di progettazione sostenibile e specifiche attività NPD (strumenti, banche dati utilizzati, set di dati utilizzati...).

Nell'approccio proposto, queste correlazioni sono catturate in uno schema di eco-design ove si definisce:

- quali dati sono estraibili da quali strumenti o database
- che cosa i modelli possono calcolare all'interno di una specifica fase del processo
- quali valori di default dovrebbero essere usati per istanziare un modello di performance

Alcune di queste correlazioni sopra sono state incorporate in un software di implementazione per interfacciare i flussi di dati durante la condivisione di dati CAD con applicazioni LCA/LCC.

La modellazione, l'analisi e il miglioramento dell'eco-design e delle performance ambientali sono fondamentali per lo sviluppo sostenibile di un prodotto.

Per questo motivo è stato sviluppato un approccio integrato per un design sostenibile da applicare durante il ciclo di vita di un prodotto.

Le analisi LCA/LCC ed eco-design hanno svolto un ruolo di supporto durante il calcolo e il confronto di risorse, energia, e altre prestazioni ambientali. L'approccio potrebbe essere implementato all'interno di un software come supporto alla progettazione ecocompatibile di alcuni casi studio, per testare i metodi e modelli stabiliti [9].

2.5. Sostenibilità sociale nel processo di realizzazione del prodotto

L'importanza della dimensione sociale è un aspetto del tutto nuovo, infatti, solo negli ultimi dieci anni sono state attribuite considerazioni più dettagliate, sotto forma di linee guida e quadri generali, come le *UNEP-SETAC Guidelines* e il *Social Life Cycle Assessment (S-LCA)*. Ci sono anche tentativi in corso per integrare la sostenibilità sociale con le dimensioni ambientali ed economiche, la sostenibilità sociale è ancora in una fase esplorativa, poiché in primis avrebbe bisogno del contributo di più ricercatori, ma soprattutto vi è la necessità di basi teoriche forti, in maniera tale da poter garantire una metodologia più rigorosa, un migliore consenso sugli indicatori e garantire che i contributi emergenti non comportino una frammentazione nel settore. Da precedenti ricerche sulla sostenibilità ambientale, è stato osservato che i fattori umani (come la consapevolezza situazionale) influenzano la consapevolezza al consumo di energia, e il lavoro tecnologicamente supportato sembra introdurre un ulteriore livello di complessità a questo problema.

La domanda di ricerca principale trattata è come si possa valutare criticamente e provare a migliorare la dimensione della sostenibilità sociale in relazione alla qualità delle abilità lavorative nel processo di realizzazione di un generico prodotto, in particolare guardando a sottodimensioni come:

- l'autonomia nella realizzazione del compito
- il miglioramento/menomazione delle competenze
- la consapevolezza della situazione in cui un dato operatore è collocato

Questo aspetto è affrontato nel contesto dell'altra necessità nel campo di fondamenti teorici, ricerca rigorosa metodologia e contributo ad un corpo unico di conoscenze. Sono stati proposti standard e linee guida internazionali relativi alla sostenibilità sociale.

Gli indicatori di sostenibilità sociale individuati sul campo provengono da una serie di contributi sul Social Life Cycle Assessment o Social Impact Assessment, SIA.

I contributi come la linea guida UNEP-SETAC, già menzionata, identificano indicatori come:

- diritti umani
- condizioni di lavoro
- salute e sicurezza
- patrimonio culturale
- ricadute socio-economiche

La sfida è come quantificare questi ultimi e come aggregare i diversi valori in modo che possano essere applicati in modo coerente.

Un terzo problema è l'interpretazione della sostenibilità in maniera tale da garantire una relazione semplificata e immediata tra i vari piani della progettazione di prodotti. L'indicatore considerato in questa analisi è quello maggiormente individuato dal termine *Quality of WorkLife* (QWL) e corrisponde alla categoria "condizioni di lavoro" dell'UNEP-SETAC; da un punto di vista ingegneristico, sottocategorie di QWL come autonomia di lavoro/attività, discrezionalità di attività/lavoro e la consapevolezza situazionale (denominate "*Quality of skills*", QoS) rappresentano buoni indicatori per classificare la qualità del lavoro.

In un processo di realizzazione del prodotto supportato dalla tecnologia, le sottocategorie di QWL sopra menzionate si riferiscono al grado con cui i tecnici riescono ad organizzare i processi di lavoro e le modalità con cui realizzarli

(es. decidere le condizioni di taglio come profondità di taglio, larghezza di taglio...). La consapevolezza situazionale si riferisce invece al grado con cui il praticante conosce i diversi stati dei processi e delle tecnologie impiegate [10].

2.6. L'obsolescenza degli apparecchi elettronici da parte della società

2.6.1. Introduzione

L'importanza della dimensione sociale non viene riscontrata solo internamente all'azienda, ma in maniera più significativa è la parte esterna che influisce maggiormente al livello di impatti ambientali. I consumatori nello specifico smettono di utilizzare prodotti elettronici soprattutto per due ragioni principali: l'obsolescenza tecnica e quella funzionale.

L'obsolescenza funzionale si verifica se il costo per la riparazione di un prodotto è superiore al costo di sostituzione del prodotto stesso, i consumatori per cui possono decidere di sostituire il prodotto, nonostante la loro volontà di ripararlo, tuttavia, anche un numero significativo di dispositivi correttamente funzionanti viene scartato e sostituito annualmente poichè i proprietari percepiscono i prodotti come tecnicamente obsoleti (non al passo con il progresso tecnologico). Di conseguenza, in entrambi gli scenari si vengono a creare enormi flussi di prodotti verso il fine vita (EoL), tutto ciò si traduce in un significativo carico ambientale da smaltire, con conseguenti problemi di inquinamento globale.

Indipendentemente dalle ragioni, l'onere ambientale è un problema nelle cosiddette "*società usa e getta*" dove i prodotti sono di breve durata a causa del consumo crescente. Pertanto, sarebbe utile se tutti i fattori relativi al comportamento del consumatore e le caratteristiche del design appartenenti al prodotto fossero considerate allo stesso tempo per studiare gli impatti ambientali associati.

La durata della maggior parte dell'elettronica di consumo si sta accorciando (ad esempio, la vita media dei cellulari era di circa 17,3 mesi nel 2015 rispetto ai 18,4 mesi del 2002). Sebbene non siano disponibili dati precisi sullo stato di funzionalità di prodotti indesiderati, si stima che molti di essi siano ancora funzionali o necessitino di piccole riparazioni, l'obiettivo è quello di fornire un quadro analitico per studiare gli impatti ambientali associati al ciclo di vita di un dispositivo combinando la propensione dei consumatori alla riparazione con il processo di deterioramento conosciuto a priori. Per comprendere ulteriormente il collegamento tra il design del prodotto e il comportamento dei consumatori, è utile porsi alcuni interrogativi; considerando che i consumatori possono allocare budget limitato per le attività di riparazione e che nel modello proposto i consumatori possono continuare ad utilizzare un dispositivo fino a quando non percepiscono che non sia conveniente ripararlo o è sufficientemente obsoleto da un punto di vista tecnico:

Di quanto sarebbe la vita media di un prodotto con caratteristiche progettuali specifiche?

- Quale sarebbe l'impatto dell'obsolescenza tecnologica percepita dai consumatori sulla durata di vita del prodotto?
- Quali sono gli impatti ambientali previsti lungo il ciclo di vita di un prodotto?

Per rispondere a queste domande vengono presi in considerazione tre fattori principali:

- 1) le aspettative dei consumatori sul costo totale di riparazione, in relazione al prezzo iniziale di un prodotto prima di sostituirlo, ossia il rapporto cumulativo dei costi di riparazione (Cumulative Repair Cost Ratio, CRCR)
- 2) la percezione di obsolescenza tecnica del dispositivo
- 3) il tempo di guasto per ogni singolo componente

Questi non sono gli unici fattori che influenzano i consumatori verso la riparazione, tuttavia la maggior parte di questi sono specifici e quindi difficili da prendere in considerazione all'interno di un'indagine oggettiva. Pertanto, sono stati considerati solo i tre fattori sopra menzionati al fine di implementare una simulazione Monte Carlo volta ad ottenere gli input necessari per l'analisi di impatto ambientale. Il quadro analitico proposto può aiutare i progettisti a selezionare il miglior insieme di caratteristiche tecniche che riducono al minimo il previsto impatto ambientale sull'intero ciclo di vita del prodotto consentendo loro di considerare il comportamento post-acquisto dei consumatori già nel processo di progettazione.

2.6.2. Descrizione del modello

Viene presentato uno scenario in cui il dispositivo è costituito da N componenti passibili di deterioramento ($C_1, C_2 \dots C_N$). Questi componenti possono guastarsi casualmente in qualsiasi momento e devono essere necessariamente sostituiti con quelli nuovi; una volta eseguita la i -esima sostituzione al generico tempo t_i , il dispositivo torna al normale funzionamento. Il costo di riparazione (CRCR) del componente C_i è α_i se il guasto si verifica dopo il periodo di garanzia T_W , in quanto si ipotizza che i consumatori non paghino i servizi di riparazione durante il periodo di garanzia. Inoltre, si suppone che la decisione del consumatore di ritirare un dispositivo dipenda dal costo di riparazione cumulativo speso nel corso della sua vita, in altre parole, la scelta di riparare o sostituire viene presa in base alla storia dei costi di riparazione. Definendo A_j come valore soglia per $CRCR_j$ in cui consumatore j non ripara il dispositivo guasto se i costi totali per la riparazione sono oltre le aspettative (A_j), notiamo come il valore di questa soglia varia da consumatore a consumatore, per cui andiamo a definire una distribuzione beta sull'intervallo $[0,1]$ per generare una soglia random relativamente ad ogni singolo consumatore:

Equazione 2.5

$$g(A; \beta, \gamma) = \frac{A^{\beta-1}(1-A)^{\gamma-1}}{\int_0^1 u^{\beta-1}(1-u)^{\gamma-1} du}$$

Ove β e γ sono parametri di forma della distribuzione, e la soglia media è μ_A . Assumiamo che la distribuzione β possa essere una buona opzione in quanto è abbastanza flessibile da caratterizzare il comportamento dei consumatori.

Si presume che un consumatore possa ritirare un dispositivo ancora funzionante quando sembra tecnicamente obsoleto, T_O rappresenta il tempo massimo durante il quale il consumatore j può utilizzare un dispositivo e poi ritirarlo per obsolescenza fisica o tecnica.

Per catturare il comportamento eterogeneo tra i consumatori, viene definita una distribuzione log-normale per T_O :

Equazione 2.6

$$h(T_O; \varphi, \sigma, \eta) = \frac{1}{(T_O - \eta)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(T_O - \eta) - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\}$$

Dove η è la soglia per la distribuzione ($0 < \eta < T_O$).

Secondo l'impostazione del modello, il consumatore j può ritirare il dispositivo se questo sembra abbastanza obsoleto, il che significa che l'età del prodotto è maggiore rispetto al limite superiore della durabilità tecnologica del prodotto

($t \geq T_{Oj}$) o non si vuole più riparare il dispositivo (costo di riparazione cumulativo superiore alla soglia accettabile $CRCR_j \geq A_j$). Per formulare il $CRCR_j$, definiamo Y_{it} , tale che $Y_{it} = \alpha_i$ se il componente C_i deve essere sostituito a causa di un guasto al tempo t (altrimenti, Y_i è uguale a zero).

Pertanto, $CRCR_j$ può essere ottenuto come:

Equazione 2.7

$$CRCR_j = \sup_{t \leq T_{Oj}} f(t) = \sup \left\{ \int_{t=T_w}^t \left(\sum_{i=1}^N Y_{it} \right) dt : t \leq T_{Oj}, f(t) \leq A_j \right\}$$

In questa maniera siamo riusciti a ricavare in maniera analitica, partendo da un valore soglia preso randomicamente, le aspettative dei consumatori sul costo totale di riparazione, in relazione al prezzo iniziale di un prodotto prima di sostituirlo.

2.6.3. Implementazione della simulazione Monte Carlo

In questa sezione forniremo un esempio numerico per illustrare il modello proposto.

I costi di sostituzione di un componente di ricambio, incluso il costo del lavoro, sono disposti in ordine decrescente.

Tabella 1.2: Lista dei componenti di un computer con i relativi prezzi

Code	Name	Price ^a	α_i	Time-to-failure	Expected life (yr)	Standard deviation (yr)
C ₁	Central processing unit	\$180	10.9%	$f(t;2,5,5.1)$	4.5	1.9
C ₂	Li-ion battery	\$140	8.5%	$f(t;3,1,4.9)$	4.38	1.5
C ₃	System board	\$120	7.3%	$f(t;2,3,5.7)$	5	2.3
C ₄	LCD screen	\$100	6.1%	$f(t;2,9,4.6)$	4.1	1.5
C ₅	Optical drive	\$70	4.2%	$f(t;2,5,5.5)$	4.8	2.1
C ₆	Hard disk drive	\$50	3.0%	$f(t;2,1,5.9)$	5.2	2.6
C ₇	Keyboard	\$50	3.0%	$f(t;3,2,5.7)$	5.1	1.7
C ₈	Audio board	\$40	2.4%	$f(t;2,6,5.2)$	4.6	1.9
C ₉	Cooling fan	\$40	2.4%	$f(t;2,1,4.3)$	3.8	1.9
C ₁₀	Power adapter	\$30	1.8%	$f(t;2,8,4.6)$	4.1	1.5
C ₁₁	Memory	\$30	1.8%	$f(t;3,4,4.6)$	4.3	1.8
C ₁₂	Wireless network card	\$25	1.5%	$f(t;3,5,5.3)$	4.8	1.5
C ₁₃	Cable	\$15	0.9%	$f(t;2,8,4.5)$	4	1.5
C ₁₄	LCD backlight lamp	\$10	0.6%	$f(t;2,8,4.8)$	4.3	1.7

Per calcolare il rapporto costi di riparazione (α), i costi di sostituzione dei componenti vengono divisi per il costo di sostituzione del dispositivo.

Come evidenziato nella sezione precedente, i costi di riparazione che i consumatori sono disposti a pagare per un dispositivo sono limitati, per cui una distribuzione beta con media 20% e deviazione standard 12% rappresenta la soglia per CRCR.

I parametri delle distribuzioni time-to-failure sono casuali perché non abbiamo accesso ai dati sul guasto, tali dati post-vendita sono generalmente disponibili per i produttori e non sono necessariamente pubblicizzati. Per derivare i risultati della Simulazione Monte Carlo in MatlabVR 2013, sono stati impiegati 1000 campioni (per stimare un intervallo di confidenza del 95%).

Il tempo medio di utilizzo di un computer è di 3,25 anni, il termine "tempo di utilizzo" si riferisce all'intervallo di tempo in cui un computer è stato utilizzato dal suo proprietario prima essere rimpiazzato per obsolescenza fisica o tecnica.

Si noti che il tempo medio di utilizzo è significativamente inferiore

((t-value = 17.48 and p-value = 0.00) al tempo medio obsoleto (3,77 anni).

Infatti, i consumatori sono più sensibili all'obsolescenza fisica, piuttosto che a quella tecnologica secondo l'impostazione del caso preso in considerazione. Un altro dato da evidenziare è che il numero medio di sostituzioni di un componente varia da 0,17 a 0,51, ad esempio, i consumatori sostituiscono il componente C1 per 0,22 volte in media (cioè, 220 consumatori sostituiscono il componente C1 nel corso della vita del prodotto all'interno di una popolazione di 1000).

A questo punto andiamo ad analizzare i dati ottenuti attraverso la simulazione, attraverso la definizione di due principali aspetti:

1) *sensibilità della simulazione al comportamento dei consumatori:*

il modo in cui un prodotto è progettato in termini di affidabilità e riparabilità, la politica del produttore di fornire pezzi di ricambio e i comportamenti di utilizzo e riparazione del consumatore possono influenzare i risultati. La volontà dei consumatori di riparare un dispositivo è influenzata dalle loro emozioni, per cui si suppone che i consumatori diventino più “green” (meno green), mostrando più (meno) propensione alla riparazione. Viene svolta un'analisi di sensibilità sulla variazione del valore della soglia di riparazione A , ossia risulta importante sapere quanto può durare la vita del prodotto se la riparazione è la scelta più attraente per i consumatori.

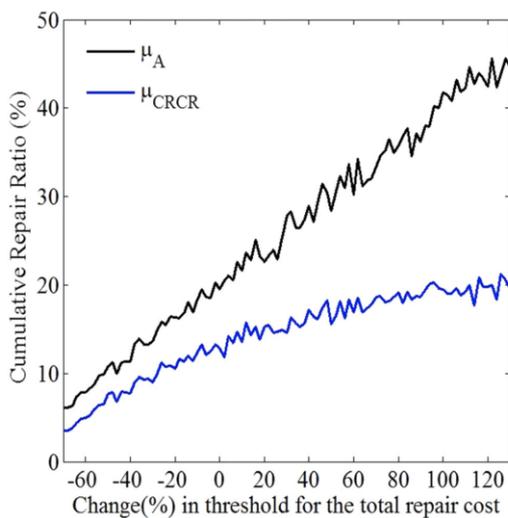


Figura 2.13: Variazione della soglia di riparazione

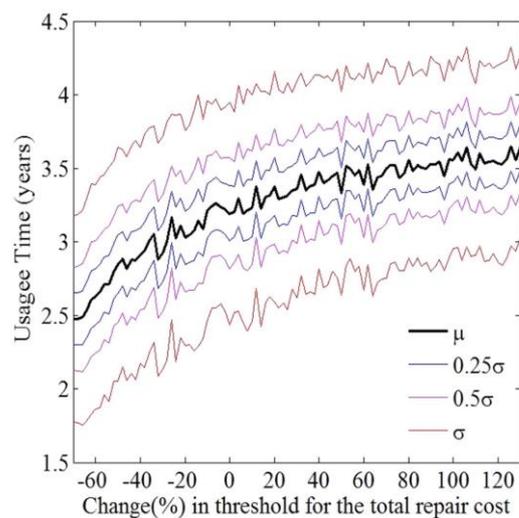


Figura 2.14: Tempo di utilizzo medio dei computer

In Figura 2.13 il valore della linea base della soglia media (μ_A) per CRCCR è del 20%, l'asse orizzontale mostra la variazione percentuale della soglia media, ad esempio: il 40% indica che la soglia media per CRCCR aumenta dal 20% al 28%. L'aumento lineare della soglia media (μ_A) è rappresentata dalla linea nera, la riga inferiore mostra il costo di riparazione cumulativo medio rapporto (μ_{CRCCR}).

la Figura 2.14 invece, mostra che il tempo di utilizzo medio dei computer aumenta per lo stesso motivo.

I limiti del tempo di utilizzo sono calcolati sulla popolazione ed il tempo medio di utilizzo è notevolmente influenzato dalla percezione dei consumatori circa l'obsolescenza tecnologica e psicologica. Ecco perché il divario tra le due curve aumenta all'aumentare del valore medio di soglia e allo stesso tempo l'andamento della durata della vita (μ_{CRCR}) converge al tempo medio di obsolescenza. Infatti, l'obsolescenza tecnica limita il valore monetario speso per le attività di riparazione nel corso della vita del dispositivo.

2) Sensibilità della simulazione al costo delle parti di ricambio:

le parti di ricambio vengono solitamente approvvigionate dai fornitori in quantità limitata, pertanto, queste possono essere recuperate dai dispositivi scartati o acquistate a prezzi maggiorati. Un processo di riparazione che richiede tempo e un accesso limitato alle officine di riparazione può anche causare disagi ai consumatori.

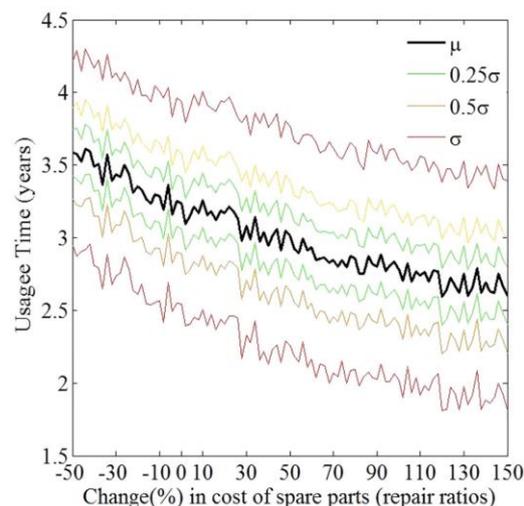


Figura 2.15: Variazione del tempo medio di utilizzo al variare del costo delle parti di ricambio

La Figura 2.15 illustra la variazione del tempo medio di utilizzo al variare del costo delle parti di ricambio. Il tempo medio di utilizzo diminuisce all'aumentare del costo dei pezzi di ricambio, come si può ben notare, questo converge verso il tempo di garanzia offerto dai produttori. Significa che i consumatori continueranno ad utilizzare un dispositivo finché i servizi di manutenzione saranno coperti dal produttore in maniera gratuita. Alla fine di questo periodo i consumatori potrebbero decidere di non riparare più il loro dispositivo anche in seguito ad un minimo danneggiamento, in altre parole, è molto probabile che un prodotto con un tempo di garanzia relativamente breve possa diventare rapidamente obsoleto [11].

2.7. Caso di studio: la produzione di pneumatici ecologici

2.7.1. Introduzione

Questo articolo descrive la produzione di pneumatici per autovetture eseguita con tecnologie di produzione tradizionali e moderne. Il Life Cycle Assessment (LCA) degli pneumatici oggetto di studio, coinvolge tre metodi di LCA:

- Eco-Indicator 99
- Cumulative Energy Demand (CED)
- metodi di valutazione scientifica sviluppati dal *Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming Potential (IPCC)*

La LCA come strumento di analisi ambientale può essere svolta per l'intero ciclo di vita o per le sue singole fasi. Lo studio fatto ha permesso di dimostrare che, a seguito dell'identificazione delle principali fonti di impatti negativi, è possibile proporre modalità per minimizzare questi impatti nel processo di produzione degli pneumatici per auto. I risultati indicano che l'impatto più dannoso è l'esaurimento delle risorse naturali, che svolgono un ruolo chiave nel processo di produzione degli pneumatici.

Per ridurre il consumo di materie prime, i produttori devono tenere conto di ciò, già a partire dalla fase di progettazione e produzione del prodotto, inoltre insieme alla crescente consapevolezza ecologica, si è iniziato a prestare attenzione anche alla minore nocività possibile sia nella produzione, nel funzionamento e nello smaltimento post-utilizzo degli pneumatici. Pertanto, hanno cominciato ad apparire sul mercato degli pneumatici "green". Questi sforzi hanno contribuito alla riduzione del consumo di carburante e delle emissioni di sostanze nocive nell'atmosfera e hanno favorito l'uso di componenti che facilitano il riciclaggio dei materiali.

Gli pneumatici ecologici sono strutturalmente simili agli pneumatici tradizionali, tuttavia, sono realizzati con materiali diversi.

2.7.2. Ciclo di vita degli pneumatici

Il ciclo di vita di uno pneumatico si divide in tre macro-fasi:

- 1) *La fase di produzione:* il design di uno pneumatico moderno è un processo strutturale complesso che combina una serie di elementi in gomma, acciaio e tessuto. Ciascuno di questi materiali presenta caratteristiche diverse che conferiscono un insieme di proprietà specificamente selezionato, ad esempio, forma, rigidità, resistenza, smorzamento delle vibrazioni, calore e dissipazione delle cariche elettrostatiche. Ogni pneumatico prodotto dovrebbe funzionare secondo le specifiche di progetto, per cui, la scelta e la qualità dei materiali sono essenziali ai fini della tecnologia di produzione.

Gli pneumatici svolgono un ruolo assolutamente rilevante nel garantire la sicurezza del conducente e dei passeggeri, motivo per cui è fondamentale che il loro processo produttivo sia eseguito in conformità ai requisiti applicabili e che il prodotto sia sottoposto a test specialistici. Le tecnologie utilizzate dai produttori di pneumatici prevedono una o due fasi: all'inizio l'intero pneumatico viene prodotto su un'unica macchina, il telaio viene tipicamente assemblato nella prima fase e gli strati e le tecnologie di base e supplementari (cintura, battistrada, ecc.) vengono montati consecutivamente. Gli strati dello pneumatico vengono adagiati all'interno di un tamburo, che viene successivamente riempito di aria, la cui pressione fa aderire gli strati.

Nella fase successiva, la struttura viene sottoposta al rotolamento, che dà la forma allo pneumatico, assicura la forte adesione dei componenti e garantisce la rimozione dell'aria in eccesso che potrebbe rimanere intrappolata tra i componenti. L'output del processo è lo pneumatico grezzo, che viene sottoposto a test di controllo dimensionale e di forma per errori. Gli pneumatici vengono anche tagliati per valutare la conformità del prodotto alle specifiche di progettazione, le quali comprometterebbero le proprietà di sicurezza e le prestazioni.

Le moderne case costruttrici di pneumatici tendono a incorporare composti che combinano varie proprietà dei materiali, eliminando così gli svantaggi di particolari elementi. Di conseguenza, i nuovi modelli di pneumatici possono soddisfare le sfide poste dai requisiti ambientali in costante aumento.

2) *La fase di utilizzo:* è importante notare che ogni elemento dello pneumatico può avere un impatto significativo sul consumo di carburante e anche sulla riduzione o sull'aumento dell'impatto ambientale, ad esempio gli pneumatici sono la principale causa della resistenza al rotolamento, causando il 20-30% del consumo di carburante delle autovetture. La riduzione del consumo di carburante consente di ridurre l'emissione di CO₂ e altri composti nocivi nell'ambiente. L'usura degli pneumatici invece, contribuisce in modo significativo al flusso di (micro) plastica nell'ambiente, infatti le particelle generate durante il loro utilizzo, emesse sulle strade, possono essere disperse nell'ambiente attraverso vari percorsi. Quelle più piccole vengono solitamente emesse nell'aria, mentre le particelle più grandi si depositano sulla superficie stradale e, a causa del deflusso dell'acqua piovana, penetrano nel suolo, nelle acque reflue e nelle acque superficiali.

3) *La gestione del fine vita:* gli pneumatici sono la principale fonte di prodotti in gomma post-consumo. Da anni il numero di pneumatici ritirati dall'uso è aumentato, provocando un impatto negativo sull'ambiente, tuttavia, al giorno d'oggi, l'applicazione dei principi dello sviluppo sostenibile implica un nuovo approccio ai rifiuti utilizzando concetti rispettosi dell'ambiente ed è necessario valutare le possibilità di gestione di questi rifiuti al fine di aumentarne l'utilizzo e ridurre la quantità da smaltire.

Si dovrebbe costruire una gerarchia dei rifiuti, concentrandosi su riutilizzo, riciclaggio e recupero, e lo smaltimento dovrebbe essere interpretato come l'ultima opzione disponibile corrispondente al più alto livello di perdita. Ci sono tre principali linee di azione volte a risolvere il problema degli pneumatici usati:

- estensione della vita utile attraverso una maggiore durata
- riciclaggio dei materiali
- recupero di energia

A causa della loro durata, gli pneumatici usati costituiscono uno spreco e dovrebbero essere utilizzati a livello industriale. A tal fine, i metodi più frequentemente utilizzati sono quelli che coinvolgono il riciclaggio del prodotto o del materiale. Pneumatici usurati interi, compressi o tagliati hanno molte applicazioni, inclusa la forma, le caratteristiche dei materiali e la capacità di assorbire gli urti o il rumore. L'uso di pneumatici come carburante nella produzione di cemento è considerato un metodo senza sprechi per gestire grandi quantità di questo tipo di rifiuti, perché gli pneumatici bruciano completamente senza residui di scorie o ceneri.

2.7.3. Metodo e piano d'analisi

Gli oggetti dello studio sono due pneumatici 205/55/R16 destinati all'uso nelle autovetture.

Il primo esemplare è stato prodotto utilizzando una tecnologia tradizionale, mentre l'altro rappresenta il moderno eco-pneumatico.

Attualmente, l'UE sta promuovendo meccanismi volti a stimolare la fabbricazione di prodotti ecocompatibili al fine di migliorare le condizioni dell'ambiente naturale europeo. L'assunto di base è quello di attuare misure di intervento

prevalentemente nelle fasi del ciclo di vita che mostrano il più alto potenziale di riduzione dell'impatto negativo sull'ambiente, pertanto l'obiettivo di questo studio è di stabilire quali fasi e fattori del ciclo di vita degli pneumatici per auto presentano il più grande potenziale di miglioramento guidato dalla sostenibilità.

L'analisi condotta è di tipo comparativo ed è stata utilizzata per determinare se esistono differenze nell'entità dell'impatto ambientale generato durante i cicli di vita di pneumatici prodotti attraverso le due diverse tecnologie.

L'obiettivo dell'analisi era in primo luogo fornire la descrizione dello status quo del settore (retrospective LCA) e, in secondo luogo, analizzare le potenziali conseguenze future e determinare raccomandazioni per lo sviluppo di soluzioni più rispettose dell'ambiente (prospective LCA).

Poiché entrambi i prodotti analizzati in questo studio sono pneumatici per autovetture che operano nella stessa area di applicazione, è stato deciso che la funzione si riferisse a questo aspetto. È stato definito come traguardo quello di coprire la distanza di 50.000 chilometri su un periodo di 5 anni con uno stile di guida medio. La struttura geografica e temporale dei dati è la stessa, dal punto di vista della dimensione spaziale, non si nota alcun impatto rilevante poiché entrambi i tipi di pneumatici sono prodotti nello stesso sito, tuttavia, con l'implementazione di metodi di produzione diversi. È quasi sempre necessario effettuare alcune esclusioni nelle analisi LCA: I criteri di cut-off sono specificati da scelte di valore o possono essere dettati da fattori indipendenti, come le lacune nei dati, per cui in questo studio i processi di archiviazione, distribuzione, vendita e test tecnici sono stati esclusi.

Il *Life Cycle Inventory* (LCI) rappresenta la seconda fase dello studio, ovvero l'analisi dell'insieme di input e output. Questo modello rappresenta la struttura del sistema-prodotto e i suoi elementi più

piccoli sono i processi unitari. Un processo unitario è il componente più piccolo del sistema di prodotto per il quale

vengono raccolti i dati. Inoltre, i processi sono collegati da flussi di materiale ed energia. Tutti i processi delle singole unità rappresentate nel modello sono stati sottoposti a verifica e valutazione di completezza, eseguita utilizzando il bilanciamento materiale ed energetico. I dati sono stati acquisiti in base ai tipi di inventario e raccolti nella tabella di inventario. La raccolta dei dati fornisce informazioni di base aggiuntive riguardanti la fonte di origine, l'area geografica, l'età, ecc... Tuttavia, il criterio di classificazione chiave in questa fase era il fatto di appartenere all'inventario del sistema studiato. Di conseguenza, durante l'analisi, la raccolta dei dati viene adattata ai requisiti del modello e all'indicatore della categoria di impatto. L'aggregazione dei dati conclude questa fase e introduce la fase successiva, il *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA).

La funzione principale dell'LCIA è determinare l'impatto del ciclo di vita di un determinato prodotto sull'ambiente. L'LCIA è composta da elementi obbligatori e facoltativi: gli elementi obbligatori includono la definizione di categorie di impatto, indicatori di categoria, modelli di caratterizzazione nonché classificazione e caratterizzazione, mentre tra gli elementi opzionali vi sono la normalizzazione, il raggruppamento, la ponderazione e l'analisi della qualità dei dati.

In questo caso gli strumenti per la valutazione dell'inquinamento e per la definizione delle categorie d'impatto sono stati:

- L'*Eco-Indicator 99* (EI99) è un rappresentante dei metodi endpoint per la modellazione e la valutazione dell'impatto ambientale. Il processo di caratterizzazione definisce l'ambiente attraverso la prospettiva di tre principali categorie di danno, denominate anche *environmental damage endpoints* (Salute umana, Qualità dell'ecosistema e Risorse) descritte tramite undici punti d'impatto.

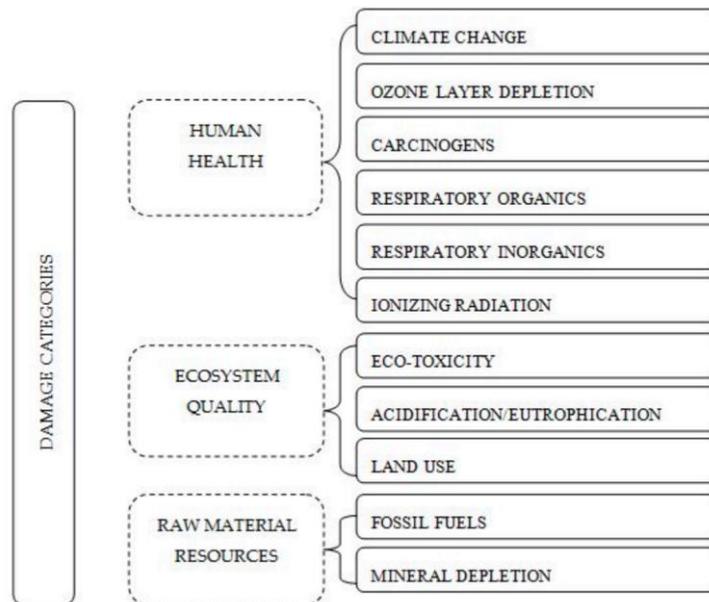


Figura 2.16: struttura generale delle categorie dell'Eco-Indicator 99

- La *Cumulative Energy Demand* (CED) è espressa in MJ-Equivalenti e descrive il carico ambientale attraverso 7 categorie di danni: 2 fonti non rinnovabili (energia nucleare e combustibili fossili) e 5 fonti rinnovabili (solare, acqua, eolico, geotermico e biomasse).
- L' *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha sviluppato un metodo di valutazione scientifica, che funge da strumento di valutazione quantitativa per esprimere il contributo di particolari gas serra all'effetto serra (GHG, greenhouse gases effect), ove l'indicatore di danno totale effetto serra relativo alla CO₂ è pari a 1.

2.7.4. Risultati

La ricerca condotta mostra che uno pneumatico realizzato secondo la tecnologia tradizionale genera conseguenze maggiormente negative per l'ambiente rispetto a uno pneumatico ecologico. Ciò è dovuto ad una quantità maggiore (di circa il 20%) di materiali utilizzati nella sua produzione.

L'impatto ambientale più considerevole nella fase di produzione è dovuto all'elevato livello di consumo delle risorse naturali in costante esaurimento, ossia l'estrazione di combustibili fossili.

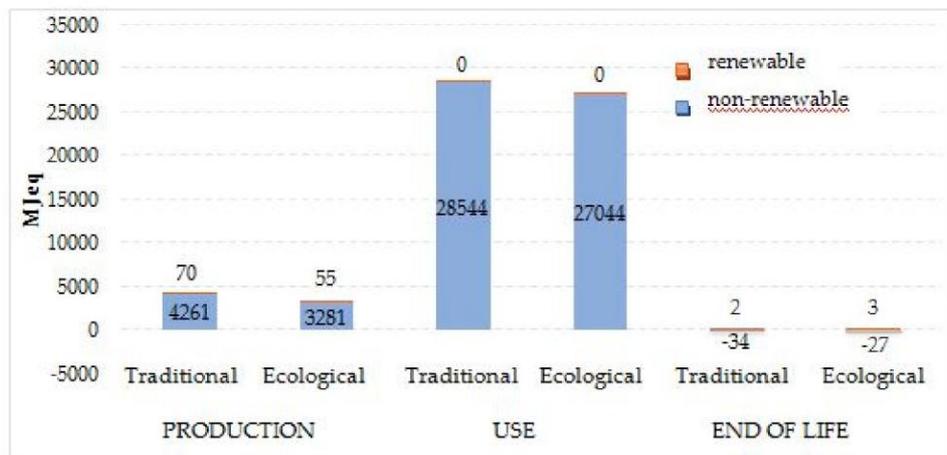


Figura 2.17: Differenze durante i vari stadi del ciclo di vita di risorse rinnovabili e non impiegate da pneumatici tradizionali ed ecologici

L'uso di fonti energetiche rinnovabili non convenzionali per alimentare un'autovettura potrebbe contribuire in modo significativo a ridurre l'impatto negativo sull'ambiente, l'uso di pneumatici ecologici (più leggeri) consentirebbe di risparmiare una grande quantità di risorse materiali necessarie nella fase di produzione.

Ciò si tradurrebbe, in una prospettiva più ampia, nel miglioramento dell'ambiente. La possibilità di ottenere risorse energetiche convenzionali sta diventando sempre più difficile e limitata, l'estrazione di carbone e petrolio greggio e la loro combustione, oltre all'impatto negativo sull'effetto serra e sulla purezza dell'aria, provoca anche danni irreversibili al paesaggio. A tal fine è possibile aumentare l'importanza delle materie prime rinnovabili nei processi di produzione, ad esempio, ottenendo gomma da piante come "Guayule" invece che dal solo albero della gomma tradizionale, nonché sostituendo le materie prime fossili con materiali rinnovabili [12].

2.8. Caso di studio: la produzione di pale di turbine aeronautiche

2.8.1. Introduzione

La crescita esponenziale delle tecnologie nella *Additive Manufacturing* (AM) non sta solo migliorando i processi di produzione per raggiungere i requisiti funzionali dei prodotti, ma potrebbe anche aiutare a ridurre al minimo gli impatti ambientali. Il settore aerospaziale adatta e innova costantemente i processi di produzione emergenti, verso la creazione di nuovi modelli di aeromobili che devono soddisfare rigorose riduzioni di peso e requisiti di sicurezza.

Gli oneri ambientali associati a un nuovo prodotto aeronautico vengono valutati durante tutte le fasi della sua vita, dall'estrazione del materiale fino al suo smaltimento finale, compresa la produzione, la fabbricazione, la distribuzione e l'uso del prodotto, nonché la sua manutenzione. Al fine di soddisfare severi requisiti di prodotto e allo stesso tempo livelli elevati di produttività, i processi di produzione e i materiali avanzati sostituiscono e integrano continuamente le tecnologie di produzione convenzionali. Le nuove tecnologie emergenti nel campo dell'AM, in particolare la *Selective Laser Melting* (SLM), hanno il potenziale per ridurre i costi e il peso di un aeromobile, raggiungendo livelli accettabili in termini di precisione geometrica e proprietà meccaniche, andando a ridurre anche l'impatto ambientale del ciclo di produzione. L'uso di AM offre la possibilità di ridurre i tempi di fermo nelle catene di fornitura e di ridurre l'inventario in modo molto efficace, offre inoltre la possibilità di produrre parti a forma libera e complesse che possono essere pronte in poche ore anziché in settimane. Questi processi sono spesso descritti come processi "puliti" perché utilizzano solo la quantità esatta di materiale per costruire parti funzionali. Gli indicatori ambientali inclusi nel framework sono relativi agli impatti e alle emissioni di energia, lo studio è incentrato sul *Global Warming Potential* (GWP), il cui principale indicatore correlato è *il carbon footprint*, che misura tutta l'anidride carbonica (CO₂) immessa nell'atmosfera durante il processo di fabbricazione. Al fine di focalizzare il lavoro su un componente specifico, ci concentreremo sull'analisi di impatto ambientale relativa alla produzione di pale per una turbina.

2.8.2. Il processo produttivo

Lo studio confronta le attuali tecnologie di produzione con la *Selective Laser Melting*.

Viene analizzata una catena del processo di produzione delle pale di una turbina, la quale non è altro che il singolo componente di una serie di palette curve in una turbomacchina per motori aeronautici. Le pale della turbina sono predisposte all'estrazione di energia dalla camera di combustione, queste sono esposte alle temperature più elevate essendo vicine al motore. Per questo la geometria risulta estremamente complessa ed i materiali sono costosi rispetto ad altre leghe usate in aeronautica.

La fabbricazione della pala della turbina è un processo complesso perché viene originariamente eseguita utilizzando due principali tecnologie di produzione:

- la microfusione
- la lavorazione meccanica di precisione

Per la prima fase di fabbricazione, l'azienda esegue il processo di microfusione in cui la fusione viene elaborata dalla materia prima con stampi in ceramica riempiti con leghe metalliche ad alto punto di fusione mediante tecniche di gravità, pressione o forza centrifuga. Successivamente, durante la seconda fase di lavorazione ci si occupa della fase finale, trasformando la pre-forma fusa in una pala di turbina.

L'*Investment Casting* (IC) nota anche come "*Fusione a Cera Persa*", è nota per la sua capacità di produrre componenti con finitura superficiale superiore e con elevati gradi di complessità della forma. la tecnica IC consiste in cinque fasi principali:

- 1) *produzione di modelli in cera*: mediante iniezione o versando cera fusa nello stampo sotto pressione e quindi i singoli modelli in cera vengono fatti aderire ad un canale di colata centrale, il risultato è un modello con motivo ad albero.
- 2) *Realizzazione del guscio in ceramica*: i modelli in cera vengono rivestiti con impasto ceramico, che viene poi solidificato per costruire un guscio attorno all'albero del modello in cera.
- 3) *Deceratura*: il modello viene fuso, lo stampo viene indurito e tenuto capovolto per drenare la cera.

- 4) *l'eliminazione di tutti i contaminanti*: una volta che lo stampo viene preriscaldato ad alte temperature, cosa che facilita anche il passaggio del metallo nella cavità, il metallo fuso viene versato nello stampo per gravità e quindi solidifica.
- 5) *fase finale della lavorazione*: lo stampo a conchiglia viene staccato dalla parte solida, dando come risultato una parte grezza che necessita solo di un trattamento termico.

In SLM invece, strati di polvere metallica fine (25–50 μm) vengono distribuiti su una piattaforma di costruzione con l'ausilio di un rullo o di un rivestimento. La polvere viene riscaldata selettivamente da un raggio laser ad alta densità fino alla sua temperatura di fusione e la sua energia è calibrata in modo tale che ogni strato di polvere metallica sia completamente fuso e unito alle particelle fuse dello strato precedente. L'industria aerospaziale è focalizzata nell'adozione di SLM a causa della possibilità di produrre strutture più leggere per ridurre il peso, che è l'obiettivo comune dei progettisti di aeromobili e veicoli spaziali. Inoltre, a causa della possibilità di ridurre i tempi di fermo nelle catene di approvvigionamento dei pezzi di ricambio e ridurre l'inventario delle parti in modo più efficiente rispetto alla produzione convenzionale.

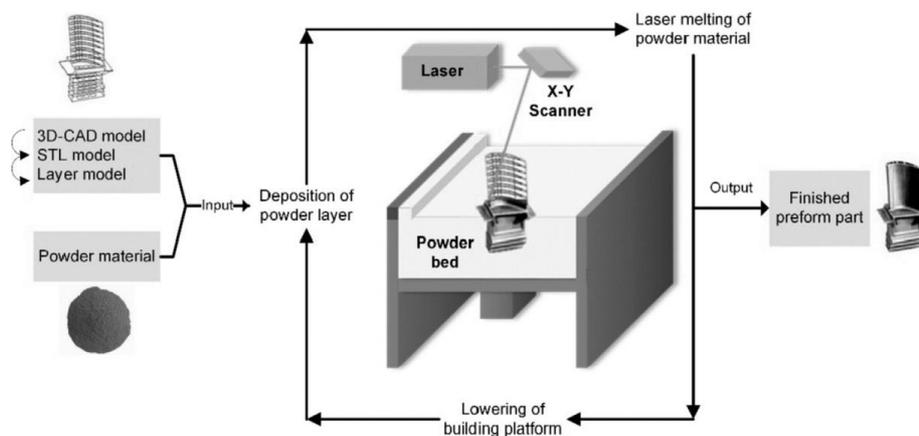


Figura 2.18: struttura del processo di Selective Laser Melting

L'obiettivo di questa analisi è quello di esplorare i vantaggi che possono essere ottenuti passando da IC a SLM in una fase del piano di processo di produzione delle pale delle turbine ed esplorando le sue implicazioni per l'intero ciclo di vita in metriche sostenibili inclusa la fase di lavorazione di precisione. La metodologia LCA utilizzata in questo lavoro si basa sulla ISO 14044, lo studio è limitato all'analisi gate-to-gate nella fase di fabbricazione del prodotto in cui vengono presi in considerazione gli input e gli output del processo produttivo.

2.8.3. Analisi dei risultati

Il presente studio fornisce un'analisi ambientale della Selective Laser Melting (SLM) e la confronta con la produzione convenzionale che applica tecniche di microfusione per la produzione di pale per turbine. L'analisi risultante mostra che è possibile ridurre il riscaldamento globale e il consumo di energia con il piano di processo basato sulla produzione additiva proposto.

L'analisi nello specifico ci informa che la riduzione dell'impronta di carbonio e dell'impatto ambientale nell'uso della *Additive Manufacturing* è di circa il 4% in più rispetto alla produzione convenzionale. L'osservazione dei risultati mostra anche che il consumo di energia per produrre un lotto di 600 parti di pale di turbina in modo convenzionale è nettamente superiore rispetto alla produzione additiva.

Outputs	IC	SLM
Emissions to sea water	1.20E+05 kg eq.	7.39E+04 kg eq
Deposited goods	3.10E+04 kg eq	1.96E+04 kg eq
Emissions to air	1.90E+05 kg eq	1.48E+05 kg eq
Emissions to fresh water	3.50E+07 kg eq	2.1E+07 kg eq
Emissions to agricultural soil	0.0053 kg eq	0.0034 kg eq
Emissions to industrial soil	0.078 kg eq	0.048 kg eq

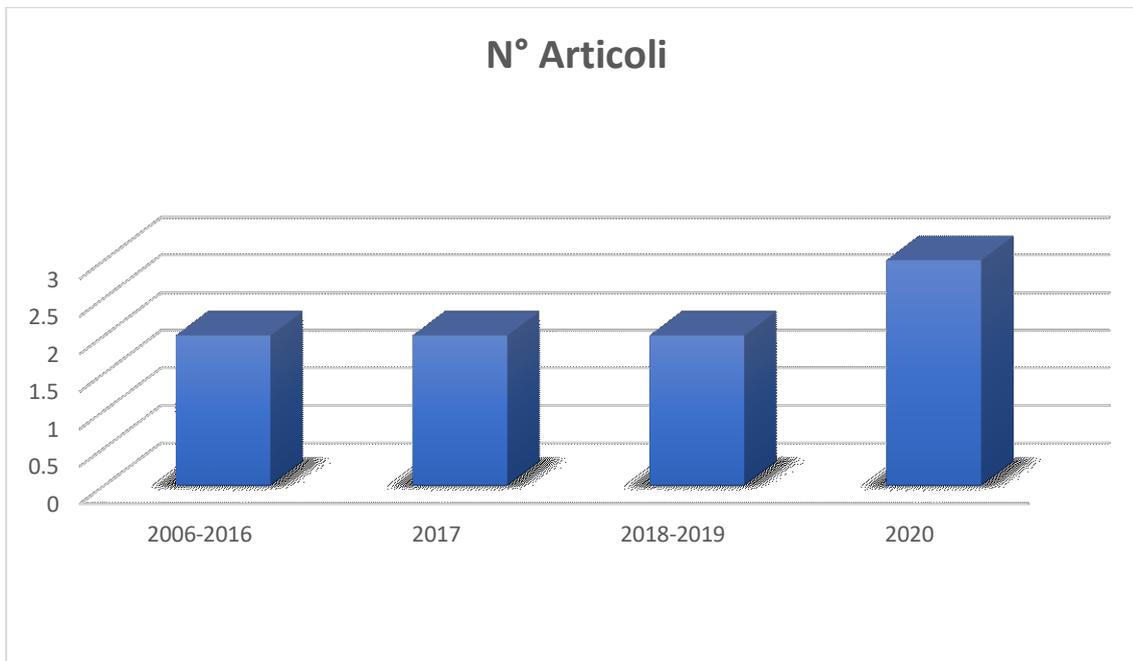
Figura 2.19: Differenze di emissioni tra IC ed SLM

Pertanto, quest'ultimo ha un potenziale quantificato per ridurre gli impatti ambientali e ridurre l'impronta di carbonio. Tuttavia, dopo aver eseguito un'analisi di sensibilità, si riconosce che qualsiasi cambiamento nella rugosità superficiale della preforma da lavorare influenzerà le prestazioni ambientali dell'intera catena di processo e quindi il processo SLM dovrebbe essere adeguatamente calibrato. La raccolta dei dati di questo lavoro può essere un'informazione cruciale per le aziende manifatturiere al fine di avere una maggiore comprensione del rapporto tra tecnologie emergenti e impatti ambientali. Il presente studio ha implicazioni nel processo decisionale perché dal nostro punto di vista i dati e le informazioni aiuteranno le aziende con piani di processo di produzione simili derivati da parti simili per quanto riguarda geometria e materiale. I progettisti avranno anche ulteriori informazioni oltre ai vantaggi funzionali e prestazionali meccanici delle tecnologie di fusione a letto di polvere. Potremmo aggiungere che i risultati supportano anche altri studi che raccomandano l'adozione della produzione additiva al fine non solo di migliorare le caratteristiche del design, ma anche di ridurre l'impatto ambientale nella produzione di parti aerospaziali. L'implementazione di tecnologie AM per produrre componenti aerospaziali può migliorare il processo non solo nelle questioni di sostenibilità ma anche in quelle tecnologiche. Questa tecnologia emergente che è ora disponibile sostituirà alcune fasi dei processi produttivi,

garantendo così ottimizzazione e alta produttività per ridurre i costi della catena di fornitura delle aziende e i tempi di consegna. È necessario ulteriore lavoro per analizzare la sensibilità dei risultati rispetto a una modifica dei parametri di processo. Ad esempio, all'interno della macchina di produzione additiva selezionata possiamo regolare parametri come potenza laser, tempo di esposizione, distanza dal punto e velocità di costruzione. Una progettazione di esperimenti consentirà di ottimizzare le metriche ambientali oltre i risultati iniziali. Anche la geometria della parte e i requisiti di qualità della superficie sono questioni chiave nella selezione del processo perché il consumo di energia è influenzato dal tempo di elaborazione [13].

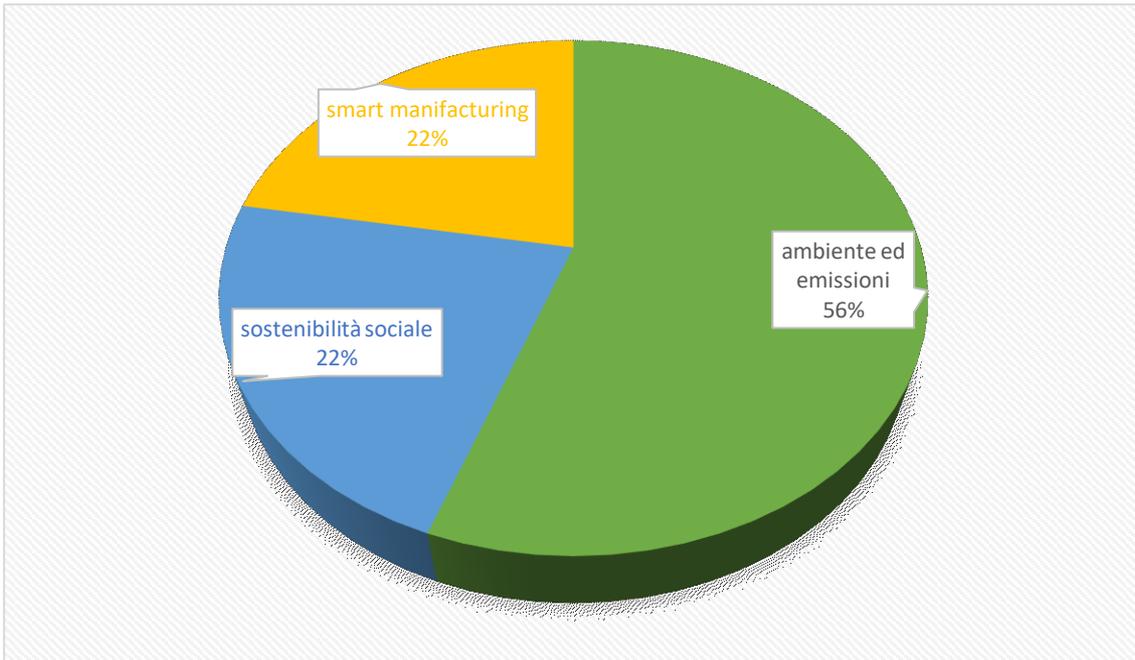
3. Analisi grafica dei documenti

3.1. Articoli per anno



Nel seguente grafico gli articoli analizzati vengono raccolti in base all'anno di pubblicazione. È interessante notare come la distribuzione negli ultimi due decenni sia molto omogenea, questo a testimonianza del fatto che le tematiche relative al supporto del ciclo di vita del prodotto sono del tutto attuali, e in campi come quello ingegneristico e ambientale, stiano proseguendo attraverso un trend crescente di interesse ed innovazione.

3.2. Articoli per tematica



Analizzando gli articoli in base alla tematica principale, si può evincere facilmente che l'argomento maggiormente trattato riguarda la sostenibilità ambientale e le emissioni provocate dal ciclo di vita dei prodotti.

Non a caso questa risulta la tematica di spicco all'interno delle trattazioni, infatti negli ultimi anni i singoli attori in ambito industriale hanno cercato di virare verso un approccio meno impattante possibile, sia dal punto di vista procedurale, che progettuale nell'ambito di concept di un determinato prodotto.

4. Conclusioni

Alla luce delle considerazioni fatte nei precedenti capitoli emerge in maniera dominante l'idea che l'innovazione e la progettazione continua di nuove tecnologie per agevolare il prodotto lungo tutta la catena di vita, sia una delle prerogative più importanti per le attuali realtà imprenditoriali in ottica presente e futura.

Un vantaggio di assoluta rilevanza, riconosciuto all'interno di ogni analisi effettuata, è riconducibile al crescente livello di collaborazione e comunicazione tra le diverse funzioni e figure professionali impegnate nelle diverse attività di sviluppo. A sua volta questo approccio ridefinisce il modo tradizionale di operare, non più eseguendo in maniera sequenziale, ma bensì cercando di svolgere le operazioni in maniera parallela, magari informando quelle aree che tradizionalmente sarebbero collocate a monte del processo produttivo, delle criticità riscontrate nei processi a valle. Un altro fondamentale punto di forza è costituito dall'opportunità offerta da tali soluzioni di testare e valutare aspetti riguardanti il funzionamento e il comportamento del prodotto, in maniera tale da realizzare articoli innovativi, privi di difetti e rispondenti in maniera consona agli interessi dei consumatori.

Con il seguente lavoro si vogliono sensibilizzare gli esperti del settore ad investire parte delle loro risorse per l'impiego e l'adozione di queste soluzioni, così da poterne trarre beneficio sia al livello economico, in una visione futura, ma in maniera più significativa all'ambiente che ci sta accogliendo.

Bibliografia

- [1] <https://www.cadtec.it/ciclo-di-vita-del-prodotto/>
- [2] <https://www.pro-file.com/it/wiki/category/la-digitalizzazione/>
- [3] <https://www.mygreenbuildings.org/2010/12/20/lca-analisi-ciclo-di-vita-prodotti-processi.html>
- [4] <https://www.passaportoambientale.it/approfondimenti/analisi-ciclo-di-vita-lca-cos-e-quali-fasi/>
- [5] [Introduction \(univpm.it\)](#)
- [6] [An Energy-Related Products Compliant Eco-Design Method with Durability-Embedded Economic and Environmental Assessments \(univpm.it\)](#)
- [7] [Proposal of a toolset for the improvement of industrial systems' lifecycle sustainability through the utilization of ICT technologies - ScienceDirect \(univpm.it\)](#)
- [8] [434860_1_En_23_Chapter 248..258 \(univpm.it\)](#)
- [9] [IEEE Xplore Full-Text PDF: \(univpm.it\)](#)
- [10] [Environmental Evaluation of Product Design Alternatives: The Role of Consumer's Repair Behavior and Deterioration of Critical Components | J. Mech. Des. | ASME Digital Collection \(univpm.it\)](#)
- [11] [Environmental Evaluation of Product Design Alternatives: The Role of Consumer's Repair Behavior and Deterioration of Critical Components | J. Mech. Des. | ASME Digital Collection \(univpm.it\)](#)
- [12] [Applied Sciences | Free Full-Text | LCA as a Tool for the Environmental Management of Car Tire Manufacturing \(mdpi.com\)](#)
- [13] [Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades - ScienceDirect \(univpm.it\)](#)