

INTEGRAZIONE DEGLI ASPETTI AMBIENTALI NELLA PROGETTAZIONE DI PRODOTTO: INTRODUZIONE ALLE PROBLEMATICHE E IMPOSTAZIONE METODOLOGICA

*F. Giudice *, G. La Rosa , A. Risitano*

DIIM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università di Catania

Sommario

Il presente lavoro propone un quadro generale delle principali problematiche e delinea un'impostazione metodologica, basata sull'approccio al ciclo di vita del prodotto, per un intervento progettuale orientato alla salvaguardia ambientale che possa integrarsi efficacemente nel processo di progettazione e sviluppo prodotto. Tale impostazione, in linea con gli orientamenti assunti allo stato attuale in ambito di politiche comunitarie (Green Paper on IPP) e standardizzazione internazionale (ISO/TR 14062), consente di individuare le strategie e gli strumenti più adatti alla realizzazione di un processo di progettazione integrata che tenga in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita, dalla definizione delle specifiche di prodotto alla sua dismissione, analizzando e armonizzando fattori determinanti come producibilità, requisiti di utilizzo, costi, e aspetti ambientali.

Abstract

The present paper traces the general picture of the main issues and a methodological statement based on the life cycle approach, with regard to the design intervention directed at environmental protection and its integration in the product design and development process. The proposed statement and structured approach to the problem complies with the current direction of European Communities policy (Green Paper on IPP) and international standardization course (ISO/TR 14062), and allows to identify the most appropriate strategies and tools for an integrated design process which takes into consideration all the phases of the life cycle, from definition of product requirements to its disposal, analyzing and reconciling determinant factors such as producibility, requisites for use, cost and environmental aspects.

Parole chiave: Design for Environment, Life Cycle Design, Design for X, Product Development

1. INTRODUZIONE

Benché le questioni più rilevanti legate agli aspetti ambientali della produzione industriale siano ormai oggetto di ampia diffusione, a fronte di un buon livello di consapevolezza delle necessità ambientali le aziende produttrici manifestano tuttora una chiara difficoltà nella realizzazione di una produzione ambientalmente sostenibile. Uno dei punti nodali del problema è individuabile nella mancanza di integrazione dei principi e metodi della progettazione per la qualità ambientale dei prodotti nella pratica progettuale e manageriale [1]. Ciò fa sì che i fattori di successo nella

* Corresponding author: *Tel.:* +39 095 7382418; *Fax.:* +39 095 330258; *E-mail:* fgjudice@diim.unict.it

progettazione di prodotto rimangano ancora circoscritti alla qualità e ai costi e tempi di sviluppo, cioè a quelli che possono essere intesi come fattori legati all'impatto del prodotto con il mercato.

Uno degli aspetti di maggior rilievo del Design for Environment [2; 3], noto anche come Green Design o EcoDesign, consiste nel poter svolgere il ruolo di ponte di collegamento tra pianificazione e sviluppo della produzione, e gestione ambientale della stessa, due funzioni generalmente separate.

Per assumere questo ruolo, l'attività progettuale deve acquisire un'impostazione basata su alcuni aspetti imprescindibili: orientamento al ciclo di vita del prodotto; armonizzazione di una ampia gamma di requisiti; struttura simultanea e integrata dell'intervento progettuale. Solo sulla base di queste premesse è possibile concepire un processo di sviluppo prodotto che tenda alla sostenibilità del ciclo di vita, con l'obiettivo ideale di ottenere un prodotto lavorato, utilizzato e dimesso, limitando il più possibile le varie tipologie di impatto sull'ambiente.

2. REQUISITI AMBIENTALI E PROGETTAZIONE INTEGRATA

Focalizzando l'attenzione sulle problematiche di prodotto, la Comunità Europea ha recentemente adottato il Libro Verde sulla Politica Integrata di Prodotto (IPP - Integrated Product Policy) [4], col chiaro intento di delineare e promuovere una strategia intesa a rafforzare e riorientare le politiche ambientali, col fine ultimo di stimolare il primato delle imprese nella produzione ecologica, integrando i requisiti ambientali negli standard di prodotto. Tale integrazione si può concretizzare mediante uno sforzo verso il miglioramento delle prestazioni ambientali del prodotto del suo intero ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime alla produzione, all'uso, fino alla gestione dei rifiuti.

L'approccio al ciclo di vita (*life cycle thinking*) può consentire un salto di qualità nell'impostazione dello sviluppo prodotto, facendo sì che il prodotto si armonizzi non solo con l'ambiente-mercato (*business environment*), ma anche con l'ambiente naturale (*natural environment*) [5]. Ciò è confermato da alcune osservazioni in merito a quelli che possono individuarsi come i fattori determinanti che ostacolano l'implementazione di uno sviluppo di prodotto *environmentally-oriented* nella pratica delle aziende produttrici [6]:

- scarsa conoscenza degli impatti ambientali dei prodotti;
- impostazioni del processo di sviluppo prodotto di tipo *cost-oriented*;
- mancanza di una distribuzione omogenea ed efficace, nell'ambito dell'intero processo di sviluppo, dell'approccio ai requisiti ambientali di prodotto.

Per quanto riguarda il primo fattore, relativo alle limitate conoscenze nell'ambito delle aziende produttrici sugli impatti dei prodotti con l'ambiente, esso è legato storicamente alla necessità da parte dei produttori di rivolgersi principalmente ad alcuni aspetti legati all'impatto sui siti di produzione (consumo delle risorse, generazione di emissioni e rifiuti), non direttamente riconducibili ai prodotti, e limitati al contesto della sola fase produttiva. Questo ha fatto sì che venissero a mancare le informazioni primarie su cui poter basare una qualsiasi strategia di miglioramento della qualità ambientale dei prodotti, che come è ormai noto richiede una visione estesa all'intero ciclo di vita. A questo problema può fare fronte la diffusione delle tecniche di Life Cycle Assessment (LCA) [7; 8], che nelle sue forme semplificate (Streamlined LCA) può superare gli inconvenienti di un'analisi troppo dettagliata per essere eseguita nelle fasi preliminari di sviluppo prodotto [9].

Il fattore legato a un'impostazioni del processo di sviluppo tradizionalmente di tipo *cost-oriented* nasce anch'esso da un approccio al problema ambientale datato, di tipo "difensivo", che vede l'ambiente come un vincolo restrittivo e generalmente oneroso, non riuscendone a valutare il potenziale di propulsore per un'innovazione ad alto valore aggiunto. Questo fattore diviene particolarmente significativo se si pensa all'importanza che hanno le funzioni di pianificazione dei costi e di marketing nell'impostazione dello sviluppo di prodotto, quindi all'ostacolo che la mancanza di un'analisi economica accurata e della percezione del "valore ambientale" di un prodotto può costituire per la diffusione della progettazione eco-compatibile. Anche in questo caso le tecniche *life cycle oriented* possono venire in soccorso, soprattutto per quel che riguarda il Life Cycle Cost Analysis (LCCA) [10; 11], e l'Environmental Accounting e le altre tecniche di integrazione delle analisi economica e ambientale del ciclo di vita [12; 13].

La questione della mancanza di una distribuzione completa di un approccio omogeneo *environmentally-oriented*, nell'ambito dell'intero processo di sviluppo, è uno dei fattori cruciali.

Benché sia stato spesso rilevato che tale mancanza ricade principalmente sulle fasi preliminari dello sviluppo di prodotto, in relazione alle quali si rileva una carenza di metodi e strumenti orientati agli aspetti ambientali, è opportuno evidenziare come nella pratica progettuale manchino più in generale gli strumenti per un approccio organico agli aspetti ambientali nell'intero processo di sviluppo, nonostante tale approccio sia chiaramente auspicabile a livello teorico.

Anche in questo caso l'approccio al ciclo di vita, che nella dimensione strettamente progettuale si concretizza nel Life Cycle Design (LCD) [14; 15], può costituire una base efficace per l'integrazione degli aspetti ambientali nello sviluppo di prodotto. In particolare quando il LCD è espressamente orientato ai requisiti ambientali [16], esso diviene un esempio di approccio al processo progettuale pienamente *environmentally-oriented*, e fornisce un'impostazione metodologica di riferimento per realizzare la distribuzione completa e integrata degli aspetti ambientali nel processo di sviluppo. Un ruolo determinante in questo senso è svolto dalla specificazione degli obiettivi e dalle strategie progettuali. Altro ruolo determinante può essere svolto dal Design for X (DFX) [17; 18], che fornisce gli strumenti per una progettazione orientata a specifici requisiti di prodotto, consentendo di includere, tra gli altri, anche i requisiti ambientali.

Quanto detto è sintetizzato in Figura 1, che evidenzia gli strumenti con i quali l'approccio al ciclo di vita può supportare il superamento degli ostacoli all'implementazione di uno sviluppo di prodotto *environmentally-oriented* nella pratica aziendale.

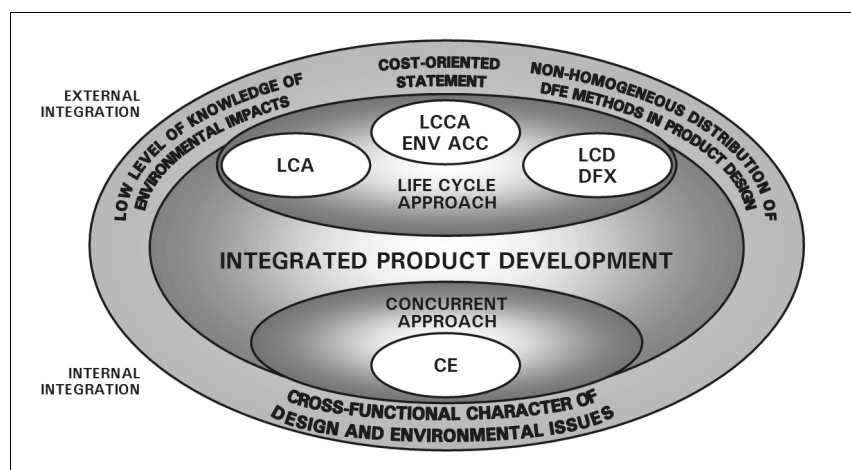


Figura 1: Approcci ai fattori che ostacolano l'implementazione dello sviluppo di prodotto *environmentally oriented*

Nella stessa figura è messo in evidenza un altro importante fattore di ostacolo, costituito dalla caratteristica trans-funzionale (*cross-functional characteristic*) sia della pratica progettuale che degli aspetti ambientali. Essa è legata alla multidisciplinarietà delle competenze richieste, e alla trasversalità delle attività correlate rispetto alle principali funzioni aziendali (progettazione, produzione, marketing). Questa questione è ben nota nell'ambito dell'organizzazione e pianificazione del processo di progettazione e sviluppo di prodotto, e il Concurrent Engineering (CE) [19; 20] è nato proprio per far fronte a queste necessità nell'ambito della pratica progettuale. L'integrazione degli aspetti ambientali nello sviluppo di prodotto può dunque avvalersi delle strutture organizzative del CE.

In sintesi, facendo ancora riferimento alla Figura 1, la piena integrazione degli aspetti ambientali nello sviluppo di prodotto deve avvenire a due livelli differenti e complementari:

- Integrazione esterna – Riguarda la relazione tra il processo di sviluppo prodotto e i fattori esterni al team di progetto che devono essere tenuti in considerazione: richieste del consumatore e del mercato, vincoli produttivi, necessità ambientali. Questa integrazione, come evidenziato in figura, viene realizzata mediante l'approccio al ciclo di vita, e utilizzando gli strumenti ad esso correlati.
- Integrazione interna – Riguarda la relazione tra le funzioni e le competenze interne al team di progetto. Questa integrazione, necessaria a gestire al meglio la *cross-functional characteristic* della pratica progettuale e degli aspetti ambientali, viene realizzata mediante l'approccio simultaneo e concorrente allo sviluppo di prodotto.

Realizzata l'integrazione a questo duplice livello, si può parlare in definitiva di sviluppo integrato di prodotto, Integrated Product Development (IPD), inteso nel senso più completo, e comprendente gli aspetti ambientali. E' interessante notare a tal proposito come l'IPD possa essere assimilato al concetto generale di miglioramento della soluzione progettuale nella sua rispondenza alle richieste del consumatore e alle opportunità di mercato [21]. L'approccio al ciclo di vita estende questa visione, affiancando alle necessità del consumatore anche quelle di tutti gli altri soggetti coinvolti nelle varie fasi del ciclo di vita del prodotto [22]. L'ulteriore estensione del concetto alla base del IPD, che include anche la rispondenza alle necessità dell'ambiente, costituisce dunque la premessa basilare per realizzare una progettazione integrata di prodotto che tenga conto anche dei requisiti ambientali.

3. INTERVENTI NEL PROCESSO DI SVILUPPO PRODOTTO

Facendo riferimento alla visione d'insieme del processo di progettazione e sviluppo prodotto riportata in Figura 2, che sintetizza noti modelli proposti in letteratura [23; 24; 25], e in cui le fasi intermedie specificamente progettuali sono raggruppate nel Product Design Process, è dunque possibile dire che la piena e omogenea integrazione degli aspetti ambientali si realizza con una serie di interventi diversi, a seconda delle diverse fasi del processo di sviluppo [26].

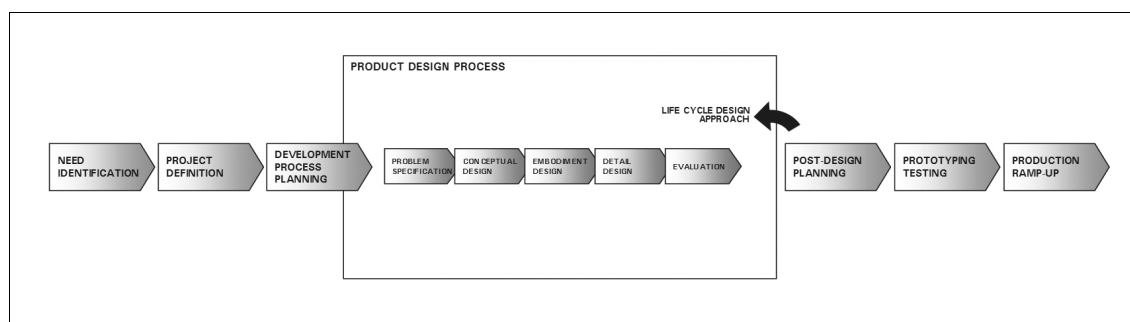


Figura 2: Processo di progettazione e sviluppo di prodotto: Visione d'insieme

Nelle fasi preliminari (Project Definition, Development Process Planning, Problem Specification) tale integrazione avviene mediante l'estensione dei fattori che condizionano l'impostazione preliminare del progetto, e la definizione delle specifiche e dei requisiti di prodotto, includendo oltre alle richieste del consumatore e alle opportunità di mercato anche le necessità ambientali, e dando a queste ultime il dovuto peso nella definizione di politiche e strategie aziendali. Ciò significa aggiungere alle informazioni in ingresso al processo progettuale una serie di informazioni e dati, non esclusivamente ambientali, relativi a quello che si prevede possa essere il ciclo di vita del prodotto.

L'impostazione delle fasi specificamente progettuali (cioè quelle che costituiscono il Product Design Process, con riferimento ancora alla Figura 2), deve essere guidata da opportune strategie di approccio agli aspetti ambientali del ciclo di vita del prodotto. Questa specifica questione sarà trattata successivamente.

Nelle fasi principali del processo progettuale, a partire dal Conceptual Design, e con particolare riguardo alle fasi di Embodiment e Detail Design, l'intervento progettuale deve essere impostato mirando ad armonizzare la gamma sempre più vasta dei requisiti progettuali, come previsto dal LCD [14]. Sulla base di questa impostazione, i diversi requisiti possono essere realizzati mediante gli strumenti del DFX [27], ognuno orientato a una specifica tipologia di requisito di prodotto, dando opportuno risalto a quelli orientati ai requisiti ambientali, che saranno introdotti a seguire.

La fase di Post-Design Planning, che nello schema generale del processo di sviluppo prodotto segue la fase di Product Design, deve essere integrata in essa, come previsto nella progettazione concorrente. Tale integrazione deve essere realizzata estendendo il Post-Design Planning alla pianificazione dell'intero ciclo di vita, comprendendo quindi produzione, distribuzione, utilizzo, e ritiro del prodotto, in modo da rendere pienamente compiuto l'approccio al ciclo di vita auspicato. E' proprio in relazione alla pianificazione del ciclo produzione-consumo-dismissione che vengono introdotti gli strumenti più appropriati del sistema DFX.

4. STRATEGIE AMBIENTALI DI APPROCCIO AL CICLO DI VITA

Nell'approccio al ciclo di vita, le strategie progettuali rivestono un ruolo determinante. Esse consentono di tradurre nella pratica progettuale i requisiti ambientali richiesti al prodotto. Va dunque evidenziato che le strategie ambientali più appropriate ed efficaci per uno specifico problema progettuale possono essere scelte con ocultezza solo dopo che gli obiettivi del progetto sono stati accuratamente tradotti in requisiti di prodotto [16].

In linea generale, le strategie orientate all'efficienza ambientale del ciclo di vita possono essere definite sulla base di quelli che sono gli aspetti principali dell'impatto di un prodotto con l'ambiente, riconducibile agli scambi con l'ecosfera dei flussi fisico-chimici dei processi tecnologici costituenti il ciclo di vita:

- consumo delle risorse materiali e saturazione delle discariche;
- consumo delle risorse energetiche e perdita dei contenuti energetici dei prodotti in dismissione;
- emissioni complessive dirette e indirette relative all'intero ciclo di vita del prodotto.

Per un'analisi ambientale completa, dunque, occorre identificare non solo i flussi materiali nel ciclo di vita, ma anche quelli energetici ed emissivi.

Le strategie ambientali orientate alla riduzione di questo ampio spettro di impatti sono numerose [2; 16; 28]. Esse possono differenziarsi in base alla fase del ciclo di vita su cui si prefiggono di intervenire.

4.1. Strategie ambientali per la progettazione di prodotto

Poiché l'efficienza ambientale di un prodotto dipende direttamente dalla sua progettazione, è di fondamentale importanza mettere in relazione qualsiasi tipo di strategia si voglia perseguire con i principali parametri di progetto. Non tutte le strategie ambientali sono però assimilabili a vere e proprie strategie progettuali. Alcune di esse infatti consistono in interventi che non sono direttamente connessi alle scelte di progetto.

Facendo ancora riferimento ai già citati aspetti principali dell'impatto di un prodotto con l'ambiente, è possibile concludere che un intervento progettuale che vuole tener conto del comportamento del prodotto nel ciclo di vita in termini ambientali, in linea generale deve prefiggersi di ricercare l'ottimizzazione della distribuzione dei flussi di risorse, rifiuti e emissioni, cioè le condizioni favorevoli per ottenere:

- la riduzione dei volumi dei materiali utilizzati e l'estensione della loro vita;
- la chiusura dei cicli di flusso delle risorse mediante interventi di recupero;
- la minimizzazione delle emissioni e del consumo di energia, in produzione, utilizzo, dismissione.

Per realizzare pienamente queste condizioni occorre intervenire nei due ambiti differenti della progettazione di prodotto e della progettazione di processo. Questo secondo aspetto, benché di primaria importanza, e sempre più spesso considerato come intimamente connesso al processo di sviluppo prodotto, secondo i principi del Concurrent Engineering, non rientra in maniera diretta negli obiettivi qui prefissati. In questa sede infatti ci si rivolge piuttosto alla progettazione di prodotto inteso come entità materiale, e dunque come sistema di componenti materici progettati in modo da costituire un sistema funzionale che soddisfa determinati requisiti richiesti. Questa è la dimensione dell'entità-prodotto direttamente connessa alle scelte operate nelle fasi specificamente progettuali del processo di sviluppo (Conceptual, Embodiment, Detail Design), i cui parametri sono riconducibili proprio alla dimensione fisica del prodotto: materiali, forme e dimensioni dei componenti, architettura del sistema, interconnessioni e giunzioni.

Tale dimensione fisica dell'entità-prodotto nel suo ciclo di vita è espressa dai flussi delle risorse materiali. Ci si riconduce dunque al primo dei tre aspetti principali dell'impatto di un prodotto con l'ambiente, quello appunto dell'impiego e consumo delle risorse materiali.

Questa visione parziale del problema ambientale può sembrare limitante. Essa in realtà ha una portata molto ampia, e trascura del tutto solo la possibilità di intervenire con strategie migliorative sui vari processi tecnologici che costituiscono il ciclo di vita. Non esclude infatti la possibilità di tener conto nelle valutazioni ambientali anche degli altri due aspetti dell'impatto, quello del consumo

energetico e quello delle emissioni del ciclo di vita del prodotto. Infatti per quel che riguarda i contributi di impatto dovuti ai contenuti energetici ed emissivi dei materiali in gioco, essi sono chiaramente riconducibili ai volumi dei flussi materiali. Per quel che riguarda i contributi di impatto dovuti all'energia che alimenta il processo, e all'emissione diretta del processo, anch'essi sono generalmente riconducibili ai volumi da processare, o a specifici parametri di processo dipendenti da proprietà fisiche dei materiali e delle geometrie. Dunque sono anch'essi gestibili mediante le scelte della progettazione di prodotto che, in base alla definizione dei materiali e dei principali parametri geometrici, condizionano anche la scelta dei processi e la loro modalità di esecuzione.

Focalizzando dunque l'attenzione sui flussi materiali, e quindi sulla dimensione fisica dell'entità-prodotto, il miglioramento della prestazione ambientale del suo ciclo di vita può essere conseguita mediante l'applicazione di due tipologie principali di strategie [26; 29], come sintetizzato in Figura 3:

- strategie di estensione della vita di utilizzo (Useful Life Extension Strategies), che consentono di valorizzare l'utilizzo dei materiali e di tutte le altre risorse impiegate nella realizzazione del prodotto (manutenzione, riparazione, aggiornamento, adattamento del prodotto);
- strategie di recupero a fine vita di utilizzo (End-of-Life Strategies), che consentono di chiudere il ciclo dei materiali, e di recuperare almeno in parte le altre risorse impiegate nella realizzazione del prodotto (riutilizzo dei sistemi e dei componenti, riciclo dei materiali nel ciclo produttivo primario o in cicli esterni).

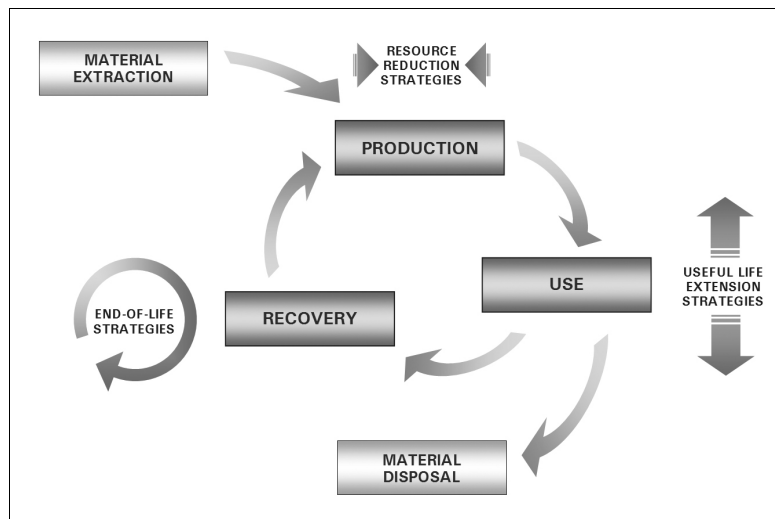


Figura 3: Strategie ambientali per il ciclo di vita dei prodotti

Queste strategie, benché debbano essere prese in considerazione già in sede di progetto, in modo da favorirle se ritenuto opportuno, di fatto si concretizzano dopo che il prodotto è stato realizzato. Come evidenziato nella stessa Figura 3, un'altra tipologia importante di strategie ambientali di cui tener conto, ancora legata alla dimensione materica del prodotto, è quella delle strategie di riduzione delle risorse da impiegare nella sua realizzazione (Resource Reduction Strategies). Esse comprendono tutti gli interventi e le scelte che consentono di ridurre l'impiego di materiali e risorse energetiche, e dunque in linea generale sono riconducibili ad un ampio spettro di accorgimenti che riguardano non solo la progettazione del prodotto ma anche la pianificazione del processo produttivo. Possono inoltre comprendere strategie radicali, come la "dematerializzazione" (*dematerialization*), cioè la riduzione della quantità di materiali necessari a realizzare una funzione economica [30], che promuove l'evoluzione dalla vendita di prodotti alla vendita di servizi, e che quindi rientra più propriamente nell'ambito delle strategie di mercato.

Nei paragrafi che seguono l'attenzione sarà focalizzata sulle prime due tipologie di strategie progettuali, in relazione alle quali saranno introdotti gli strumenti che possono supportare il progettista nel loro conseguimento. Successivamente sarà messo in evidenza come tali strategie possono essere inserite in una struttura metodologica per la progettazione di prodotto, delineando la piena integrazione degli aspetti ambientali.

4.2. Introduzione delle strategie ambientali nel processo progettuale

Le strategie ambientali per il miglioramento del ciclo di vita del prodotto appena introdotte, distinte secondo le due tipologie proposte, nella pratica possono essere ricondotte a vere e proprie strategie progettuali, cioè accorgimenti che consentono di guidare il progettista nelle scelte che devono essere operate ai diversi livelli di sviluppo del progetto. La Tabella 1 riassume proprio gli accorgimenti progettuali in tal senso più significativi, classificati in relazione ai principali parametri di progetto e messi in relazione alle strategie ambientali prese in esame. I parametri di progetto sono inoltre distinti a seconda se relativi alla progettazione di sistema (caratteristiche dell'architettura, in particolare layout e relazioni tra i componenti) o alla progettazione di dettaglio dei componenti (materiali, forme, parametri geometrici dimensionali).

Tabella 1: Parametri della progettazione, strategie progettuali, e strategie ambientali: (ES1) manutenzione; (ES2) riparazione; (ES3) aggiornamento e adattamento; (ES4) riutilizzo diretto; (ES5) riutilizzo delle parti; (ES6) riciclaggio

LIVELLO DI INTERVENTO	PARAMETRI DI PROGETTO	ACCORGIMENTI PER LA PROGETTAZIONE	STRATEGIE AMBIENTALI					
			LIFE EXT (ES1) (ES2) (ES3)			E-O-L REC (ES4) (ES5) (ES6)		
SISTEMA	LAYOUT	Minimizzare il numero dei componenti	✓	✓			✓	✓
		Ottimizzare la modularità del sistema	✓	✓	✓		✓	✓
		Progettare sistemi costituiti da componenti multifunzionali e aggiornabili			✓	✓	✓	
		Prevedere l'accessibilità ai componenti	✓	✓			✓	✓
	RELAZIONI TRA COMPONENTI	Ridurre il numero delle connessioni	✓	✓	✓		✓	✓
		Ridurre la varietà degli elementi di connessione	✓	✓	✓		✓	✓
Incrementare la semplicità di smontaggio		✓	✓	✓		✓	✓	
COMPONENTE	MATERIALI	Ridurre l'impiego di materiali scarseggianti, inquinanti, o pericolosi	✓	✓				✓
		Incrementare l'impiego di materiali biodegradabili e a basso impatto		✓				✓
		Ridurre la varietà dei materiali						✓
		Incrementare la riciclabilità e la compatibilità dei materiali ai fini del riciclo						✓
		Specificare e marciare i materiali						✓
	FORMA	Ottimizzare prestazione, resistenza, e affidabilità	✓		✓	✓	✓	
		Progettare per semplificare la rimozione	✓	✓	✓		✓	✓
	DIMENSIONI	Ridurre la massa	✓	✓	✓		✓	
		Ottimizzare prestazione, resistenza, e affidabilità	✓		✓	✓	✓	
		Progettare per semplificare la rimozione	✓	✓	✓		✓	✓

Nella stessa tabella inoltre sono riportate le correlazioni dirette tra ciascuna strategia progettuale proposta e le strategie ambientali che esse possono supportare. Ciò consente di delineare l'impostazione metodologica preliminare mediante la quale è possibile integrare gli aspetti ambientali nella pratica progettuale. Essa è sintetizzata in Figura 4 ed è riassumibile nei seguenti punti:

- definizione dei requisiti ambientali da conseguire;
- scelta delle strategie ambientali più appropriate ai requisiti richiesti;
- individuazione delle strategie progettuali che possono supportare il perseguimento di quelle ambientali prescelte;
- delineamento della visione d'insieme sui parametri di progetto mediante i quali intervenire, ai diversi livelli progettuali.

Il risultato dell'impostazione preliminare appena tracciata, che come evidenziato in Figura 4 consiste nella visione d'insieme dei parametri di progetto su cui intervenire per perseguire le strategie

ambientali e realizzare i requisiti richiesti, può essere molto utile nella gestione dei conflitti tra queste stesse strategie. Non di rado, infatti, gli interventi progettuali finalizzati a obiettivi ambientali differenti entrano in contrapposizione [31].

L'acquisizione di questa visione d'insieme costituisce inoltre il primo passo verso la chiarificazione dei legami tra le scelte orientate agli aspetti ambientali e quelle ispirate dai criteri convenzionali. In ogni caso, infatti, le strategie ambientali devono essere perseguite in armonia con l'intero spettro dei requisiti, gestendo gli eventuali conflitti che possono nascere da orientamenti progettuali finalizzati a obiettivi diversi. La rispondenza a criteri non direttamente riconducibili a benefici ambientali, come l'economicità e la qualità del prodotto, diventa essa stessa parte del concetto di "eco-efficienza" della soluzione progettuale [32].

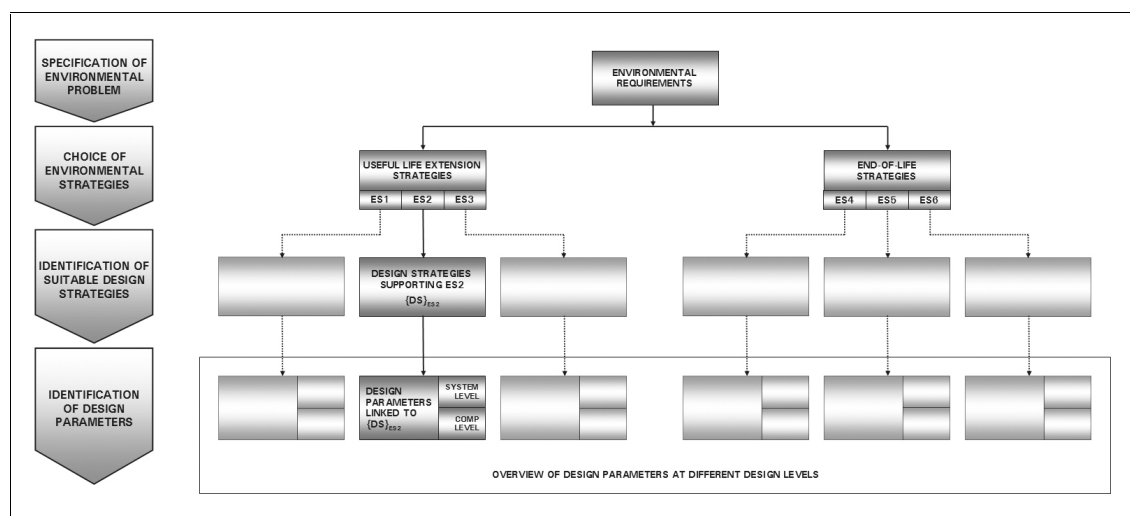


Figura 4: Introduzione delle strategie ambientali nel processo progettuale: Impostazione metodologica preliminare

5. STRUMENTI PER I REQUISITI AMBIENTALI DEL CICLO DI VITA

Un intervento progettuale mirato ad armonizzare la gamma sempre più vasta dei requisiti, cui si aggiungono anche quelli relativi alla prestazione ambientale del prodotto nel suo ciclo di vita, può essere realizzato basandosi sulla struttura metodologica del LCD [14]. In essa vanno a innestarsi gli strumenti più opportuni del DFX, ognuno orientato a una specifica tipologia di requisito di prodotto, che intervenendo soprattutto nelle fasi di Embodiment e Detail Design, possono supportare il progettista nella traduzione del concept di prodotto in soluzione dettagliata.

5.1. Ruolo del Design for X

Benché il DFE sia talvolta inteso come appartenente al sistema DFX, in realtà è più appropriato intenderlo come un approccio alla progettazione, dunque non un vero e proprio strumento progettuale operativo, ma piuttosto una filosofia di progetto, che comporta un profondo cambiamento nel modo in cui l'industria deve rapportarsi al problema ambientale [33]. In quanto approccio alla progettazione, esso richiede degli strumenti operativi che ne concretizzino le premesse e gli obiettivi. Alcuni strumenti del sistema DFX possono ricoprire questo ruolo con efficacia.

Un aspetto particolarmente interessante degli strumenti DFX è la loro specificità, che consente la decomposizione del problema progettuale, già molto vasto ed articolato nella sua dimensione convenzionale, e ulteriormente ampliato dai requisiti ambientali. Ogni strumento DFX è infatti caratterizzato da metodi, procedure, modelli, che mediante relazioni analitiche appropriate consentono l'elaborazione di dati specifici. Un opportuno insieme di DFX può consentire quindi di trattare separatamente specifiche sezioni del problema, ognuna delle quali può essere affrontata dai componenti del team di progetto più esperti.

Questo approccio basato sulla decomposizione del problema e dello stesso intervento progettuale, che è alla base dei moderni metodi della progettazione di prodotto, può costituire una efficace risorsa per realizzare l'integrazione tra le necessità ambientali e quelle tradizionali [34]. Allo stesso tempo non va però trascurato l'effetto negativo che un'eccessiva specificità di azioni progettuali separate può determinare sul processo progettuale [35], ritardandone e perfino impedendone la convergenza verso una soluzione finale equilibrata, cioè efficiente nel senso più ampio, realizzabile, e commercializzabile. A questa pericolosa deriva può porre rimedio la più volte auspicata impostazione integrata e simultanea dell'intervento progettuale.

5.2. DFX per le strategie ambientali

Tra le diverse tipologie di DFX, alcune sono di sicuro interesse in relazione alle due strategie di intervento per la qualità ambientale del ciclo di vita individuate in precedenza:

- Quelle mirate a facilitare il mantenimento della corretta funzionalità durante la fase di utilizzo, in quanto possono favorire l'estensione della vita utile del prodotto. In questo caso si parla di Design for Maintainability e Design for Serviceability [36; 37; 38; 39], dove generalmente il secondo, prendendo in considerazione le necessità legate all'intero insieme delle operazioni di servizio (diagnosi, manutenzione, riparazione), comprende anche il primo.
- Quelle orientate alla pianificazione dei processi a fine vita, in quanto mirano alla riduzione dell'impatto di dismissione e al recupero delle risorse. In questo caso in termini generali si parla di Design for Product Retirement/Recovery [40; 41; 42; 43], mentre più specificamente si fa riferimento a Design for Remanufacturing [44] e Design for Recycling [45], a seconda se si dà maggiore enfasi al riutilizzo dei componenti o al riciclo dei materiali.

In entrambi i casi si tratta di tipologie di strumenti che per realizzare i diversi requisiti-obiettivo cercano di intervenire direttamente sui parametri di progetto più significativi, legati all'architettura del prodotto e alle caratteristiche dei componenti, proprio come richiesto dall'impostazione delineata.

Lo stesso può dirsi anche per una terza tipologia di DFX, orientata alla progettazione dei sistemi costruttivi finalizzata al loro smontaggio, nota come Design for Disassembly. Benché esso sia frequentemente finalizzato agli interventi di recupero a fine vita [46; 47; 48], tanto da essere considerato talvolta come parte integrante del Design for Recovery and Recycling [40; 41; 45], il Design for Disassembly è trasversale a entrambe le strategie ambientali, sia di estensione della vita di utilizzo che di recupero a fine vita [49; 50]. Esso infatti mira a realizzare l'importante caratteristica del prodotto della facilità di smontaggio, che le agevola entrambe.

Per realizzare l'integrazione degli aspetti ambientali nella progettazione di prodotto, i DFX di supporto alle strategie ambientali devono ovviamente assumere un ruolo determinante nell'ambito di un ampio sistema flessibile di strumenti per la progettazione integrata, orientata a una grande varietà di requisiti di prodotto. La loro relazione e integrazione con gli altri strumenti DFX diventa dunque determinante per il conseguimento di una soluzione finale che riesca a interpretare i diversi requisiti, e a bilanciare le varie strategie di progetto.

6. STRUMENTI PER LA PROGETTAZIONE INTEGRATA: VISIONE D'INSIEME

Grazie alla varietà di tipologie, i DFX attualmente più noti possono costituire un sistema flessibile di strumenti per la progettazione integrata, orientata a una grande varietà di requisiti di prodotto, caratteristici rispetto a fasi specifiche del ciclo di vita o trasversali rispetto all'intero ciclo. Tra essi il Design for Manufacturing e il Design for Assembly, per quel che riguarda le necessità della fase di produzione, il Design for Reliability, il Design for Maintainability e il Design for Quality, per quel che riguarda la corretta funzionalità e la qualità dei prodotti durante il loro utilizzo, hanno ormai acquisito strutture metodologiche e modelli consolidati [15; 18].

Gli strumenti DFX possono intervenire con maggiore efficacia nelle fasi progettuali di Embodiment Design (intervenendo nella definizione delle unità funzionali e del layout) e di Detail Design (intervenendo su forma dei componenti, dimensioni, materiali). L'incidenza che possono avere nella precedente fase di Conceptual Design è limitata all'applicazione di criteri fondamentali, che possono supportare il progettista nella selezione delle prime idee. Questa particolare fase è per sua

stessa natura quella che dà maggiore spazio alla creatività, e quindi induce il progettista a utilizzare strumenti più appropriati, come i vari metodi di generazione del concept (*concept generation methods*) [25]. Anche per quel che riguarda l'ottica ambientale, maggiore incidenza possono avere in questa fase supporti diversi dai DFX, come ad esempio tecniche basate sull'analisi delle diverse categorie di aspetti ambientali, contestualizzate rispetto alle fasi del ciclo di vita, che consentono di formulare le migliori opportunità di implementare tali aspetti nella pianificazione del prodotto [51]. Non è superfluo evidenziare inoltre che, indipendentemente dalla specificità del problema, in questa particolare fase dello sviluppo progettuale un ruolo di assoluto rilievo è quello svolto dall'Industrial Design, e ciò vale anche nell'ambito della progettazione di prodotto *environmentally-oriented*, in relazione alla quale l'industrial designer può dare un contributo determinante [52].

Anche nella fase di Problem Specification, preliminare a quelle progettuali e fondamentale per l'impostazione delle corrette strategie di progetto, si può ricorrere a strumenti specifici. Tra le tecniche più diffuse come ausilio alla corretta comprensione del problema e generazione delle specifiche di progetto, la Quality Function Deployment (QFD) consente di tradurre le esigenze e i desideri del consumatore in requisiti di prodotto, tenendo conto della competizione di mercato, e identificando le relazioni tra i requisiti stessi. Derivata da tale tecnica, la Green QFD costituisce una metodologia per l'impostazione preliminare dello sviluppo di prodotto, che integra le richieste del consumatore con le necessità ambientali ed economiche del ciclo di vita [53].

Non è questo l'unico caso di una tecnica sviluppata per altre finalità, che viene successivamente reinterpretata in chiave ambientale. Un altro chiaro esempio è quello della Environmental FMEA (E-FMEA), chiaramente derivata dalla ben nota e consolidata tecnica Failure Mode Effect Analysis (FMEA), utilizzata per identificare in sede di progetto i potenziali insuccessi (*failures*) che possono incorrere nella realizzazione delle funzionalità richieste al prodotto in via di sviluppo. Basandosi sulla medesima impostazione metodologica, e acquisendo l'approccio al ciclo di vita, la E-FMEA si differenzia dalla FMEA perché piuttosto che orientarsi all'identificazione degli insuccessi nella realizzazione delle funzionalità tecniche, focalizza l'attenzione sugli insuccessi nella realizzazione degli obiettivi e delle prestazioni ambientali del prodotto [54].

Tutti questi strumenti devono affiancarsi a quelli della progettazione ingegneristica tradizionale, orientati alle funzioni prestazionali primarie del prodotto, tra i quali spiccano per diffusione e livello di evoluzione quelli basati sulla Finite Element Analysis (FEA), ormai largamente implementati al calcolatore. Questi ultimi, insieme agli strumenti che supportano la rappresentazione grafica (Computer Aided Design - CAD), generalmente mediante modellazione solida parametrica dei componenti e dei sistemi, vanno a costituire quello che può esser definito come un sistema di strumenti per il progettista in grado di realizzare una "prototipazione virtuale" del prodotto in via di sviluppo, fino a poterne simulare la realizzazione, minimizzando quindi i problemi che possono incorrere nelle fasi realizzativa e di utilizzo, e riducendo tempi e costi di sviluppo [55].

Per realizzare in definitiva una progettazione completa, efficace e *environmentally-oriented*, tutti questi strumenti devono essere compresi e gestiti nell'ambito di un processo IPD, inteso nel senso esposto nel precedente Paragrafo 2, e rappresentato in Figura 1, dove assumono un ruolo determinante gli strumenti orientati al ciclo di vita (LCA, LCCA) e i DFX di supporto alle principali strategie ambientali (Paragrafo 5.2). Per quel che riguarda in particolare le due tecniche di analisi ambientale ed economica del ciclo di vita, LCA e LCCA, e le rispettive potenzialità di integrazione nel processo di sviluppo prodotto, si rimanda a specifici contributi di altri autori [56; 57].

In Figura 5 si propone un diagramma che raccoglie gran parte delle diverse tipologie di strumenti appena descritti. Tale diagramma classifica gli strumenti in base alle specifiche fasi progettuali in cui possono essere più efficaci, e alle fasi del ciclo di vita su cui possono influire. A queste due "dimensioni" se ne aggiunge una terza, che caratterizza gli strumenti in base alla tipologia di informazione che possono fornire al progettista, e quindi alla loro potenzialità rispetto alla funzione decisionale (unicamente analisi - miglioramento e ottimizzazione).

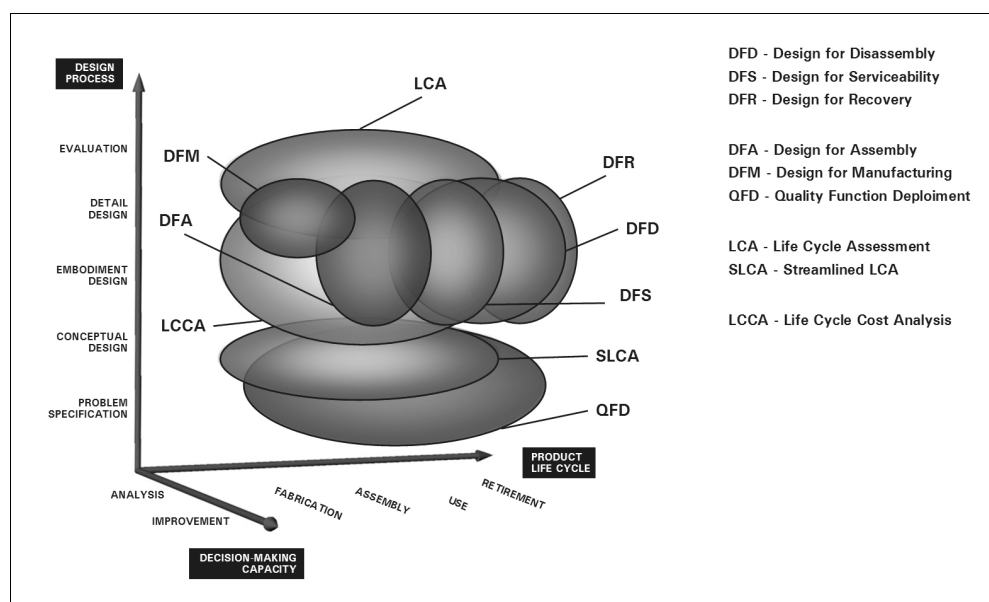


Figura 5: Strumenti per la progettazione integrata: Visione d'insieme

7. VERSO LO STANDARD INTERNAZIONALE: IL RAPPORTO TECNICO ISO/TR 14062

In risposta alla crescente sensibilità dei consumatori e delle aziende produttrici nei confronti delle problematiche ambientali legate alla produzione industriale e alla conseguente necessità di integrare gli aspetti ambientali nel processo di progettazione e sviluppo prodotto, nel 1998 il comitato tecnico ISO/TC 207 - Environmental Management ha creato un gruppo di lavoro che si occupasse specificamente del tema "Design for Environment". Frutto di un iter articolato, sviluppatosi nei successivi quattro anni, il technical report ISO/TR 14062 "Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development" [58] si prefigge lo scopo di fornire ai soggetti direttamente coinvolti nella fase di progettazione e sviluppo, un quadro sistematico per prevedere e identificare i possibili effetti che i loro futuri prodotti potranno avere sull'ambiente, e per prendere delle decisioni efficaci al momento del concepimento e dello sviluppo di tali prodotti al fine di migliorarne le prestazioni ambientali.

Le principali questioni trattate nel technical report (premesse generali e concetti basilari, obiettivi ambientali e strategie progettuali, integrazione degli aspetti ambientali nel processo progettuale), rispecchiano in maniera puntuale e completa il quadro generale sulle problematiche connesse alla progettazione di prodotto per l'ambiente, e l'impostazione metodologica che qui sono stati tracciati.

L'evoluzione di questo primo report verso uno standard che si vada ad integrare con gli altri standard per l'Environmental Management del gruppo ISO 14000, oltre che auspicabile per la realizzazione di sistemi di gestione ambientale sempre più completi e integrati, potrebbe chiaramente costituire uno strumento propulsivo per la diffusione del DFE nella pratica progettuale. Ciò è confermato dall'interesse che il technical report ha già suscitato in ambiti specifici di standardizzazione normativa. E' questo il caso della componentistica elettromeccanica ed elettronica, in relazione alla quale si segnala che le nuove edizioni degli standard IEC Guide 109 "Environmental aspects - Inclusion in electrotechnical products standards" [59], e ECMA-341 "Environmental design considerations for ITC (Information and Communication Technology) and CE (Consumer Electronic) products" [60], fanno esplicito riferimento all' ISO/TR 14062, di cui adottano i concetti basilari, l'impostazione generale e i principi progettuali.

8. CONCLUSIONI

Affinché i requisiti ambientali diventino fattori di innovazione per uno sviluppo di prodotto “sostenibile” nel senso più ampio, occorre intervenire con una progettazione integrata e simultanea dei prodotti, che tenga conto di uno spettro sempre più ampio di specifiche e requisiti.

L'intervento progettuale deve essere impostato secondo i principi dell'approccio al ciclo di vita, che si concretizza nel Life Cycle Design. Definite le principali fasi del ciclo di vita di un prodotto, esse devono essere prese in considerazione già a partire dalla definizione del problema progettuale e dei requisiti di prodotto, che successivamente verranno tradotti dapprima nel concept del prodotto e poi nella soluzione dettagliata. Solo un'accurata definizione degli obiettivi ambientali e dei requisiti conseguenti può consentire l'individuazione delle strategie di progetto più adatte.

Queste ultime possono essere supportate da diverse tipologie di strumenti, che vanno a completare il sistema flessibile e articolato di strumenti della progettazione per i requisiti di prodotto noto come Design for X. Opportunamente inseriti in un processo di sviluppo integrato, che assimila l'approccio al ciclo di vita e le metodologie ad esso correlate, gli strumenti per i requisiti ambientali consentono di supportare il progettista nell'operare le scelte sui parametri di progetto più significativi, incidendo fortemente sulla soluzione finale, e confrontandosi con il vasto sistema degli strumenti orientati ai requisiti convenzionali di prodotto.

NOTA

Il presente lavoro sintetizza le principali premesse e l'impostazione generale alla base di una monografia di prossima pubblicazione (Giudice, F., La Rosa, G., Risitano, A., Product Design for the Environment: A Life Cycle Approach, CRC Press, Dicembre 2005), dalla quale sono tratte le figure qui proposte. Mediante tale monografia gli stessi autori, prendendo le mosse dallo specifico ambito disciplinare di appartenenza, vogliono proporre il proprio contributo alla sfida sempre più attuale dello sviluppo e della diffusione di una nuova cultura del progetto sensibile ai problemi dell'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gutowski, T. et al., “Environmentally Benign Manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 13, 2005, pp. 1-17.
- [2] Fiksel, J., Design for the Environment: Creating Eco-Efficient Products and Processes, McGraw Hill, 1996.
- [3] Billatos, S.B. and Basaly, N.A., Green Technology and Design for the Environment, Taylor & Francis, 1997.
- [4] Green Paper on Integrated Product Policy, COM(2001)68, Commission of the European Communities, 2001.
- [5] Krishnan, V. and Ulrich, K.T., “Product Development Decisions: A Review of the Literature”, *Management Science*, Vol. 47(1), 2001, pp. 1-21.
- [6] Ries, G., Winkler, R., and Zust, R., “Barriers for a Successful Integration of Environmental Aspects in Product Design”, in *Proceedings of EcoDesign'99: 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan, 1999, pp. 527-532.
- [7] Fava, J. et al., A Technical Framework for Life-Cycle Assessment, SETAC Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1991.
- [8] Rebitzer, G. et al., “Life Cycle Assessment - Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications”, *Environment International*, Vol. 30(5), 2004, pp. 701-720.
- [9] Todd, J.A. and Curran, M.A., Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup, SETAC Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1999.
- [10] Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S., Life Cycle Cost and Economic Analysis, Prentice Hall, 1991.
- [11] Asiedu, Y. and Gu, P., “Product Life Cycle Cost Analysis: State of the Art Review”, *International Journal of Production Research*, Vol. 36(4), 1998, pp. 883-908.

- [12] Gale, R.J.P. and Stokoe, P.K., "Environmental Cost Accounting and Business Strategy", in Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing, Madu, C.N., Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 119-137.
- [13] Kumaran, D.S. et al., "Environmental Life Cycle Cost Analysis of Products", *Environmental Management and Health*, Vol. 12(3), 2001, pp. 260-276.
- [14] Alting, L., "Life-Cycle Design of Products: A New Opportunity for Manufacturing Enterprises", in Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques, Kusiak, A., Ed., John Wiley & Sons, 1993, pp. 1-17.
- [15] Ishii, K., "Life-Cycle Engineering Design", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 117, 1995, pp. 42-47.
- [16] Keoleian, G.A. and Menerey, D., Life Cycle Design Guidance Manual, EPA/600/R-92/226, US Environmental Protection Agency, 1993.
- [17] Bralla, J.G., Design for Excellence, McGraw-Hill, 1996.
- [18] Kuo, T.-C., Huang, S.H., and Zhang, H.-C., "Design for Manufacture and Design for 'X': Concepts, Applications, and Perspectives", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 41, 2001, pp. 241-260.
- [19] Kusiak, A. and Wang, J., "Decomposition in Concurrent Design", in Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques, Kusiak, A., Ed., John Wiley & Sons, 1993, pp. 481-507.
- [20] Prasad, B., Concurrent Engineering Fundamentals Vol. 1, Prentice Hall, 1996.
- [21] Wang, B., Integrated Product, Process and Enterprise Design, Chapman & Hall, 1997.
- [22] Prudhomme, G., Zwolinski, P., and Brissaud, D., "Integrating into the Design Process the Needs of Those Involved in the Product Life-Cycle", *Journal of Engineering Design*, Vol. 14(3), 2003, pp. 333-353.
- [23] Pahl, G. and Beitz, W., Engineering Design: A Systematic Approach, Springer-Verlag, 1996.
- [24] Ulrich, K.T. and Eppinger, S.D., Product Design and Development, McGraw-Hill, 2000.
- [25] Ullman, D.G., The Mechanical Design Process, McGraw-Hill, 2003.
- [26] Giudice, F. et al., "Sviluppo di Prodotto in Relazione alle Necessità Ambientali: Applicazione alla Progettazione di un Componente Meccanico", in Proceedings of XXXII Conferenza Nazionale AIAS, Salerno, Italia, 2003, paper 85.
- [27] Yazdani, B. and Holmes, C., "Four Models of Design Definition: Sequential, Design Centered, Concurrent and Dynamic", *Journal of Engineering Design*, Vol. 10(1), 1999, pp. 25-37.
- [28] Hanssen, O.J., "Preventive Environmental Strategies for Product Systems", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 3(4), 1995, pp. 181-187.
- [29] Giudice, F., La Rosa, G., and Risitano, A., "Prodotti Eco-compatibili", *Progettare*, Vol. 257, 2002, pp. 69-73.
- [30] Wernick, I.K. et al., "Materialization and Dematerialization: Measures and Trends", in Technological Trajectories and the Human Environment, Ausubel, J.H. and Langford, H.D., Eds., National Academy Press, 1997, pp. 135-156.
- [31] Luttrupp, C. and Karlsson, R., "The Conflict of Contradictory Environmental Targets", in Proceedings of EcoDesign 2001: 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 2001, pp. 43-48.
- [32] Lye, S.W., Lee, S.G., and Khoo, M.K., "A Design Methodology for the Strategic Assessment of a Product's Eco-efficiency", *International Journal of Production Research*, Vol. 39(11), 2001, pp. 2453-2474.
- [33] Allenby, B.R., "Design for Environment", in Industrial Ecology, U.S.-Japan Perspectives, Richards, D.J. and Fullerton, A.B., Eds., National Academy Press, 1994, pp. 32-34.
- [34] Jackson, P. et al., "An Analytical Method for Integrating Environmental and Traditional Design Considerations", *Annals of the CIRP*, Vol. 46(1), 1997, pp. 355-360.
- [35] Bras, B., "Incorporating Environmental Issues in Product Design and Realization", *Industry and Environment*, Vol. 20(1-2), 1997, pp. 7-13.
- [36] Gershenson, J. and Ishii, K., "Life-Cycle Serviceability Design", in Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques, Kusiak, A., Ed., John Wiley & Sons, 1993, pp. 363-384.
- [37] Klement, M.A., "Design for Maintainability", in Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques, Kusiak, A., Ed., John Wiley & Sons, 1993, pp. 385-400.

- [38] Subramani, A. and Dewhurst, P., "Efficient Design for Service Considerations", *Manufacturing Review*, Vol. 6(1), 1993, pp. 40-47.
- [39] Kusiak, A. and Lee, G., "Design of Parts and Manufacturing Systems for Reliability and Maintainability", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, 1997, pp. 67-76.
- [40] Ishii, K., Eubanks, C.F., and Di Marco, P., "Design for Product Retirement and Material Life Cycle", *Materials and Design*, Vol. 15(4), 1994, pp. 225-233.
- [41] Navin-Chandra, D., "The Recovery Problem in Product Design", *Journal of Engineering Design*, Vol. 5(1), 1994, pp. 67-87.
- [42] Zhang, H.C. et al., "Environmentally Conscious Design and Manufacturing: A State of the Art Survey", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 16(5), 1997, pp. 352-371.
- [43] Gungor, A. and Gupta, S.M., "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery: A Survey", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 36, 1999, pp. 811-853.
- [44] Bras, B. and McIntosh, M.W., "Product, Process, and Organizational Design for Remanufacture: An Overview of Research", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 15, 1999, pp. 167-178.
- [45] Beitz, W., "Designing for Ease of Recycling", *Journal of Engineering Design*, Vol. 4(1), 1993, pp. 12-23.
- [46] Jovane, F. et al., "A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly", *Annals of the CIRP*, Vol. 42(2), 1993, pp. 651-658.
- [47] Harjula, T. et al., "Design for Disassembly and the Environment", *Annals of the CIRP*, Vol. 45(1), 1996, pp. 109-114.
- [48] Srinivasan, H., Shyamsundar, N., and Gadh, R., "A Framework for Virtual Disassembly Analysis", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 8, 1997, pp. 277-295.
- [49] Boothroyd, G. and Alting, L., "Design for Assembly and Disassembly", *Annals of the CIRP*, Vol. 41(2), 1992, pp. 625-636.
- [50] Ishii, K., Eubanks, C.F., and Marks, M., "Evaluation Methodology for Post Manufacturing Issues in Life-Cycle Design", *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 1(1), 1993, pp. 61-68.
- [51] O'Shea, M.A., "Design for Environment in Conceptual Product Design: A Decision Model to Reflect Environmental Issues of All Life-Cycle Phases", *Journal of Sustainable Product Design*, Vol.2, 2002, pp. 11-28.
- [52] Lofthouse, V., "Investigation into the Role of Core Industrial Designers in Ecodesign Projects", *Design Studies*, Vol. 25, 2004, pp. 215-227.
- [53] Zhang, Y., Wang, H.P., and Zhang, C., "Green QFD-II: A Life Cycle Approach for Environmentally Conscious Manufacturing by Integrating LCA and LCC into QFD Matrices", *International Journal of Production Research*, Vol. 37(5), 1999, pp. 1075-1091.
- [54] Lindahl, M., "E-FMEA: A New Promising Tool for Efficient Design for Environment", in *Proceedings of EcoDesign'99: 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan, 1999, pp. 734-739.
- [55] Kim, H., Querin, O.M., and Steven, G.P., "On the Development of Structural Optimization and Its Relevance in Engineering Design", *Design Studies*, Vol. 23, 2002, pp. 85-102.
- [56] Bhandar, G.S., Hauschild, M., and McAloone, T., "Implementing Life Cycle Assessment in Product Development", *Environmental Progress*, Vol. 22(4), 2003, pp. 255-267.
- [57] Fixson, S.K., "Assessing Product Architecture Costing: Product Life Cycles, Allocation Rules, and Cost Models", in *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference*, Salt Lake City, UT, 2004, DETC2004-57458.
- [58] *Environmental Management - Integrating Environmental Aspects into Product Design and Development*, ISO/TR 14062:2002(E), International Organization for Standardization, 2002.
- [59] *Environmental Aspects - Inclusion in Electromechanical Product Standards*, Guide 109 - IEC:2003(E), International Electrotechnical Commission, 2003.
- [60] *Environmental Design Considerations for ICT and CE Products*, Standard ECMA-341, Ecma International, 2004.